

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

ANÁLISIS DE AFECTACIONES POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN UNA ZONA COSTERA DE MANTA, MANABÍ ECUADOR

ANALYSIS OF EFFECTS BY ATMOSPHERIC CORROSION ON REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN A COASTAL ZONE OF MANTA, MANABÍ ECUADOR

Fabián Eudoro Moreira Basurto*(0000-0003-3729-8157)

Juan Carlos Guerra Mera*(0000-0001-6597-0022)

^aUniversidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

*juan.guerra@utm.edu.ec

Recibido: 27 de junio de 2024;

Aceptado: 02 de julio de 2024;

RESUMEN

La insuficiente ejecución de estudios de diagnóstico en estructuras de hormigón armado, destinados al análisis de afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, es una realidad existente en todo el litoral costero del Ecuador. Como una experiencia preliminar para la solución de esta problemática actual en la ingeniería civil, ocho estructuras de hormigón armado emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera fueron seleccionadas en una zona del cantón de Manta, provincia de Manabí, Ecuador. Evaluar las afectaciones por corrosión atmosférica en las estructuras fue el objetivo general del estudio. Mediciones de Resistividad Aparente que permitieron la obtención de la Intensidad de Corriente de Corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, así como de la Resistencia a la compresión estimada de la Esclerometría, fueron realizadas en una columna en ocho estructuras seleccionadas. La estimación del tiempo de vida útil en las estructuras fue posible. Los resultados obtenidos permitieron demostrar, que cinco estructuras se encontraron en sus tiempos de vida útil última o residual y una en su tiempo de vida útil de diseño. Solamente dos, pudieron encontrarse en su tiempo de vida útil de proyecto manteniendo sus condiciones iniciales de estética, funcionalidad y seguridad frente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera predominante en la zona de estudio. Esta experiencia puede ser adquirida en todo el litoral costero del Ecuador. El buen ajuste de modelos estadísticos basados en regresiones lineales y exponenciales crecientes, así como regresiones lineales múltiples, permitió demostrar como objetivos específicos del estudio, la influencia de la Resistencia a la Compresión en la Resistividad Aparente y la de ambos parámetros en la Intensidad de Corriente de Corrosión respectivamente. Se confirmó, que la Resistividad Aparente, además de definir el riesgo por corrosión atmosférica en elementos constructivos, es un parámetro necesario y suficiente para ser usado en los estudios de diagnóstico. La observación visual en una columna que presentó serias afectaciones debido a la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo de las ocho estructuras seleccionadas, permitió la confirmación de los resultados.

Palabras claves: estructuras, hormigón armado, corrosión atmosférica, vida útil, aceros de refuerzo.

ABSTRACT

The insufficient performance of diagnostic studies on reinforced concrete structures aimed at analyzing the effects by atmospheric corrosion on reinforcement steels is a reality in along the entire coastal coast of Ecuador. As a preliminary experience for the solution of this current problem in civil engineering, eight reinforced concrete structures located at different distances from the coastline were selected in a zone of Manta canton, province of Manabí, Ecuador. To evaluate the effects of atmospheric corrosion in the structures was the main objective of the study was. Apparent Resistivity measurements that allowed obtaining the Corrosion Current Intensity as an indicator of atmospheric corrosion in reinforcement steels, as well as the Compressive Strength estimated from Sclerometry, were carried out in a column in the eight selected structures. The estimation of the service life of the structures was possible. The results obtained showed that five structures are at their ultimate or residual service life and one at its design service life. Only two of them could be found in their project service life while maintaining their initial conditions of aesthetics, functionality and safety against to the impact of the aggressive coastal environment of the atmosphere prevailing in the study zone. This experience can be acquired along the entire coastline of Ecuador. The good fit of statistical models based on linear and exponential increasing regressions, as well as multiple linear regressions, allowed to demonstrate as specific objectives of the study, the influence of Compressive Strength on Electrical Resistivity, and of both parameters on Corrosion Current Intensity respectively. It was confirmed that Electrical Resistivity, besides defining the risk of atmospheric corrosion in construction elements, is a necessary and sufficient parameter to be used in diagnostic studies. The visual observation in a column that presented serious effects due to atmospheric corrosion in the reinforcement steels in one of the eight selected structures, allowed the confirmation of the results.

Keywords: structures, reinforced concrete, atmospheric corrosion, service life, reinforcement steel.

INTRODUCCIÓN

La ejecución de los preventivos e importantes estudios de diagnóstico en las estructuras de hormigón armado, antes de que se produzca un marcado desarrollo en el tiempo de las afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, seguido de los posteriores trabajos de mantenimiento derivados de los propios estudios, han sido siempre muy insuficientes (Helene, et al, 1996; Hernández y Mendoza, 2006). Esta insuficiencia se debe en gran medida a las carencias de personal altamente especializado, así como de la tecnología y recursos destinados a la ejecución de los trabajos de diagnóstico en las estructuras. Se trata de un factor esencial, que tiende a incrementar de manera acelerada en el tiempo el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado muy afectadas por la corrosión atmosférica en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Ecuador y a nivel mundial (Guerra, et al, 2023). Los estudios de diagnóstico para establecer las patologías de deterioro en las estructuras de hormigón armado con severas afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, constituyen una herramienta muy esencial en la ingeniería civil y de manera general. Principalmente, en las estructuras emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Aspecto que debe ser más concientizado y no solo en Ecuador.

Otra tendencia actual se basa, en que los pocos estudios de diagnóstico son ejecutados cuando las estructuras desgraciadamente han dejado atrás sus condiciones iniciales de tiempo de vida útil de proyecto como son estética, funcionalidad y seguridad (Castañeda, et al, 2012). Más bien, en el momento en que las estructuras se encuentran en su tiempo de vida útil última con severas afectaciones ocasionadas generalmente por el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. En algunos casos, cuando las estructuras han alcanzado su tiempo de vida útil residual, sin aportar beneficio alguno a la sociedad. De ahí, a que las estructuras les sean ejecutadas los trabajos de reparación y no los de mantenimiento, siendo los primeros mucho más costosos (Castañeda y Rodríguez, 2014; Castañeda et al, 2020). Los estudios de diagnóstico deben ser ejecutados realmente, cuando las estructuras han alcanzado su tiempo de vida útil de diseño, es decir, cuando comienzan a aparecer los primeros síntomas de deterioros ocasionados por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo (Helene, et al, 1996). Se trata, de las primeras manchas de óxidos de hierro en la superficie exterior del hormigón armado en las estructuras donde precisamente impacta el ambiente agresivo costero de la atmósfera. De esa forma, investigaciones que conduzcan a la obtención de normativas donde los resultados obtenidos permitirán prevenir las afectaciones por corrosión atmosférica para llegar a un tiempo de vida útil de proyecto superior a los 50 años en las estructuras de hormigón armado que se pretenden construir, son muy necesarias en la actualidad. Esta experiencia se está teniendo en cuenta actualmente en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Cuba (Marrero, et al, 2020, Castañeda, et al, 2023), China (Castañeda, et al, 2023) y Ecuador (Guerra, et al 2018).

