

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

EVALUACIÓN DEL DETERIORO POR CORROSIÓN ATMOSFÉRICA EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EN UNA ZONA COSTERA DE PEDERNALES, MANABÍ ECUADOR

EVALUATION OF ATMOSPHERIC CORROSION DETERIORATION IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN A COASTAL ZONE OF PEDERNALES MANABÍ, ECUADOR

Jhon Navarino Guerrero Zambrano ^{a,*} (0009-0008-9306-6768)

Efren Andrés Mendoza Loo ^a (0009-0008-0641-7159)

Juan Carlos Guerra Mera ^a (0000-0001-6597-0022)

^a Universidad Técnica de Manabí (UTM). Avenida Urbina y Portoviejo 130105, Manabí, Ecuador.

^{a,*} juan.guerra@utm.edu.ec

Recibido: 28 de agosto de 2025;

Aceptado: 7 de octubre de 2025;

RESUMEN

Un estudio, basado en evaluar el deterioro por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado, fue ejecutado en una zona costera del cantón de Pedernales perteneciente a la provincia de Manabí, Ecuador. Para esto, 10 estructuras fueron seleccionadas, emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera. Diferentes ensayos como Resistencia a la Compresión, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Resistividad, Intensidad de Corriente de Corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, la Concentración de iones cloruro totales y solubles, fueron ejecutados en una columna de cada estructura. Los resultados, permitieron demostrar la calidad insuficiente que presentó el hormigón armado usado en la construcción, confirmado con el comportamiento de los valores de la Profundidad y Constante de carbonatación, así como el de las Concentraciones de iones cloruro totales y solubles, en función del incremento de las distancias desde la línea costera donde fueron emplazadas las estructuras. Se definió, que las estructuras se encontraron en su vida útil última o residual debido a los valores muy elevados de Intensidad de Corriente de Corrosión en el acero de refuerzo en el hormigón armado en la columna seleccionada. Por otra parte, los resultados obtenidos de acuerdo con el análisis estadístico comparativo a partir de los dos métodos utilizados en el estudio, confirmaron que la concentración de iones cloruro soluble resultó el factor fundamental en el origen y desarrollo de la corrosión atmosférica, a pesar de que el hormigón usado en la columna presentó un grado elevado de carbonatación. Otros factores en el hormigón influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo de forma sucesiva fueron los valores de la Velocidad de Pulso Ultrasónico, la Resistencia a la Compresión, la Profundidad y Constante de Carbonatación. Además, el ciclo de humectación y secado ocurrido por las concentraciones de iones cloruro, principalmente los solubles en el hormigón de las columnas, resultó otro factor influyente en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en cada una de las estructuras.

Palabras claves: corrosión atmosférica, acero de refuerzo, estructuras, hormigón armado, deterioro.

ABSTRACT

A study about atmospheric corrosion deterioration evaluation in reinforced concrete structures was carried out in a coastal zone of Pedernales Canton, Manabí province, Ecuador. Ten structures were selected, located at different distances from the coastline. Different tests such as Compressive Strength, Ultrasonic Pulse Velocity, Resistivity, Corrosion current intensity as an indicator of atmospheric corrosion in reinforcement steel, as well as the Concentration of total and soluble chloride ions, were performed in one column of each structure. The results demonstrated the reinforced concrete quality insufficient used in the building, confirmed by the behavior of the Depth and Carbonation constant values, as well as the Concentrations of total and soluble chloride ion, as a function of distance from the coastline increase where the structures were located. Due to the very high values of Corrosion Current Intensity in the reinforcement steel in the reinforced concrete in the selected column the structures were found in its final or residual service life. On the other hand, according to the comparative statistical analysis from the two methods used in the study the results obtained confirmed that Concentration of soluble chloride ions was the fundamental factor in the origin and development of atmospheric corrosion, despite the concrete used in the column presented a high degree of carbonation. Other factors in concrete that successively influenced the atmospheric corrosion of reinforcement steel were the values of Ultrasonic Pulse Velocity, Compressive Strength, Depth and Carbonation constant. Furthermore, the wetting and drying cycle caused by chloride ion concentrations, primarily those soluble in the concrete of the columns, was another influential factor in the atmospheric corrosion of the reinforcement steel in each of the structures.

Keywords: atmospheric corrosion, reinforcement steel, structures, reinforced concrete, deterioration.



INTRODUCCIÓN

La corrosión atmosférica es catalogada actualmente como el fenómeno más influyente en el deterioro anticipado en las construcciones (Valerio y Helene, 2025). Más, las ubicadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Particular y especial atención merecen las estructuras de hormigón armado a partir del origen y desarrollo del fenómeno en el acero de refuerzo, no solo en la amplia zona del litoral costero de Manabí Ecuador, sino también a nivel mundial. No deben quedar desapercibidas las estructuras metálicas muy abundantes también en zonas costeras donde se materializan una serie de industrias como refinerías de petróleo, centrales termoeléctricas de conjunto con la infraestructura portuaria muy decisivas en la economía del cualquier país. Además, tecnologías, insumos y equipos existentes en dichas industrias y en otras no están exentos de sufrir el deterioro anticipado y acelerado por corrosión atmosférica. El conocimiento a partir de la selección adecuada de los sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimientos en estas últimas, así como en las de hormigón armado continúa siendo escaso, a pesar de las disímiles investigaciones ejecutadas principalmente en la región de América Latina donde se excluyen las zonas costeras del Ecuador (Trocónis, et al, 2006 y 2007, Chico et al, 2017). Dichos sea, el hormigón es un sistema de protección contra la corrosión atmosférica a partir de dos aspectos fundamentales (Castro, 1998). El primero como una barrera física de sistema primario de recubrimiento que separa al acero de refuerzo del impacto del ambiente agresivo costero, industrial y urbano combinándose los mismos en ocasiones para ocasionar el deterioro anticipado por corrosión atmosférica. El segundo, producto de la reserva alcalina del hormigón que se produce durante su proceso de elaboración la cual proporciona la formación de la capa pasiva al acero de refuerzo embebido siendo muy protectora, siempre y cuando las construcciones estén en un ambiente no muy agresivo como el rural. No sucediendo así en zonas costeras de elevado potencial constructivo como la tratada en este estudio, donde el deterioro anticipado debido a la corrosión atmosférica no depende totalmente del impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera. Depende también del estricto, adecuado y ausente en ocasiones del control de la calidad del hormigón en sus plantas de fabricación ante de los procesos de construcción de las estructuras. La tecnología del hormigón basada en su transportación, colocación, compactación y curado juega un papel fundamental para evitar la penetración de los agentes agresivos a través de los poros capilares interconectados formados en la matriz del hormigón a pie de obra (Howland, 1995). Se trata de las sales de iones cloruro en formas de disolución salina, procedentes desde el mar y transportadas en el aerosol marino y el CO₂ producto de las actividades industrial y urbana incorporadas al aerosol marino. Plazos elevados de vida útil de proyecto pudieran ser garantizados, es decir, que las estructuras y de manera general las obras mantengan en el tiempo sus condiciones iniciales como son estética, funcionalidad y seguridad, sin llegar a las vidas útiles de, servicio, última y residual (Helene, et al, 1997). La influencia actual del cambio climático basado principalmente en incrementos considerables de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento provocando las fuertes penetraciones del mar e inundaciones, hace que la atmósfera se torne más agresiva para la infraestructura construida (Howland y Castañeda, 2017). De ahí, la necesidad imperiosa de conocer los requerimientos en cuanto al desempeño por durabilidad que debe presentar el hormigón armado antes de proceder con las labores de construcción basado en una serie de variables que constituyen posteriormente parámetros medibles a la hora de ejecutar los estudios de diagnóstico a pie de obra. Se trata de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) obteniendo los valores de forma directa a partir de la toma de testigos cilíndricos de dimensiones estandarizadas como ensayo destructivo, o de forma indirecta haciendo uso de los valores del Índice Esclerométrico. Este último como un ensayo no destructivo. Otros ensayos no destructivos resultan en las determinaciones de la Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU -m/s), la Resistividad eléctrica del hormigón (ρ -k Ω /cm). A partir de los valores convertidos a Ω /cm se puede calcular de manera indirecta de Intensidad de Corrosión (I_c - μ A/cm²) en el acero de refuerzo como otro parámetro importante. Otros parámetros de suma importancia lo constituyen la determinación de la constante de carbonatación (kc -mm/años^{0.5}) precedida de la profundidad de carbonatación (X_c -cm) en el hormigón, así como las determinaciones de las concentraciones de iones cloruro totales y solubles en por ciento en masa de hormigón ($m.h$), ($CClt$ -% $m.h$) y ($CCls$ -% $m.h$) respectivamente (Trocónis, et al, 1997). No debe olvidarse la determinación importante de los valores de Porcentaje de Porosidad Capilar Efectivo (ϵ -%) a pesar de constituir un ensayo destructivo a pie de obra. La tendencia actual se basa en las determinaciones de estas variables o requerimientos para el desempeño adecuado a pie de obra, es decir, cuando las estructuras han alcanzado un deterioro muy anticipado en el tiempo debido a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo llegando a sus vidas útiles última y residual. De esta forma, se está en presencia de un problema social de la ciencia y la tecnología que en ocasiones es muy difícil de solucionar (Marrero, et al, 2020). Por tanto, estos requerimientos y otros como la densidad, el grado de asentamiento, el buen curado teniendo en cuenta además del tipo de cemento, la selección adecuada de los áridos y su granulometría, deben ser determinados durante el proceso de fabricación del hormigón en el estricto control de la calidad dependiendo totalmente de su dosificación antes de la construcción.