En Brasil, se demostró que los trabajos de mantenimiento en edificaciones públicas no se abordan de manera importante. Una gran parte de estas construidas en zonas costeras de elevado potencial constructivo se encuentran en su tiempo de vida útil última o residual (Costa y Azebedo, 2022). Los resultados obtenidos en un estudio ejecutado en la ciudad costera de Chimbote en Perú permitieron demostrar, que la causa principal del deterioro en las estructuras de hormigón armado se debió a las afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo (Villareal, et al, 2011). Un estudio realizado en Santiago de Chile demostró, que no se cuenta con antecedentes suficientes para la ejecución de un análisis del tiempo de vida útil en un gran número de estructuras sometidas a afectaciones por corrosión atmosférica debido a la influencia de la carbonatación en el hormigón armado (Ebensperger y Olivares, 2023). Por otro lado, en China, 123 tipos de afectaciones fueron estudiados en 28 puentes hidráulicos de hormigón armado. El tiempo de vida útil de proyecto no superó los 40 años (Qin, et al, 2022). Numerosos estudios de diagnóstico se han venido ejecutando de manera reciente en estructuras de hormigón armado en el casco histórico de la Habana, Cuba. La elaboración del hormigón armado usando arena y/o agua de mar como de amasado, los niveles elevados de humedad relativa en el interior de las estructuras debido a la penetración del agua de lluvia, que ha ocasionado también la eflorescencia en el hormigón, han sido los factores más influyentes en el fenómeno de la corrosión en el acero de refuerzo (Hernández, et al, 2018 y 2023). La mayoría de las estructuras se encuentran actualmente en su tiempo de vida útil última o residual. No obstante, se viene trabajando en la evaluación de las afectaciones por corrosión. Los resultados obtenidos permitirán la selección adecuada de los insumos y productos necesarios y suficientes, así como en los sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos, con el propósito de devolverle a las estructuras sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto.

La problemática ingenieril basada en la insuficiente ejecución de los preventivos estudios de diagnóstico en las estructuras de hormigón armado para establecer sus patologías, seguido de los posteriores trabajos de terapia de mantenimiento o reparación, viene sucediendo actualmente en el litoral costero del Ecuador (Chiriboga y Maldonado, 2022; Guerra, et al, 2023).

El perfil costero del Ecuador hacia el Océano Pacífico cuenta con una extensión territorial de 640 km. De estos, 350 km pertenecen a la provincia de Manabí para un 54,6%. En todo el perfil costero existen un gran número de

estructuras principalmente de hormigón armado muy afectadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo (Guerra, et al, 2016 y 2017). De ahí, la importancia en cuanto a la ejecución de los estudios de diagnóstico basados en el análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado y no solo en el Cantón de Manta. Con relación a estos estudios, solamente se encontró un reporte basado en la evaluación estructural en la Estación de Bomberos ubicada en el Cantón costero de Jama precisamente en la Provincia de Manabí. El tipo de investigación fue descriptiva observacional. La técnica empleada fue a través de la evaluación simplificada y la evaluación detallada. Se determinó, que la edificación presentó diferentes afectaciones como, fisuras, grietas, pérdida de adherencia y eflorescencia profundas en las columnas de hormigón armado debido a la corrosión atmosférica muy severa en los aceros de refuerzo (Dueñas-Solorzano, 2019). Se trata de problemas de deterioro muy relacionados con la presencia de la humedad elevada en la zona costera de estudio y en la estructura. Sin embargo, los ensayos clásicos usados en estudios de diagnóstico que permiten llegar a resultados cuantitativos ingenieriles, con el propósito de establecer esquemas de trabajo de mantenimiento o reparación para devolverle a la estructura sus condiciones iniciales de tiempo de vida útil de proyecto, no fueron usados en el estudio. Lo mismo sucedió en la mayoría de los estudios referenciados anteriormente, con la excepción de los ejecutados en Cuba de manera reciente y a inicios del siglo (Fernández, et al, 2005).

Para la ejecución de estos importantes estudios de diagnóstico, diez ensayos deben ser ejecutados a pie de obra. Tres se le realizan al acero de refuerzo y siete al hormigón (Troconis, et al, 1997). Los tres al acero de refuerzo serían: Potencial estacionario de corrosión ($E-mV$), Intensidad de corriente de corrosión ($I_c-\mu A/cm^2$) como un indicador de la corrosión atmosférica y esfuerzo de tracción para ver cómo han variado los límites de fluencia y rotura en función de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Este último ensayo es muy usado también cuando las estructuras han sido afectadas por sismos para conocer el nivel de deformación del acero de refuerzo (Recep y Kocaly, 2022). En el hormigón armado: ensayos de Carbonatación (Velocidad de Carbonatación- $mm/años^{0.5}$), Perfil de penetración de iones cloruro (% masa de hormigón), Porcentaje de porosidad capilar efectivo ($\varepsilon-\%$), Velocidad de pulso ultrasónico ($VPU-m/s$), Resistencia a la compresión (R_c-Mpa), Esclerometría (R) y Resistividad Aparente ($Re-k\Omega/cm$). Desgraciadamente, no siempre se cuenta con toda la tecnología, insumos y personal para la ejecución de los diez ensayos a pie de obra. No obstante, al hacer uso de los tres últimos ensayos en el hormigón, es posible la obtención de resultados muy novedosos, necesarios y suficientes, para analizar las afectaciones por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo en estructuras de hormigón armado. Se trata de ensayos no destructivos, donde la Esclerometría es uno de los más usados (UNE-EN 12504-2:2022). De ahí, su uso elevado en estudios de diagnóstico a escala de laboratorio y/o a pie de obra. Incluso, como bien se conoce, a partir de los valores de Resistividad Aparente (en Ω/cm), valores de Intensidad de corriente de Corrosión ($I_c-\mu A/cm^2$) pueden ser obtenidos como un indicador muy eficaz que permite definir el nivel de afectación por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, así como el tipo de vida útil en que pudieran encontrarse las estructuras.

Precisamente, este estudio tuvo como objetivo general, analizar las afectaciones por corrosión atmosférica a partir de un estudio de diagnóstico en columnas, ejecutado en ocho estructuras de hormigón armado emplazadas en la zona costera de Manta, Manabí Ecuador, haciendo uso de la Resistividad Aparente, la Intensidad de Corriente de Corrosión y la Resistencia a la Compresión estimada a partir de la Esclerometría. La base de datos obtenida de las mediciones de estos tres parámetros importantes en las estructuras, permitió la realización del análisis estadístico haciendo uso del ajuste de regresiones lineales y exponenciales crecientes en ambos casos, así como el ajuste de regresiones múltiples. De esta forma, los objetivos específicos del estudio se basaron en, demostrar la influencia de la Resistencia a la Compresión en la Resistividad Aparente y la influencia de estos dos parámetros en la Intensidad de Corriente de Corrosión. Los resultados confirmados con la observación visual de elementos constructivos en dos de las ocho estructuras, permitieron estimar en qué tiempo de vida útil (de proyecto, de diseño, última y residual) pudieran encontrarse las estructuras estudiadas en la zona costera como tercer objetivo específico.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección de las ocho estructuras de hormigón armado

El estudio investigativo fue ejecutado en los meses comprendidos entre Septiembre/2023 y Febrero/2024 (Tabla. 1).

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

No.	Estructuras	Distancias desde la línea costera (m)	Año de Construcción
1	Edificio Manta Yacht Club (EMYC)	0	2006
2	Edificio Banco Pichincha (EBP)	200	1970
3	Complejo Habitacional Tohalli (CHT)	450	1985
4	Pila Paso Elevado Tarqui (PPET)	640	1991
5	Edificio El Bigote (EEB)	1260	1960
6	Coliseo Lorgio Pinargote (CLP)	1550	2013
7	Tribuna Estado Jocay (TEJ)	2510	2003
8	Estribo Paso Elevado - La Cultura (EPELC)		2017

La observación visual, las distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas y el año de construcción, fueron las herramientas que se tuvieron en cuenta para la selección de las ocho estructuras de hormigón armado en la zona costera de estudio en el cantón de Manta, provincia de Manabí, Ecuador (Tabla 1).

Ensayos no destructivos usados en cada estructura

Resistividad Aparente

Para la determinación de la Resistividad Aparente en (ρ -k Ω /cm), se utilizó el equipo marca GIATEC SURF™ de fabricación canadiense (Rango de medición: 0.1-1000 k Ω /cm, Rango de frecuencia: 13-100 Hz, Exactitud: \pm (0,1+1%). Dispositivo para la medición rápida, fácil y precisa de la Resistividad Aparente 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 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 Ω) para la determinación de la Resistividad Aparente (ρ -k Ω /cm):

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

El valor de a (cm), es la distancia entre los electrodos. Representa la profundidad a la cual puede ser medida la Resistividad Aparente, es decir, una medida del espesor de recubrimiento de hormigón en las estructuras. 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. De esta forma, se evita falsear el

resultado obtenido. Seguidamente, en la zona donde se detectaron aceros de refuerzo, se trazó una línea roja con un lápiz cristalográfico para la no ejecución de las mediciones de Resistividad Aparente.

Se obtuvieron seis valores en una columna seleccionada para cada una de las ocho estructuras expuestas 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 $n = 48$ valores de Resistividad Aparente fue obtenida. Los seis valores determinados en cada columna y sus promedios calculados fueron clasificados de acuerdo con los rangos exigidos en el Comité Técnico de RILEM, que establecen el riesgo por corrosión atmosférica en los elementos constructivos de hormigón armado en las estructuras (Andrade et al, 2004).

Resistencia a la compresión estimada a partir de la Esclerometría

Para la estimación de la Resistencia a la Compresión del hormigón (R_c -MPa), a partir de la Esclerometría (R); un Esclerómetro digital, marca Silver Schmidt PC tipo N de fabricación Suiza fue utilizado (Troconis, et al, 1997). Aquí también, seis valores en la misma columna seleccionada para cada una de las ocho estructuras fueron obtenidos, para una data total de $n = 48$. Debido a que las 6 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 Resistividad Aparente, 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, piedras abrasivas, humedades e incrustaciones. Posteriormente, fue seleccionada entonces, una cuadrícula de área 100 cm² 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 Resistividad Aparente.

Para la obtención de los seis valores de Resistencia a la Compresión, fue necesario hacer uso del gráfico que correlaciona los valores de Esclerometría (R) con la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa). El gráfico fue proporcionado por los fabricantes del 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°.

Intensidad de corriente de corrosión

El cálculo de los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c -μA/cm²) fue realizado a partir de los 48 valores de Resistividad Aparente (ρ -Ω/cm) obtenidos (seis en cada columna), haciendo uso del criterio establecido también por el Comité Técnico de RILEM (Andrade et al, 2004):

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

Intervalos de clasificación de I_c establecidos en dicho comité permiten definir el nivel de afectación por corrosión atmosférica (Tabla 2), así como una medida de la pérdida de espesor en los aceros de refuerzo (V_c -mm/años).

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 -μA/cm ²)	Pérdida de espesor (V_c -mm/años)	Nivel de Corrosión Atmosférica
≤ 0,1	≤ 0,001	Insignificante
0,1-0,5	0,001-0,005	Bajo
0,5-1	0,005-0,010	Moderado
>1	> 0,010	Elevado

Análisis estadístico

Para la ejecución del análisis estadístico fueron usados los softwares Statgraphic 19-Centurion, 2009 y Origin 6.1. Regresiones lineales (3) y exponenciales (4) crecientes a partir de los modelos estadísticos correspondientes fueron ajustadas tomando como variable dependiente la Resistividad Aparente (ρ -kΩ/cm) y como variable independiente la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa):

$$\rho = \pm a + b(Rc) \quad (3)$$

$$\rho = ce^{Rc/t} \quad (4)$$

Dos ajustes fueron realizados para cada regresión y data de $n = 24$ valores debido a las mediciones de 48 valores de cada parámetro.