El amplio litoral costero del Ecuador específicamente el de la provincia de Manabí presenta un número elevado de estructuras de hormigón armado intensamente deterioradas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo (Guerra, et al, 2016). Varios aspectos son influyentes en esta situación actual existente también en otras zonas costeras de elevado potencial constructivo a nivel mundial (Castañeda, et al, 2023). Estos son, la insuficiente ejecución de los trabajos de mantenimientos a pie de obra cuando las estructuras han alcanzado su vida útil de servicio antes de llegar a los muy costosos de reparación antes de que las estructuras alcancen sus vidas última y residual. La carencia de insumos, materiales, equipamiento y personal calificado dedicado a la ejecución de estos trabajos, principalmente los de mantenimiento. Otro factor influyente se basa en la carencia de conocimientos a partir de estudios de corrosión atmosférica en la zona costera donde se encuentren emplazadas las estructuras. Los resultados obtenidos permitirán la selección adecuada de los materiales de construcción, así como de los sistemas primarios y secundarios de protección a base de recubrimiento. En ocasiones, se procede con las labores de construcción principalmente en zonas costeras de elevado potencial constructivo y no existe en la conciencia del personal dedicado a las labores de construcción sobre el impacto del ambiente agresivo costero a partir de la clasificación de las categorías de la agresividad corrosiva de la atmósfera, así como de los factores influyentes en la corrosión atmosférica principalmente del acero al carbono (Guerra, et al, 2023a). Sin embargo, una serie de estudios con resultados muy interesantes han sido ejecutados en otros cantones costeros de la provincia de Manabí a partir de la segunda quincena de este siglo (Moreira y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024, Rincón, et al, 2025). Requerimientos por durabilidad del hormigón que permitirán garantizar plazos elevados de vida útil de proyecto a las estructuras no solo en la zona de estudio, sino en todo el litoral costero del Ecuador fueron determinados en uno de los estudios realizados (Guerra, 2023b). Por tanto, ya el país cuenta con la solución ingenieril, que permitirá evitar el deterioro anticipado por corrosión atmosférica en las estructuras de hormigón armado que pretenden ser construidas. Como bien se conoce, por sus excepcionales virtudes de resistencia mecánica el acero al carbono, es decir, el de bajo contenido de carbono es el material metálico más usado en la industria de la construcción, así como el más empleado como de refuerzo en el hormigón armado. Evaluar el deterioro por corrosión atmosférica a partir de estudios de diagnóstico en diez estructuras de hormigón armado ubicadas a diferentes distancias desde el mar o más bien de la línea costera o zona del rompiente de las olas en una zona del cantón de Pedernales perteneciente a la provincia de Manabí, Ecuador, es el objetivo general de este trabajo de investigación. Se trata de un cantón costero localizado en el centro norte de la región del litoral del Ecuador en el Océano Pacífico con un clima tropical costero que, además de ser catalogada como de elevado potencial constructivo es muy viable en el desarrollo de la industria del turismo. Otros objetivos específicos se basaron en, definir el tipo de vida útil en las estructuras seleccionadas. Valorar el comportamiento de una serie de parámetros que se tuvieron en cuenta a la hora de ejecutar los estudios de diagnóstico a pie de obra con el fin de demostrar la calidad del hormigón usado en las construcciones. Por último, demostrar los factores influyentes en el deterioro por corrosión atmosférica que presentaron las estructuras seleccionadas en la zona costera de estudio.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección de las estructuras de hormigón armado en la zona costera de estudio

Diez estructuras de hormigón armado fueron seleccionadas en base a criterios como la distancia desde la línea costera donde se encuentran emplazadas y los años de construidas (Tabla 1). Estas se ubican en la zona costera del cantón de Pedernales (Fig. 1).



Fig. 1. Zona costera de estudio del Cantón de Pedernales donde se localizan las 10 estructuras seleccionadas emplazadas a diferentes distancias desde la línea costera.