Por otra parte, regresiones lineales múltiples fueron ajustadas a partir del modelo estadístico correspondiente (5). La Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$) fue tomada como la variable dependiente. Las variables independientes fueron la Resistividad Aparente (ρ - $k\Omega/cm$) y la Resistencia a la Compresión (Rc - Mpa) estimada a partir de la Esclerometría (R):

$$I_c = \pm d \pm e(\rho) \pm f(Rc) \quad (5)$$

Dos regresiones múltiples fueron ajustadas para cada data de $n = 24$ valores, más la regresión total que comprendió la data total de $n = 48$ valores. De esta forma, tres modelos estadísticos fueron obtenidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento entre la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión

Es de notar, el comportamiento de los seis valores de Resistividad Aparente y de Resistencia a la Compresión en cada columna seleccionada en las ocho estructuras (Figura. 1).

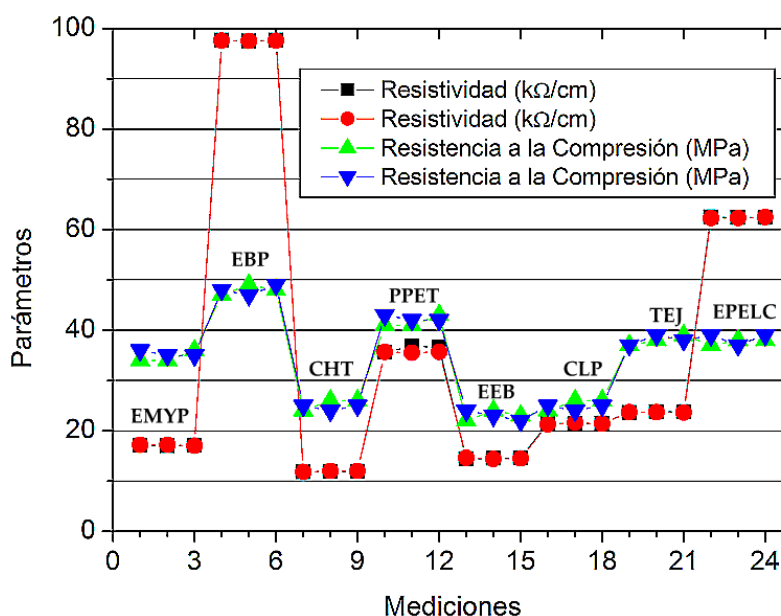


Fig.1. Comportamiento de los seis valores de Resistividad Aparente y de Resistencia a la Compresión para cada columna en las ocho estructuras.

Sin embargo, se observa que no hubo una dependencia lineal, es decir, un aumento o una disminución de los valores de ambos parámetros en función de la ubicación de las estructuras y la distancia desde la línea costera. Para valores mayores de Resistividad Aparente, valores mayores de Resistencia a la Compresión fueron obtenidos y viceversa. Se trata de una relación ordinal entre ambos parámetros medidos en la columna seleccionada en las ocho estructuras (Figura. 1).

Es de apreciar, además, como las seis mediciones para ambos parámetros usados en el estudio en cada columna de las ocho estructuras no presentaron variación ninguna. Esto permite comprobar el nivel elevado de precisión en las mediciones (Figura. 1). De esta forma, a partir de los valores promedios calculados, se puede valorar la clasificación de la Resistividad Aparente, como una medida del riesgo de corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. De acuerdo con la clasificación y teniendo en cuenta los rangos establecidos por el Comité Técnico de RILEM, al parecer fueron usados hormigones de diferentes calidades a la hora de proceder con la construcción de las ocho estructuras (Tabla 3). Solamente dos estructuras, el Edificio Banco Pichincha (EBP) construida en el año 1970 y el Estribo Paso Elevado-La Cultura (EPELC) en el año 2017 mucho más reciente, mostraron un riesgo bajo por corrosión atmosférica en las columnas donde fueron realizadas las mediciones (Tabla. 3).

Tabla 3. Clasificación de la Resistividad Aparente como una medida del riesgo de corrosión atmosférica para cada estructura. Se observan los rangos de clasificación exigidos en RILEM

Estructuras	Distancias (m)	ρ ($k\Omega/cm$)	Riesgo de Corrosión
EMYC	0	17.1	Moderado $\rho = [10-50]$
EBP	200	97.5	Bajo $\rho = [50-100]$
CHT	450	11.9	
PPET		35.6	
	640		
EEB		14.5	Moderado $\rho = [10-50]$
CLP	1260	21.4	
TEJ	1550	23.8	
EPELC	2510	62.3	Bajo $\rho = [50-100]$

Llama la atención, que una estructura fue construida a 200 m desde la línea costera (EPB) y la otra a 2510 m (EPELC). Prácticamente en los extremos de la zona costera de estudio seleccionada. Se confirma, que cuando el hormigón presenta una calidad elevada en cuanto a su relación agua/cemento adecuada y se tienen en cuenta las buenas prácticas de tecnologías del hormigón a pie de obra (traslado, colocación, vibrado, compactación y curado), se garantizan plazos elevados de tiempo vida útil de proyecto en las estructuras en zonas costeras de elevado potencial constructivo sometidas al impacto severo del ambiente agresivo costero de la atmósfera, independientemente del año de construcción. Más, en las estructuras construidas a cortas distancias desde la línea costera con el predominio de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera. El resto de las estructuras independientemente del año de construcción y su emplazamiento en la zona de estudio, mostraron un riesgo moderado (Tabla. 3).

Como bien se conoce, la Resistividad Aparente contrario a la conductividad, describe el grado de saturación de agua y su conductividad en los diferentes tipos de poros en el hormigón como son los capilares interconectados con la condición de exposición al exterior a la atmósfera donde existe el agua capilar, además de los poros aislados, de compactación, de aire y de gel. En este último bajo la presencia del agua de gel (Fiallos, et al, 2024; Solorzano, et al, 2024). La disminución de la Resistividad Aparente pudiera estar influenciada, además, por la penetración de las sales de iones cloruro en forma de disolución salina desde el exterior en estructuras emplazadas en zonas costeras identificadas como de elevado potencial constructivo. Principalmente, en hormigones con valores elevados de porcentaje de porosidad capilar efectivo o, incorporadas las sales generalmente en el árido fino o agua de amasado.