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

Estructuras (E)	Coordenadas de localización	Distancia desde la línea costera (m)	Años de construida
E1	0°03'53,8"N 80°03'37,5"W	26,53	15
E2	0°05'00,1"N 80°03'12,4"W	81,75	9
E3	0°04'10,3"N 80°03'28,9"W	130,81	20
E4	0°04'18,0"N 80°03'21,0"W	253,02	13
E5	0°03'51,4"N 80°03'26,2"W	386,76	9
E6	0°04'34,8"N 80°02'51,7"W	962,34	12
E7	0°04'21,8"N 80°02'40,5"W	1429,37	2
E8	0°05'13,4"N 80°02'10,8"W	1743,75	6
E9	0°04'26,2"N 80°01'48,7"W	2992,67	4
E10	0°04'42,2"N 80°01'33,2"W	3236,05	1

Ensayos no invasivos y destructivos fueron usados durante la ejecución de los estudios de diagnóstico en cada una de las estructuras. Las determinaciones de los parámetros usados fueron ejecutadas en columnas, específicamente en la zona expuesta de frente totalmente al mar, es decir, al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera teniendo en cuenta la influencia del viento que sopla desde el mar hacia el interior de la tierra. El estudio fue ejecutado entre los meses de mayo y junio del 2025.

Ensayos no destructivos usados en las columnas en cada estructura

Es válido resaltar, que la metodología experimental para la ejecución de los ensayos es muy similar a la usada en otros estudios de diagnóstico que fueron ejecutados recientemente y referenciados anteriormente en estructuras emplazadas en otros cantones costeros en la provincia de Manabí.

Resistividad Eléctrica Aparente

Para la determinación de la Resistividad Eléctrica Aparente (ρ -k Ω /cm), se utilizó el equipo marca GATEC 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 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 Ω) para la determinación de la ρ en k Ω /cm:

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

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 estructurales en cualquier estructura. Las esponjas colocadas en las puntas de los cuatro electrodos en el equipo fueron humedecidas previas a las mediciones, así como la zona de medición. 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 en cuanto a los valores. Seguidamente, en la zona donde se detectaron los aceros de refuerzo, se trazó una línea blanca con una tiza para la no ejecución de las mediciones de ρ (Troconis, et al, 1997) (Fig. 2). Las mediciones fueron ejecutadas a una altura no menor de 3 m en cada columna.



Fig. 2. Medición de la ρ en una en la columna de las estructuras seleccionadas.

Se obtuvieron 13 valores por cada estructura (12 valores, más el valor promedio), los cuales fueron graficados y 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).

Resistencia a la compresión estimada a partir de la Esclerometría

Para la estimación de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) en las mismas columnas a partir de la Esclerometría; un Esclerómetro digital, marca Silver Schmidt PC tipo N de Suiza fue utilizado (Troconis, et al, 1997). Aquí 11 valores (10 valores, más el valor promedio) fueron obtenidos en la misma columna y graficados. Debido a que las 10 mediciones en cada columna fueron ejecutadas a tiempos diferentes para cada estructura, fue necesaria la previa calibración del equipo. Para eso, un yunque tarado de 16 kg fue empleado. 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 cm² en cada columna (Fig. 3). 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 .



Fig. 3. Ejemplos de cómo fueron ejecutados los ensayos de Esclerometría en las columnas de las 10 estructuras.

Para la obtención de los 10 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, es decir, perpendicular a las columnas (Fig. 3). Por tanto, el ángulo de inclinación para la obtención de los valores de R_c en el gráfico fue de 0° .

Velocidad de pulso ultrasónico

La medición de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPS -m/s) fue ejecutada a partir del método directo, es decir, colocando el transductor emisor y el transductor receptor por las caras opuestas de la columna en cada una de las estructuras (Figura 4) (Troconis, et al, 1997). Es evidente la no presencia de aceros de refuerzo al igual que en las mediciones de R_c y ρ .



Fig. 4. Ejemplo de medición de la VPS en una de las columnas.

El ensayo consiste en medir el tiempo (en μs convertido a s) fijado en la pantalla del equipo que tarda la onda ultrasónica (frecuencia 50 kHz) en recorrer la distancia fijada entre los transductores. En este caso 20 cm (0,2 m) entre las caras laterales de la columna para las estructuras E-1, 2, 3, 5, 8 y 9. Para las estructuras E-4, 7 y 10 cm (0,1 m); 22 cm (0,22 m), 25 cm (0,25 m) y 30 cm (0,3 m) respectivamente. Los valores de distancia tienen que ser convertidos a metros. Primeramente, se verificó que las caras opuestas estuvieran lo suficientemente lisas, así como la aplicación de una grasa (vaselina) de mínimo espesor con el fin de posibilitar un buen acoplamiento y transmisión de la onda entre los transductores. De esta forma, tres valores de VPU -m/s fueron obtenidos en la columna en cada una de las estructuras los cuales fueron graficados y clasificados según los intervalos de clasificación exigidos (Troconis, et al, 1997). Los valores promedios de las tres mediciones fueron calculados.

Un equipo Marca MATEST- de fabricación italiana - MODELO: C369N. Rango de medición del tiempo de 0 a 3000 μs , de precisión $\pm 0,1 \mu s$ con una selección de la amplitud del impulso ultrasónico ajustable desde 250 hasta 1000 V fue utilizado en las mediciones. Aquí también, fue necesario proceder con la calibración antes de la ejecución de las mediciones a partir de las barras de referencias de hormigón. En estas barras, el recorrido de la onda ultrasónica tiene un tiempo estándar al colocarle los transductores por el método directo.

Intensidad de corriente de corrosión

El cálculo de los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$) como un indicador indirecto de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, fue realizado a partir de los 13 valores de Resistividad Eléctrica Aparente (en ρ - Ω/cm) obtenidos para cada columna, graficados también. Para esto, fue usado el criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM (Andrade et al, 2004):

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

Intervalos de clasificación de I_c establecidos en dicho comité permitió con más profundidad la evaluación del deterioro por corrosión atmosférica en las 10 estructuras de hormigón armado seleccionada en la zona de estudio (Tabla 2), así como una medida indirecta 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 - $\mu A/cm^2$)	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

Ensayos destructivos usados en cada una de las estructuras seleccionadas

Determinación de la concentración de iones cloruro totales y solubles

Para la determinación de la concentración de $CClt$ y $CCls$ en % $m. h$, trozos de hormigón fueron extraídos en cada una de las columnas en la misma zona donde se procedió con las mediciones de Esclerometría, R_c y ρ . Para esto, el uso de un cincel y un mazo (mandarria) fueron necesarios. Los 10 trozos obtenidos fueron almacenados en bolsitas de nylon e identificados para su traslado hacia el laboratorio. Seguidamente, en las zonas de pasta de hormigón endurecida, los mismos fueron triturados de forma manual hasta convertirlos en un polvo muy fino como si fueran extraídos haciendo uso de un taladro eléctrico. Una muestra de 30 g de polvo por cada trozo fue obtenida. De esta, 15 g fueron usados para las determinaciones de tres valores de $CClt$ y $CCls$ en % $m. h$ respectivamente en cada estructura (5 g para cada determinación). Los valores determinados para cada concentración fueron graficados. Posteriormente, los valores promedios de cada concentración fueron graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera donde están emplazadas las estructuras.