El comportamiento ordinal demostrado entre la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión para cada estructura (Figura 1), facilitó el ajuste de los modelos estadísticos a partir de las regresiones lineal (3) y exponencial creciente (4). Es de notar, la buena calidad que presentaron los ajustes, según los valores de los indicadores estadísticos (R^2 , r y p) en cada modelo para las datas de $n = 24$ valores (Figura 2).

De esta forma, se demuestra la influencia de la Resistencia a la Compresión estimada a partir de la Esclerometría en la Resistividad Aparente en las mediciones de las columnas para cada estructura de hormigón armado seleccionadas en una zona costera de Manta Manabí, Ecuador (Figura 2).

En el caso de los ajustes del modelo matemático basado en una función exponencial creciente (4), los valores

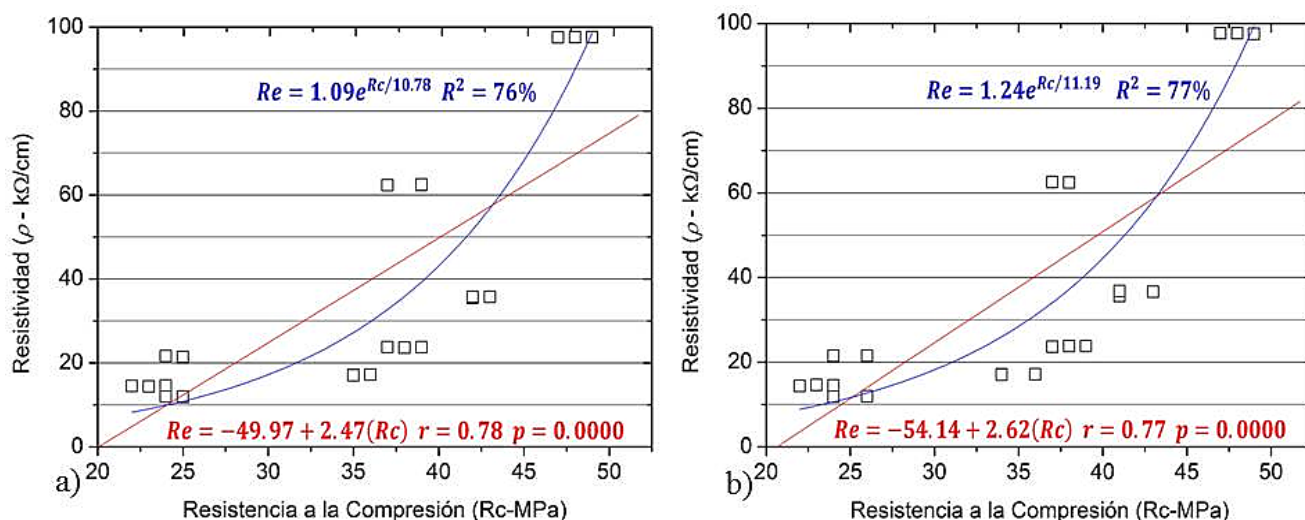


Fig. 2. Ajuste de los modelos estadísticos basados en las funciones lineal y exponencial creciente.

del exponente t ($t = 10.78$ y $t = 11.19$) resultaron menores que el valor más pequeño de Resistencia a la Compresión (Figura 2 a) y b). También, valores de Resistividad Aparente promedio ρ_0 en los modelos no fueron obtenidos (6):

$$\rho = \rho_0 + ce^{Rc/t} \quad (6)$$

El hecho de que no haya aparecido un valor de ρ_0 en cada modelo ajustado, significa que no hubo un valor constante promedio de Resistividad Aparente que representara asíntotas horizontales en los gráficos en función de la ubicación de las estructuras en la zona de estudio. Esto significa desde el punto de vista estadístico para ambos casos ($n = 24$), que, desde un primer momento, la Resistividad Aparente comenzó a incrementarse en función del incremento de los valores de Resistencia a la Compresión como bien se observa (Figura. 2).

A pesar del buen ajuste de los modelos estadísticos (Figura. 2). Es válido destacar, que el frente de carbonatación no fue demostrado en el estudio. Es muy probable que las estructuras estén carbonatadas, fundamentalmente las construidas antes del año a 2017. El efecto de la carbonatación impacta directamente sobre la Esclerometría (R) por endurecimiento superficial del hormigón. Esto trae como resultado, valores erróneos y dudosos de Esclerometría y por tanto de la Resistencia a la Compresión. Es por eso, que no se recomienda la Esclerometría para obras carbonatadas, y solo en hormigones endurecidos en edades entre 28-56 días. No obstante, un estudio ejecutado en una estructura emplazada en una zona costera de Cuba de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera con una atmósfera clasificada como costera-industrial, demostró la no influencia de la carbonatación en la despacivación del acero de refuerzo. Valores de contantes de carbonatación (k en mm/años^{0.5}) resultaron menores que seis (1.29 mm/años^{0.5} y 3.15 mm/años^{0.5}) siendo indicativo de un hormigón de muy buena calidad (Carvajal, et al, 2011).

Factores influyentes en la Resistividad Aparente dependientes de la calidad del hormigón y la condición de exposición en las estructuras han sido demostrados últimamente (Tibbetts, et al, 2020). Sin embargo, la influencia de la Resistencia a la Compresión, obtenida o no de la Esclerometría, y otros parámetros a medir en el hormigón en el momento de ejecutar los estudios de diagnóstico a partir de ajustes de modelos estadísticos, no fue tomada en cuenta en los estudios referenciados ejecutados en Brasil, Perú, Chile, China, y Cuba. No obstante, en otro estudio ejecutado en Cuba, se analizaron los resultados obtenidos basados en la estimación de la Resistencia a la Compresión a partir de la ejecución de ensayos no destructivos como fueron el Índice Esclerométrico y la Velocidad del Pulso Ultrasónico en nueve columnas de hormigón armado. La estimación se

realizó aplicando diferentes modelos *SonReb* de regresiones múltiples lineales, polinomiales y de potencias. El objetivo del estudio consistió en evaluar cuál de los modelos aplicados resultó más consistente con el valor de Resistencia a la Compresión de 27.0 MPa obtenido por ensayo de rotura en prensa, para hormigones fabricados con Cementos Portland Ordinarios P-35 (Tipo I) de producción nacional y áridos de las canteras cubanas. Los resultados obtenidos demostraron, que los modelos *SonReb* propuestos por RILEM-1993 (Regresión Múltiple de Potencia) y Tanigawa-2011 (Regresión Múltiple Lineal), mostraron resultados más próximos al valor de referencia, con un error inferior al 4%. Esta investigación, permitió la realización de dichos ensayos no destructivos, con resultados más ciertos, a la hora de estimar la Resistencia a la Compresión en los procesos de restauración de las estructuras de hormigón armado emplazadas en el Centro Histórico de La Habana, Cuba (Hernández y Cuetara, 2022).