Cabe resaltar, que para las determinaciones de $CClt$ y $CCls$ en % $m. h$ tres métodos de extracción de muestras de polvo son establecidos. Los mismo son, haciendo uso de un taladro manual o de banco a pie de obra o en probetas extraídas. De las probetas cilíndricas extraídas las mismas pueden ser cortadas en rebanadas las cuales las zonas de la pasta de hormigón endurecida son trituradas y precisamente el usado en este estudio (Troconis, et al, 1997). Las determinaciones de los tres valores de $CClt$ y $CCls$ en % $m. h$ en cada muestra de 5 g de polvo, 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).

Determinación de la profundidad y constante de carbonatación

Para la determinación de la profundidad de carbonatación (X_c -cm), fue necesario realizar seis perforaciones en cada una de las columnas también en las zonas donde fueron ejecutadas las mediciones de R_c y ρ , haciendo uso también del cincel y mazo (mandarria), hasta llegar al acero de refuerzo. Rápidamente, en las zonas perforadas expuestas el medio agresivo en cada columna, una disolución de fenolftaleína al 1% antes de un tiempo muy inferior a los 15 minutos fue aplicada (Figura 5 a). Primeramente, las zonas fueron limpiadas con una brochita para librarlas del polvo u otras partículas. Las mediciones de X_c -cm fueron ejecutadas desde la superficie hasta donde el indicador mostró la coloración lila rosada, indicando la no existencia del fenómeno de la carbonatación debido a la presencia de un pH alcalino en la solución presente en los poros del hormigón. Para las mediciones, un pie de rey digital de elevada precisión y exactitud fue utilizado (Fig. 5 b).

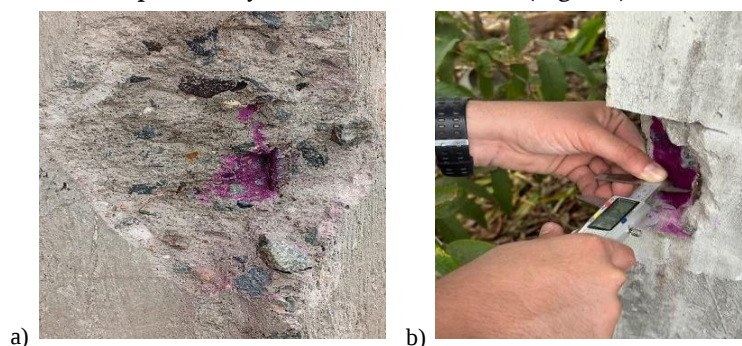


Fig. 5. Ejemplo de la profundidad de carbonatación en una de las estructuras a), y su medición b).

De esta forma, seis valores de $Xc\text{-cm}$ fueron determinados los cuales sirvieron para el cálculo de los valores de la constante de carbonatación ($kc\text{-mm/años}^{0.5}$) teniendo en cuenta el año de construcción de cada estructura ($t\text{-año}$) a partir de la expresión:

$$Xc = k_c t^{0.5} \quad (3)$$

Los seis valores de $Xc\text{-cm}$ y $kc\text{-mm/años}^{0.5}$ fueron graficados en función del incremento de la distancia desde la línea costera donde se encuentran emplazadas cada una de las estructuras. Los valores de la k_c sirvieron para la clasificación en cuanto a la evaluación preliminar de la calidad del hormigón como un indicador de la durabilidad de las columnas en cada una de las estructuras seleccionadas (Castro, *et al*, 2000) (Tabla 3).

Tabla 3. Rangos de k_c que pueden ser usados en la evaluación de la calidad del hormigón.

Constante ($\text{mm/año}^{1/2}$)	Hormigón de baja calidad	Hormigón de moderada calidad	Hormigón de buena calidad
k_c	> 9	$9 > k_c > 6$	< 6

Análisis estadístico

Para la ejecución del análisis estadístico y la elaboración de los gráficos, los softwares Statgraphic 19-Centurion, 2009 y Origin 6.1, 2006 fueron usados respectivamente. A partir del ajuste de una regresión lineal múltiple, factores más influyentes en la $Ic\text{-}\mu\text{A/cm}^2$ como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo fueron demostrados:

$$Ic = a - b[VPU] + c[CCL_s] \quad (4)$$

Otro método estadístico usado para la demostración de los factores más influyentes fue el análisis multivariado. Para la aplicación de ambos métodos, la variable dependiente fue la $Ic\text{-}\mu\text{A/cm}^2$ partir de los 10 valores promedios y las independientes resultaron los 10 valores promedios de $Rc\text{-MPa}$, $VPU\text{-m/s}$, $kc\text{-mm/años}^{0.5}$, $Xc\text{-cm}$, $CCLt\text{-}\% m. h$ y $CCLs\text{-}\% m. h$ determinados para cada estructura.

Por otra parte, para una mejor interpretación de los resultados, modelos estadísticos basados en funciones exponenciales decrecientes fueron ajustados en el comportamiento de la $Xc\text{-cm}$ y la $kc\text{-mm/años}^{0.5}$ a diferentes distancias desde la línea costera:

$$Xc = X_{c_0} + Ae^{-x/t} \quad (5)$$

$$k_c = k_{c_0} + Ae^{-x/t} \quad (6)$$

Lo mismo sucedió para el comportamiento de las $CCLt\text{-}\% m. h$ y $CCLs\text{-}\% m. h$ también en función del incremento de la distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas:

$$CCL_t = CCL_{t_0} + Ae^{-x/t} \quad (7)$$

$$CCL_s = CCL_{s_0} + Ae^{-x/t} \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del comportamiento de la R_c -MPa

De acuerdo con el comportamiento de este parámetro importante en la durabilidad del hormigón y la posterior vida útil de las estructuras, es de notar como valores mayores que 30 MPa fueron obtenidos solamente para la estructura E6 y algunos en la E4 (Fig. 6).

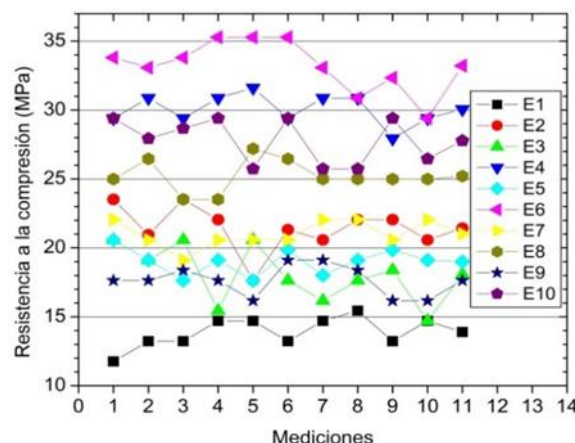


Fig. 6. Comportamiento de la R_c en cada una de las estructuras.

Incluso, tres por encima de 35 MPa en esta última. Todo parece indicar, que se pudiera tratar de las estructuras donde el hormigón usado en su construcción presentó una mejor calidad en comparación con las restantes.

De acuerdo con los estudios de diagnóstico ejecutados recientemente en estructuras emplazadas en otras zonas costeras de la provincia de Manabí, se trata de los valores más elevados de R_c que se han obtenido hasta el momento. Experiencias anteriores en estos tipos de estudios no fueron encontradas en otras zonas costeras del Ecuador. Un indicador más del deterioro anticipado que vienen presentando las estructuras de hormigón armado. Por otra parte, diferentes investigaciones ejecutadas en este siglo XXI basadas en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón en zonas costeras de elevado potencial constructivo, han demostrado la necesidad de elaborar un hormigón donde la R_c tiene que ser superior a 35 MPa. Plazos elevados de vida útil de proyecto son garantizados para las estructuras de hormigón armado que pretenden ser construidas. Se incluyen las del Ecuador a partir de un estudio realizado sobre el impacto del ambiente agresivo también en una zona costera también de Manabí (Guerra, 2023b). Es posible, que esta condición casi no sea cumplida por ninguna de las estructuras emplazadas en la zona costera de estudio (Figura 6) y las diagnosticadas en los estudios anteriores ejecutados recientemente. Para un hormigón donde los valores de R_c oscilaron entre 20-30 MPa como es el caso, respondiendo posiblemente a las relaciones agua/cemento entre 0,5-0,6 y quizás mayor que 0,6. Valores de Porcentaje de Porosidad Capilar Efectivo (ε -%) entre 10-15% y $> 15\%$ indicadores de una calidad moderada e inadecuada respectivamente fueron obtenidos (Castañeda, et al 2013 y 2024, Howland, et al, 2019). Plazos elevados de vida útil de proyecto a las estructuras no fueron garantizados.

Por otra parte, se observa como los valores determinados para cada estructura demostraron una variación baja. Se trata de un indicador de la buena distribución que pudieron presentar los poros capilares en toda la matriz de hormigón, indicador también de una calidad inadecuada (Figura 6). Agentes agresivos como las sales de iones cloruro y el CO_2 pudieran haber penetrado por los poros capilares del hormigón y llegar al acero de refuerzo para originar y desarrollar el fenómeno de la corrosión atmosférica. Se aprecia como la estructura que presentó los valores más bajo de R_c fue la emplazada a una menor distancia desde la línea costera. Un mayor deterioro por corrosión atmosférica es posible. Sin embargo, un efecto de la disminución de este importante parámetro no es observado (Figura 6). Ambos aspectos resultaron similares en los estudios ejecutados recientemente en zonas de elevado potencial constructivo de Manabí.

Comportamiento de la VPU

Los tres valores determinados de VPU para cada estructura demostraron un comportamiento variable en función del incremento de la distancia desde la línea costera donde fueron emplazadas las estructuras. Al hacer uso de los intervalos de clasificación exigidos en la normativa de la especialidad y mostrados en el comportamiento, se

observa como solamente las estructuras E4 y E6 y dos casos para las E7 y E8, los valores de *VPU* resultaron mayores que 3001 m/s hasta 4000 m/s indicando un hormigón de una calidad elevada (Fig. 7). Casi similar a lo ocurrido con la *Rc*. Incluso, para la estructura E6, solo dos valores están por encima de 4000 m/s lo cual indica una calidad durable del hormigón (Fig. 5). Para el caso de la estructura E7 y E8 los valores de *VPU* se pudieran corresponder con los valores determinados de *Rc*.

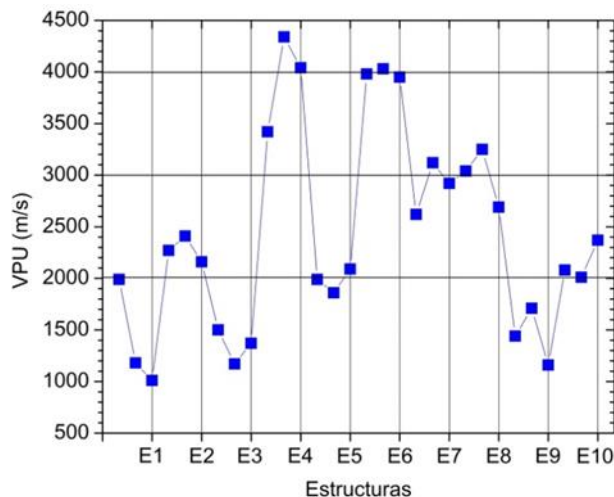


Fig. 7. Comportamiento de los valores de VPU en cada una de las estructuras

A pesar de tratarse de un hormigón con una calidad elevada según los valores de *VPU* en las estructuras anteriormente mencionadas, su durabilidad para garantizar plazos elevado de vida útil de proyecto a las estructuras pudiera estar en duda. Para que un hormigón muestre una calidad durable, la *Rc* promedio debe ser > 35 MPa correspondiente con un valor promedio de $\varepsilon \sim 7\%$. Sin embargo, probetas de hormigón armado que demostraron una calidad durable y elevada de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 debido a que los valores de *VPU* fueron superiores y aproximados a 4000 m/s, así como valores promedios de *Rc* = 30 y 26 MPa respectivamente, la vida útil de proyecto de las estructuras que pretenden ser construidas no superó los cinco años. Las probetas estuvieron sometidas a una categoría extrema (CX) de agresividad corrosiva de la atmósfera en una zona costera de la Habana, Cuba durante un tiempo de exposición de tres años (Castañeda, 2017).

Lo mismo pudiera suceder para el resto de las estructuras. Es de notar como para las E2 y E10, los valores de *VPU* caen en el intervalo 2001-3000 m/s indicando un hormigón de calidad normal como sucedió con un valor en las E5, E8 y dos en la E7. Aquí también, los valores menores fueron obtenidos en las estructuras E1, es decir, la emplazada a una menor distancia desde la línea costera, así como en las E3, E5 y E9 (Figura 5). Al resultar < 2000 m/s en estas últimas, entonces la calidad del hormigón es deficiente. De manera general, una correspondencia entre el comportamiento de la *VPU* y la *Rc* existió. Diferentes tipos de hormigón fueron usados en la construcción de las estructuras seleccionadas en la zona costera de estudio en el cantón de Pedernales. Esto pudiera ser un factor en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

De esta forma, se confirma la necesidad de usar este ensayo no destructivo siempre y cuando sea posible en estudios de diagnóstico a pie de obra. Con relación a este estudio, pudiera tratarse de una primera experiencia en el Ecuador no encontrada en los estudios ejecutados recientemente. Estudios basados en la detección de fallas, así como en la estimación de fisuras en el hormigón estructural a pie de obra a partir de la *VPU* fueron ejecutados en Brasil (Lorenzi, et al, 2017; Silva, et al, 2018). Manifestaciones patológicas en muros pantalla a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, para obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez fueron demostradas a partir de la propagación de ondas de ultrasonido (Silva y Verdolo, 2022). Un estudio basado en la evaluación de estructuras de hormigón armado utilizando ensayos no destructivos (END) basados en la *VPU* con el objetivo de determinar la integridad y uniformidad del hormigón, así como detectar posibles anomalías causadas durante la construcción fue ejecutado recientemente en la Paz, Bolivia (Ergueta y Quino, 2024). Incluso, esta técnica se ha usado en estructuras de madera en Chile (Mancilla, et al, 2019). Otros estudios muy recientes realizados en Sri Lanka y Nairobi en África, usaron la técnica de determinación de *VPU* en la predicción del contenido de humedad en bloques de tierra estabilizados con cemento y en la evaluación estructural de presas de agua (Sathiparan, et al, 2024; Kairu, et al, 2025).