Otros estudios ejecutados en Latinoamérica, han demostrado factores influyentes en la Resistividad Aparente como la temperatura, pero bajo condiciones de laboratorio en testigos cilíndricos ya sea tomado de las estructuras de hormigón armado, o expuestos bajo la condición de exposición al exterior en zonas costeras de elevado potencial constructivo como en Ecuador (Chiradia; et al, 2023; Pérez, *et al*, 2024).

Comportamiento entre la Intensidad de Corriente de Corrosión, la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión

De acuerdo con el comportamiento de la Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), se observa que las dos estructuras que presentaron un riesgo bajo por corrosión atmosférica fueron EBP y EPELC según lo valores de Resistividad Aparente y teniendo en cuenta los de Resistencia a la Compresión. Los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión para ambas estructuras se ubicaron en el rango de clasificación $[0.1-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2]$. Según los rangos de clasificación mostrados (Tabla. 2) es indicativo de un nivel bajo de afectación por corrosión atmosférica y pérdida de espesor en los aceros de refuerzo (Figura. 3). De esta forma, se permite estimar que ambas estructuras pudieran estar en su tiempo de vida útil de proyecto, es decir, que han mantenido sus condiciones iniciales como son estética, funcionalidad y seguridad, frente el impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera en la zona de estudio. No obstante, para ese mismo intervalo de Intensidad de Corriente de Corrosión $[0.1-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2]$, la RED TEMÁTICA DE XV.B DURABILIDAD DE LA ARMADURA establece un riesgo moderado de afectación por corrosión atmosférica. Lo único que la determinación de la I_c se basa a partir del método de Stern Geary usando la Resistencia a la Polarización y no la Resistividad Aparente (Troconis, et al, 1997).

Para el resto de las estructuras, que mostraron un riesgo moderado por corrosión atmosférica a partir de los valores de Resistividad Aparente. Solo una estructura (PPET) de las estudiadas en la zona costera de Manta, Manabí Ecuador, los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión cayeron en el intervalo de clasificación $[0.5-1 \mu\text{A}/\text{cm}^2]$ que indica un nivel moderado de corrosión atmosférica y pérdida de espesor en los aceros de refuerzo (Figura. 3). Es proclive, que esta estructura esté en su tiempo de vida útil diseño. Tiempo en el que deben ejecutarse los trabajos de mantenimiento y no los costosos de reparación. Aquí la Red mencionada anteriormente, indica para ese mismo intervalo, un riesgo elevado por corrosión atmosférica.

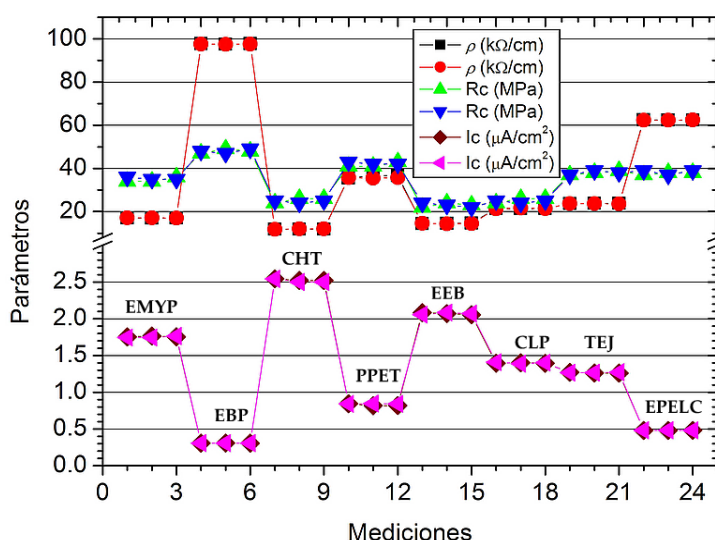


Fig. 3. Comportamiento de la Intensidad de Corriente de Corrosión, la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión.

La definición de los sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos, a aplicar en las estructuras de hormigón armado y las construidas con otros materiales muy usados en la industria de la construcción, sometidas a un impacto severo del ambiente agresivo costero de la atmósfera durante la ejecución de los trabajos de mantenimiento y reparación, con el fin de devolverle sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto, así como en las que se pretenden construir para mantener dichas condiciones en el tiempo, son reportados en la literatura de la especialidad (Castañeda, et al, 2012).

Las otras cinco estructuras (EMYP, CHT, EEB, CLP y TEJ), los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión resultaron mayores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, siendo índice de un nivel de corrosión atmosférica y pérdida de espesor elevados (Figura. 3). De esta forma, a partir de las mediciones en las columnas, las estructuras pudieran encontrarse en su tiempo de vida útil última o residual.

Por otra parte, este resultado permite fortalecer, que, para un riesgo moderado por corrosión atmosférica según los valores de Resistividad Aparente obtenido en las columnas de las estructuras, es posible la obtención de niveles de corrosión atmosférica y pérdida de espesor en los aceros de refuerzo elevados y en algún caso moderado. De manera general se demuestra, que la Resistividad Aparente, como uno de los siete ensayos a usar en el hormigón a la hora de ejecutar estudios de diagnóstico en las estructuras es un parámetro necesario y suficiente. No obstante, es necesario obtener siempre los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión a partir del criterio establecido en el Comité Técnico de RILEM (Tabla. 2) o por el método tradicional basado en la determinación de la Resistencia a la Polarización (Stern Geary) haciendo uso de los equipos de medición GECOR de fabricación española. Este muy usado en estudios de diagnóstico a pie de obra y en probetas de hormigón armado bajo condiciones de laboratorio expuestas al impacto severo del ambiente agresivo costero de la atmósfera (Fernández, et al, 2005).

Parte de este resultado, puede ser confirmado con la observación visual en la columna de una de las estructuras seleccionadas, que presentó un nivel elevado de afectación por corrosión atmosférica de acuerdo con los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (Figura. 3). Se trató del Edificio el Bigote (EEB). Se aprecia, como la estructura pudiera encontrarse en su tiempo de vida útil última o residual debido a las severas afectaciones producidas por el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo (Figura 4).

Se confirma a partir de la observación visual, como las afectaciones por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo ocurren en las zonas más bajas de la columna en la estructura (Figura 4). Típico en zonas costeras de elevado potencial constructivo donde predominan categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera. Esto se debe, a que las partículas salinas de mayor peso y tamaño formadas en las zonas del rompiente de las olas, son depositadas en las zonas más bajas de las estructuras. Más, si las mismas son emplazadas a cortas distancias desde la línea costera (Castañeda, et al, 2018). Esta estructura (EEB) se encuentra emplazada a 640 m de la línea costera, es decir a menos de 1 km.



Fig. 4. Afectaciones por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo en la columna de la estructura EEB

Recientemente, un estudio de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera para el acero al carbono fue ejecutado en el Cantón de Manta, Manabí (Guerra, et al, 2023). De acuerdo con los valores promedios de velocidad de corrosión anual ($V_c\text{-g}/\text{m}^2$) en las tres probetas de acero al carbono, colocadas durante el año de estudio en cada sitio de exposición bajo la condición de exposición al exterior a diferentes distancias desde la línea costera. La categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera extrema ($CX = 1500 < V_c < 5500$) fue determinada para el acero al carbono en el sitio de exposición colocado en la misma zona del rompiente de las olas (0 distancia), donde mismo se encuentra emplazada la estructura Edificio Manta Yacht Club (Tabla. 1). Entre una distancia de 40 m hasta 803 m, la categoría obtenida fue elevada ($C4 = 400 < V_c < 650$). Desde una distancia de 1 425 m hasta 2001 m media ($C3 = 200 < V_c < 400$). De esta forma se demuestra, que es proclive el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado a partir de afectaciones por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. Más en las construidas con hormigones de calidad moderada y de durabilidad inadecuada. La agresividad corrosiva de la atmósfera clasificada como media ($C3$) puede considerarse también como muy peligrosa para las estructuras de hormigón armado y las construidas con otros materiales metálicos muy usados en la industria de la construcción.

Relación estadística entre la Intensidad de Corriente de Corrosión, la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión

Por último, al hacer uso del ajuste del modelo matemático (5) basado en la regresión lineal múltiple para cada data experimental obtenida ($n = 24$) y la total ($n = 48$). Se permite confirmar la influencia de los parámetros de Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión, estimada a partir de la Esclerometría, en la Intensidad de Corriente de Corrosión en la columna seleccionada en las ocho estructuras. Puesto que el valor de p resultó muy inferior a 0.05. Existe una buena relación estadísticamente significativa entre los parámetros para un nivel de confianza de 95%. Además, los valores de R^2 reflejan la calidad elevada de los modelos ajustados (7), (8) y (9):

$$Ic_1 = 3.76 - 0.004(\rho) - 0.06(Rc) \quad n = 24 \quad R^2 = 71\% \quad p = 0,0000 \quad (7)$$

$$Ic_2 = 3.62 - 0.013(\rho) - 0.03(Rc) \quad n = 24 \quad R^2 = 78\% \quad p = 0,0000 \quad (8)$$

$$Ic_t = 3.52 - 0.006(\rho) - 0.05(Rc) \quad n = 48 \quad R^2 = 74\% \quad p = 0,0000 \quad (9)$$

El buen ajuste de los modelos demuestra, como una disminución de la Resistividad Aparente (ρ) y la Resistencia a la Compresión (Rc), incrementa la Intensidad de Corriente de Corrosión (Ic_1, Ic_2, Ic_t). O lo que es lo mismo, incrementa las afectaciones producidas por la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo en las columnas seleccionadas en las estructuras de hormigón armado emplazadas en la zona costera de estudio en Manta, Manabí Ecuador. Por tanto, es de suma importancia, fijar los valores de Resistividad Aparente y Resistencia a la Compresión, que permitan y garanticen mantener en el tiempo las condiciones iniciales de vida útil de proyecto en las estructuras que se pretenden construir. Aspecto que no es muy tenido en cuenta en la fase de diseño constructivo de las estructuras, principalmente en zonas costeras de elevado potencial constructivo no solo en Ecuador, sino a nivel mundial. Valores bajo de Resistividad Aparente principalmente en edades tempranas de fraguado o en hormigón endurecido, propician hormigones muy durables de buena calidad y compacidad, es decir, de muy bajo porcentaje de porosidad capilar efectivo.

El ajuste de los modelos de regresiones lineales múltiples permite demostrar, además, que el uso de la Resistividad Aparente y la Resistencia a la Compresión, resultan en parámetros de medición en el hormigón necesarios y suficientes para la ejecución de estudios de diagnóstico en la zona costera de Manta, Manabí Ecuador. Experiencias basadas en demostrar la influencia de estos parámetros de medición en el hormigón en la Intensidad de Corriente de Corrosión en el hormigón armado a la hora de realizar un estudio de diagnóstico haciendo uso del ajuste de regresiones lineales múltiples u otros modelos estadísticos, no fueron encontradas en los estudios de diagnóstico ejecutados en Brasil, Perú, Chile, China, y Cuba.

CONCLUSIONES

Un estudio sobre el análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado sometidas al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, fue ejecutado en una zona costera de Manta, Manabí Ecuador. Se demostró, que a partir de mediciones de Resistividad Aparente que permitieron la obtención de valores de Intensidad de Corriente de Corrosión, teniendo en cuenta la Resistencia a la Compresión, estimada a partir de la Esclerometría, en elementos constructivos como columnas, fue posible estimar el tiempo de vida útil que pudieran presentar las ocho estructuras seleccionadas, emplazadas a diferentes distancias en la línea costera en la zona de estudio. De las ocho estructuras seleccionadas, cinco se

encuentran en sus tiempos de vida útil última o residual, una en su tiempo de vida útil de diseño. Solamente dos, pudieran encontrarse en su tiempo de vida útil de diseño manteniendo sus condiciones iniciales de estética, funcionalidad y seguridad. Experiencia que puede ser adquirida en todo el litoral costero del Ecuador. El buen ajuste de modelos estadísticos basados en regresiones lineales y exponenciales crecientes, así como regresiones lineales múltiples, permitieron demostrar la influencia de la Resistencia a la Compresión en la Resistividad Aparente y la influencia de ambos parámetros en la Intensidad de Corriente de Corrosión respectivamente. Se confirmó, que la Resistividad Aparente, además de definir el riesgo por corrosión en elementos constructivos, es un parámetro necesario y suficiente para ser usado en los estudios de diagnóstico.