Comportamiento de la ρ y la I_c

A partir del comportamiento de la ρ - $k\Omega/cm$, se observa como las estructuras E1, E3, E5 y E9 resultaron $< 10 k\Omega/cm$ lo cual significa un riesgo de corrosión elevado (Figura 8 a). Se trata de las estructuras que mostraron un hormigón con una calidad deficiente según los valores de $VPU < 2000$ m/s. Para el resto de las estructuras, el riesgo de corrosión fue moderado. De acuerdo con los rangos exigidos en el Comité Técnico de RILEM, los valores de ρ estuvieron en el rango entre 10-50 $k\Omega/cm$ (Figura 8 a).

Al presentar los valores de ρ este comportamiento y clasificación, los valores de I_c calculados (2) estuvieron por encima de $1 \mu A/cm^2$. Se demuestra, según lo intervalos de clasificación (Tabla 2) un nivel de corrosión atmosférica muy elevado y no solo quizás en las columnas (Figura 8 b). Otros elementos estructurales como las vigas de contención pudieran presentar un deterioro elevado por corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo.

Por tanto, todas las estructuras pudieran encontrarse entre una vida útil última y hasta residual sin funcionamiento, siendo más significativo lógicamente en las estructuras E1, E3, E5 y E9. La evaluación del deterioro por corrosión atmosférica en las estructuras de hormigón armado seleccionadas en una zona costera de Pedernales, Manabí Ecuador es afirmada. De acuerdo con los estudios de diagnóstico realizados recientemente en otras zonas costeras de Manabí, estas clasificaciones de vida útil han sido predominantes. El deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado persiste. La necesidad de continuar con estos estudios es de vital importancia. Sistemas de protección a base de recubrimientos con tal de devolverles a las estructuras sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto como son estética, funcionalidad y seguridad en dependencia del tipo de material, deterioro y categoría de agresividad corrosiva a la cual es expuesta, existen en la literatura de la especialidad (Castañeda, et al, 2012).

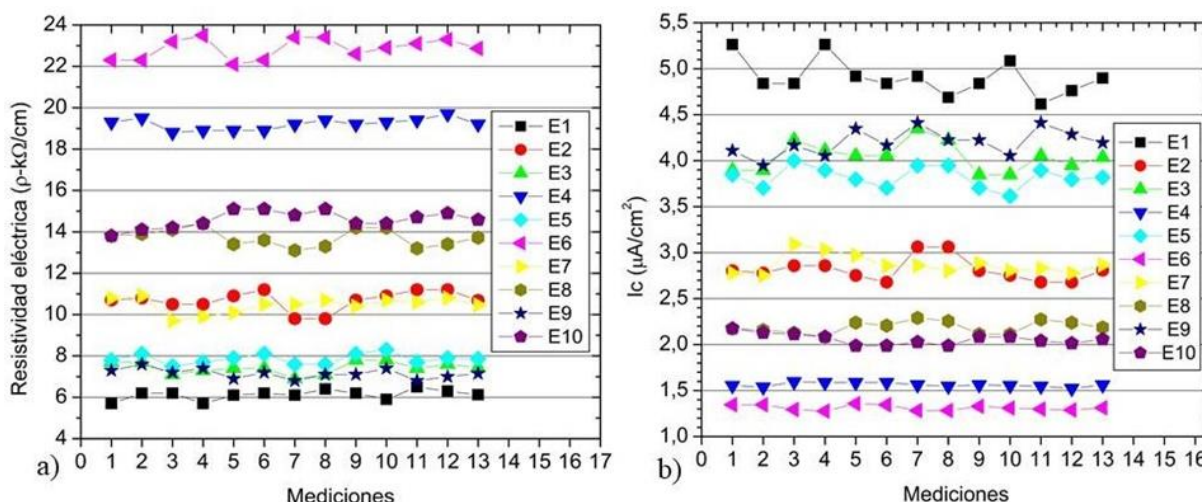


Fig. 8. Comportamiento de los valores de ρ a), y la I_c en cada una de las estructuras

Al igual que en el comportamiento de la R_c y la VPU , los valores de ρ e I_c mostraron muy poca variación (Figura 8 a) y b). El hormigón usado en la construcción de las 10 estructuras, pudiera presentar un número elevado de poros capilares distribuidos de forma homogénea en toda su masa, de conjunto con el agua existente en su interior precisamente. Son factores muy influyentes en la disminución considerable de la ρ equivalente con el incremento de la I_c . Las zonas costeras se caracterizan por presentar valores elevados de humedad relativa. También influye la velocidad del viento. Factor imprescindible en que las sales de iones cloruro procedentes desde el mar en forma de disolución salina, formadas en el interior del océano y en la zona del rompiente de las olas y transportadas el aerosol marino, impacten en las estructuras penetrando hacia el interior del hormigón precisamente por los poros capilares (Guerra, et al, 2019 y 2024). Al llegar al acero de refuerzo de conjunto con otros agentes agresivos que pudiera ser el CO_2 de la atmósfera, se origina y desarrolla el fenómeno de la corrosión atmosférica causando un deterioro anticipado en las estructuras.

Por otra parte, las estructuras E4 y E6 fueron las que mostraron los valores menores de I_c correspondiéndose con el comportamiento de la R_c y la VPU (Fig. 8 b), es decir, un hormigón de mejor calidad. Se continúa confirmando, la necesidad siempre que sea posible, de determinar ambos parámetros en las estructuras de hormigón armado en estudios de diagnóstico a pie de obra, más en zonas costeras de elevado potencial

constructivo como la tratada en este estudio. Hasta aquí el análisis en cuanto al comportamiento de los ensayos no destructivos

Comportamiento de la X_c -cm y la k_c -mm/años^{0,5}

Es evidente, un comportamiento similar entre ambos parámetros basados en su disminución en función del incremento de la distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas donde fueron emplazadas las estructuras (Figura 9 a) y b). Se demuestra, que pudiera ser un factor en la influencia de la carbonatación en el deterioro anticipado por corrosión atmosférica en las estructuras emplazadas.

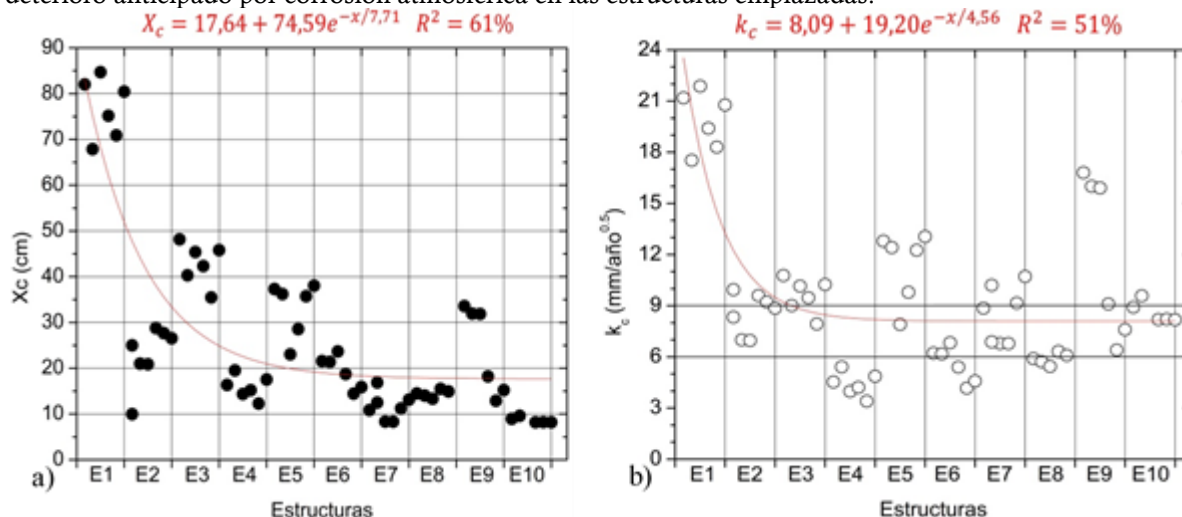


Fig. 9. Comportamiento de la X_c a), y la k_c b)

A tal punto que, los modelos estadísticos basados en funciones exponenciales decrecientes (5) y (6) fueron ajustados (Figura 9 a) y b). Se confirma que, el aerosol marino es portador también de este otro peligroso agente agresivo, el CO_2 incorporado, debido a la actividad industrial y del tráfico de los automóviles. Por tanto, se continúa confirmado que, en zonas costeras, la carbonatación pudiera ser otro factor muy influyente en el deterioro anticipado por corrosión atmosférica en las estructuras de hormigón armado. Valores muy elevados del k_c son observados en la estructura E1 (Fig. 9 b). No obstante, se demostró que, en caso de un hormigón durable y de buena calidad ($k_c < 6$), donde los valores de la k_c resultaron alrededor de $3 \text{ mm/año}^{0,5}$, plazos elevados de vida útil de proyecto fueron garantizados en una zona costera de Cuba de muy elevado potencial constructivo (Carvajal, et al, 2011). También, valores muy elevados de X_c como sucedió en la gran mayoría de las estructuras, digamos mayores que 20 cm y hasta 40-60 cm típicos de espesores de recubrimiento de hormigón donde pudieran ser localizados los aceros de refuerzo, es indicativo de una humedad muy elevada o la presencia de agua en los poros (Figura 9 a). De ahí a la obtención de los valores de ρ e I_c .

Con relación a los intervalos de clasificación de la k_c (Tabla 3), es de notar como para las estructuras E4, E6 y E8, principalmente en la primera existieron valores menores que seis, indicativo de un hormigón de buena calidad, correspondiéndose con los comportamientos de R_c , VPU , ρ e I_c para estas estructuras. Para el resto, la mayoría de los valores indicaron un hormigón de moderada y baja calidad (Figura 9 b). Valores de la k_c estuvieron entre 6 y 9 y mayores que 9 respectivamente (Tabla 3), lo cual se corresponde con el comportamiento mostrado de la I_c , basado principalmente en que la mayoría de las estructuras se encuentran en sus vidas útiles última o residual.

La interpretación del modelo ajustado (6) permite demostrar que, según el valor de $t = 4,56$ entre las estructura E4 y E5 el valor de la k_c comienza a mantenerse constante representado en este caso por el valor de $k_{c0} = 8,09$ (Figura 9 b). Este valor, puede considerarse como el promedio de la k_c a partir de la distancia desde la línea costera entre las estructuras E4 y E5 clasificado entonces como un hormigón de calidad moderada predominante en las estructuras consideradas en la zona costera de estudio. El comportamiento de la X_c y la k_c , en función del incremento de la distancia desde la línea costera, no fue encontrado en los otros estudios citados anteriormente ejecutados en Brasil, Bolivia, Chile y África donde se demostró que el factor más influyente en la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en estructuras. Tampoco, en uno de los estudios realizados recientemente en una zona costera de Manabí, donde la también carbonatación en las estructuras fue analizada como un factor en la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo.

Por otra parte, recientemente fue demostrado que, tasas elevadas de corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo en hormigones carbonatados, no comprometen la durabilidad del material, así como de la vida útil de las estructuras (Albert, et al, 2024). Esto pudiera deberse a que la corrosión atmosférica influenciada por la carbonatación, ocurre con un mecanismo generalizado y no localizado. Este último de una manera mucho más intensa provocando una fisuración y agrietamiento mayor del hormigón con zonas anódicas y catódicas de extensión apreciable en el acero de refuerzo; pero además con la presencia de picaduras. Otros factores como las CCL_t -% m. h y CCL_s -% m. h fueron más influyentes. No obstante, es necesario que el fenómeno de la carbonatación en el hormigón continúe siendo analizado en estudios donde se evalúe el deterioro por corrosión atmosférica en las estructuras.

Es de notar, como en las estructuras E5 y E9, las cuales mostraron valores muy elevados de X_c , k_e e I_c y valores bajos de ρ y R_c , indicativo de un hormigón de baja calidad, después de aplicarle la disolución de la fenolftaleína, la coloración lila-rosada no fue observada; por lo que se trata de un hormigón muy carbonatado (Figura 10 a) y b).

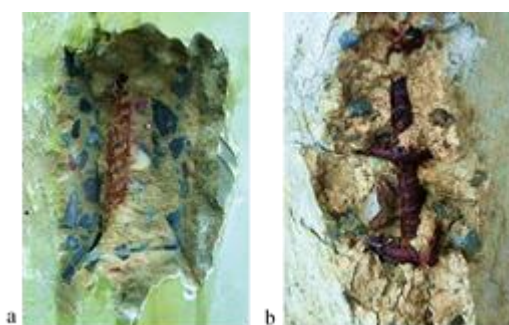


Fig. 10. Corrosión atmosférica generalizada en los aceros de refuerzo. Estructuras E5 a), y E9 b).

Comportamiento de las CCL_t -% m. h y CCL_s -% m. h

Un comportamiento similar fue demostrado también para ambas concentraciones en función del incremento de la distancia desde la línea costera donde fueron emplazadas las estructuras (Fig. 11 a) y b). Se continúa evidenciando el mayor impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, o lo que es lo mismo la agresividad corrosiva de la atmósfera en las estructuras localizadas a menores distancias.