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.
- Hernández-Castañeda, O., Mendoza-Escobedo, C, J., Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico. Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología. Enero-Marzo. Año 2006. México.
- Guerra-Mera, J. C., Puig-Martínez, R., Castañeda-Valdés, A., & Baque-Camposano, B. P.; Estado del arte sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en perfiles costeros. REVISTA CIENTÍFICA INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Innovación. Vol.6, No. 11. Edición Enero-Junio. Año 2023.
- Castañeda, A; Rodríguez, M.; Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Resultados preliminares. REVISTA CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICAS, Vol. 45, No. 1, pp. 52-59. LA HABANA, CUBA, 2014.
- Castañeda, Valdés, Abel; Marrero, Águila, Rigoberto; Valdés, Clemente, Cecilia; Howland, Albear, Juan José.; Aporte económico en estudios de corrosión atmosférica y deterioro de materiales en zonas estratégicas del clima tropical costero de Cuba. Revista Tecnología Química, Vol. 40, N° 1. ISSN 2224 6185. Año 2020.
- Castañeda, Abel; Qili. Research Project proposal: Impact of the aggressive coastal environment of cuba's atmosphere on the durability of construction-manufacturing materials from China.. Revista CENIC, Ciencias Químicas. Rev. CENIC Cienc. Quím. Vol. 54. (publicación continua): 096-108. Año. 2022.
- 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.
- Castañeda, Valdés; Abel. Corvo, Francisco; Marrero-Águila, Rigoberto. Fernández-Domínguez, Alejandro. Del Angel-Meraz, Ebelia.; The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. Materials and Structures 56:12. 2023
- 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.
- Silveira da Costa, Vitória, Azevedo, de Azevedo, Ângela.; 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
- Castro, Villareal, Genner; Vazquez, Cerna, Marcos; Galicia, Guarniz, William.; Vida útil en estructuras de concreto armado desde el punto de vista del comportamiento material. Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras. Vol. 16, 2, pp. 151-17, 2011.
- Ebensperger, M; Olivare, Luis; Mario, O.; In situ measurements of carbonation rate with air permeability for the development of a proposal for a classification of exposure to carbonation. Revista Ingeniería de Construcción. RIC Vol 38, N°3, 2023
- Sifeng, Qin; Huili, Wang; Zhikang, Luo.; Recent hydraulic bridge failures in China: review and discussion. Revista de la Construcción de Chila, 21(2), pp. 193-203, 2022
- Hernández, Alberto.; Impact of environmental pollution in the historical buildings of Havana, Cuba. Effect of future climate change. Revista Ingeniería de Construcción. Vol.33, No.3, pp. 2019-228, 2018
- 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.
- Chiriboga, Cristian; Maldonado, Noboa, Juan.; Influencia de la corrosión en varillas de acero de refuerzo, y sus efectos en la resistencia estructural de edificaciones. Vol.6 No.4. Journal Scientific Investigar ISSN: 2588-0659, pp. 396-419, 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.
- Guerra, Mera, J. C., Howland, Albear, J, J; Castañeda, Valdés, A.; Primeras experiencias en el desempeño por durabilidad de un hormigón antes de usarlo en el perfil costero de Manabí, Ecuador. Revista CENIC Ciencias Químicas, 48(1), 27-40, 2018.
- Patricio, Dueñas-Solórzano, Fabián.; 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.
- 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.
- UNE-EN 12504-2:2022. Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 2: Ensayos no destructivos. Determinación del índice de rebote.
- 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.
- Recep, Tuğrul, Erdem; Koçali, Karal.; Performance evaluation and strengthening of reinforced concrete buildings, Revista de la Construcción, 21(1), pp. 53-68, 2022.
- Andrade, C; Alonso, C; Gulikers, R; Polder, R; Cigna, Ø; Vennesland, 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
- Fiallos, J, A, L., Veliz, M, M, R; Guerra, Mera, J, C.; Incidencia de la relación agua cemento en la resistividad del hormigón. Polo del Conocimiento, 9(2), pp. 710-724, 2024.
- Solorzano, A, D, P., Gutiérrez, A, B, Z; Guerra, Mera, J. C.; Características de dos agregados finos que influyen en la resistividad del hormigón. Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional, 9(1), pp. 1813-1829, 2014.
- 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.
- 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.
- Oroza, A; Cuétara, R.; Evaluation of the compressive strength of a reinforced concrete structure using different SonReb estimation methods. Revista Ingeniería de Construcción RIC, Vol 37 N°2, pp. 260-271, 2022.
- Chiaradia, L, C; Almeida, F, C, R; Aguilar, M, T, P; Figueiredo, E, J, P.; "Influence of temperature on the electrical resistivity of concrete and kinetic corrosion of reinforcement", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 1 – 12, 2024.
- Pérez, Molina, Y, J; Salvador, Arteaga, M, X; Guerra, Mera, J. C.; Índice de durabilidad para hormigones con diferentes relaciones agua – cemento. Dominio De Las Ciencias, 10(2), pp. 906–920, 2024.
- Alejandra, Fiallos-Lezcano, Joselyn; Rodríguez-Veliz, María, Manuela; Guerra-Mera, Juan, Carlos.; Índice de durabilidad para hormigones con diferentes relaciones agua – cemento. Revista Científica Dominio de la Ciencias. Dom. Cien., ISSN: 2477-8818 Vol. 10, núm. 2. Abril-Junio, pp. 906-920, 2024.
- Fernández, A; Molinero, P; Quintero, M; Henríquez, C.; Diagnóstico por corrosión de los balcones de edificio de 24 niveles ubicado en el litoral habanero. Memorias Evento: CONPAT 2005. Asunción Paraguay, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción.
- 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.
- 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 2023.

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Fabián Eudoro Moreira Basurto: Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las estructuras. Curación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición).

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

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