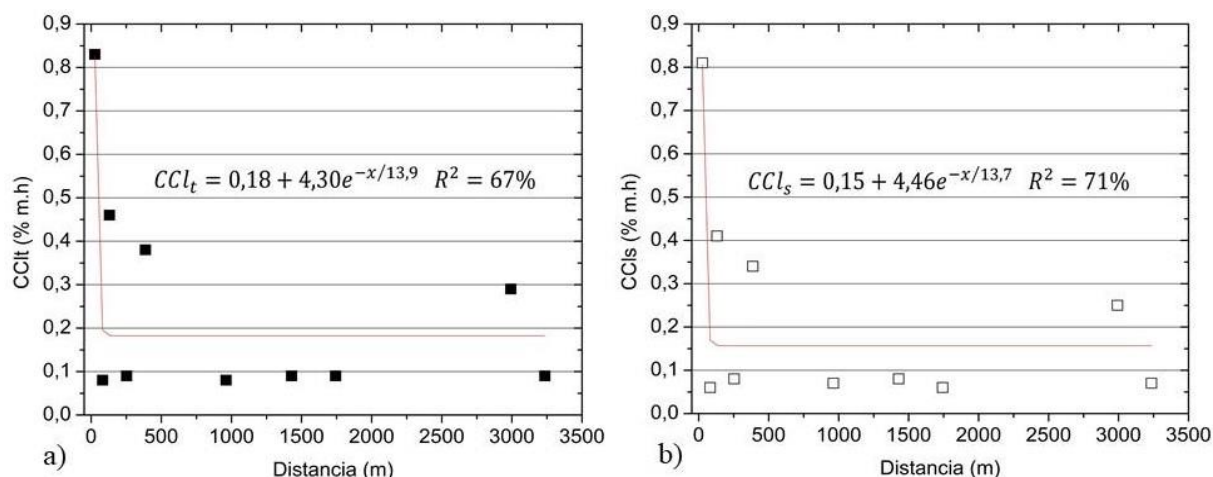


Fig. 11. Comportamiento de la CCL_t -% m. h a), y CCL_s -% m. h b)

De acuerdo con la comparación entre ambos comportamientos y haciendo uso de los modelos ajustados, basados también en funciones exponenciales decreciente (7) y (8). A partir de una distancia alrededor de los 14 m ($t = 13,9$ y $13,7$) menor a la que fue emplazada la estructura E1=26,53 m y hasta donde fue emplazada la última estructura E10 = 3236,05 m se obtuvieron ambas concentraciones promedios según los valores $CCL_{t_0} = 0,18$ -% m. h y

$CCL_{s_0} = 0,15\% \text{ m.h}$ (Figura 11 a) y b). El hecho de que $CCL_{t_0} > CCL_{s_0}$ significa que el hormigón afortunadamente no fue construido con arena de mar. De esta forma, se continúa confirmando que la corrosión atmosférica fue el factor fundamental en el deterioro en las 10 estructuras de hormigón armado, es decir los iones cloruro provienen desde el ambiente exterior, la atmósfera. Lo contrario fue demostrado en estructuras en otra zona de elevado potencial constructivo de Cuba (Castañeda y Oroza, 2024). El hormigón además de ser construido con arena de mar lo cual influyó en la corrosión del acero de refuerzo, sufrió la lixiviación por el agua de lluvia, más la carbonatación principalmente bajo condiciones interiores donde existió una humedad muy elevada. Esto dos últimos fenómenos disminuyen de manera considerable la reserva alcalina del hormigón desarrollándose entonces la corrosión. Sin embargo, al presentar la corrosión en el acero de refuerzo un mecanismo generalizado debido a la influencia de los tres factores, es decir, arena de mar, lixiviación y carbonatación. La ejecución de intensos y costosos trabajos de reparación es posible con vista a devolverle a las estructuras sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto.

De manera general, todos los valores de $CCLs$ resultaron mayores que $0,05\% \text{ m.h}$ (Figura 11 b). Se trata del valor crítico que más abunda en las referencias donde a partir de este, existe una elevada corrosión atmosférica del acero de refuerzo en las estructuras emplazadas en zonas costeras (Angst, 2011). Es otra forma de justificar los valores elevados de I_c como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo y que las estructuras se encuentren en su vida útil última y residual.

Un comportamiento similar al mostrado solo fue encontrado en un estudio realizado también en Cuba basado en el desempeño por durabilidad del hormigón bajo condiciones desde extrema (CX) a media (C3) categorías de

agresividad corrosiva de la atmósfera, pero para la $CCLt$ (Castañeda, et al, 2014). Lo único que el valor de $CCL_{t_0} \text{ m.h}$ resultó igual acero como resultado de la influencia del efecto de apantallamiento de las propias estructuras, es decir, a partir de una distancia desde la línea costera de alrededor de 50 m, una disminución considerable de la $CCLt$ fue demostrado a valores muy inferiores que $0,05\% \text{ m.h}$. Se demostró que, a partir de esa distancia el deterioro por corrosión en las estructuras emplazadas no se debió al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera en este caso el aerosol marino. Factores como la elaboración del hormigón usando arena de mar, la carbonatación debido a la actividad industrial y el tráfico intenso de automóviles, así como la lixiviación en el hormigón fueron los más influyentes en el deterioro por corrosión en las estructuras.

Con relación a la influencia de las $CCLt \text{ m.h}$ y $CCLs \text{ m.h}$, resultados a partir de la interpretación de los tres valores para cada concentración en cada estructura fueron analizados también. A pesar de que las muestras de polvo fueron tomadas al azar de los trozos de hormigón extraídos de las columnas en cada una de las estructuras, es decir, sin tener en cuenta diferentes profundidades, un efecto de la cristalización de las sales de iones cloruro es demostrado para ambas concentraciones. Picos en la muestra dos indicando los valores máximos son observados (Fig. 12 a), b), c) y d). De esta forma, se demuestra la presencia de ciclos de humectación y secado en el interior del hormigón lo cual origina este comportamiento para ambas concentraciones. Este ciclo de cristalización de las sales es otro factor influyente en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. Es posible que la humedad en el hormigón o el agua existente en los poros sea permanente a partir de una cierta profundidad y no en toda su matriz. Tiende a ocurrir cuando las estructuras están expuestas a climas tropicales costeros de elevada agresividad corrosiva de la atmósfera, y construidas con un hormigón con una calidad entre moderada y mala como ha sido demostrado en este estudio. La zona del ciclo es aquella donde ambas concentraciones tienden a aumentar. A partir del valor máximo, ocurre la difusividad de las sales debido a la humedad permanente en el interior del hormigón (Fig. 12 a), b), c) y d). Este secado de las sales de iones cloruro en forma de disolución salina procedentes desde el mar y transportadas en el aerosol marino hace que las mismas se cristalicen lo cual origina un deterioro considerable en el hormigón. En el secado influye la elevada intensidad de la radiación solar en hormigones con una porosidad capilar muy elevada. Por tanto, es casi seguro que, además de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en la zona donde permanece constante de humedad, es posible también el deterioro del hormigón debido al efecto de cristalización de las sales como otro factor influyente en el deterioro anticipado por corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en las estructuras de hormigón armado seleccionadas en este estudio. Otros estudios realizados en climas tropicales costeros han demostrado este comportamiento, pero determinando las concentraciones desde la superficie hasta diferentes profundidades ya sea a pie de obra, en muestras extraídas de las estructuras o sometidas las mismas condiciones de elevada agresividad corrosiva de la atmósfera en zonas costeras (Corvo, et al 2008; Ann, et al, 2009; Castañeda, et al, 2024).

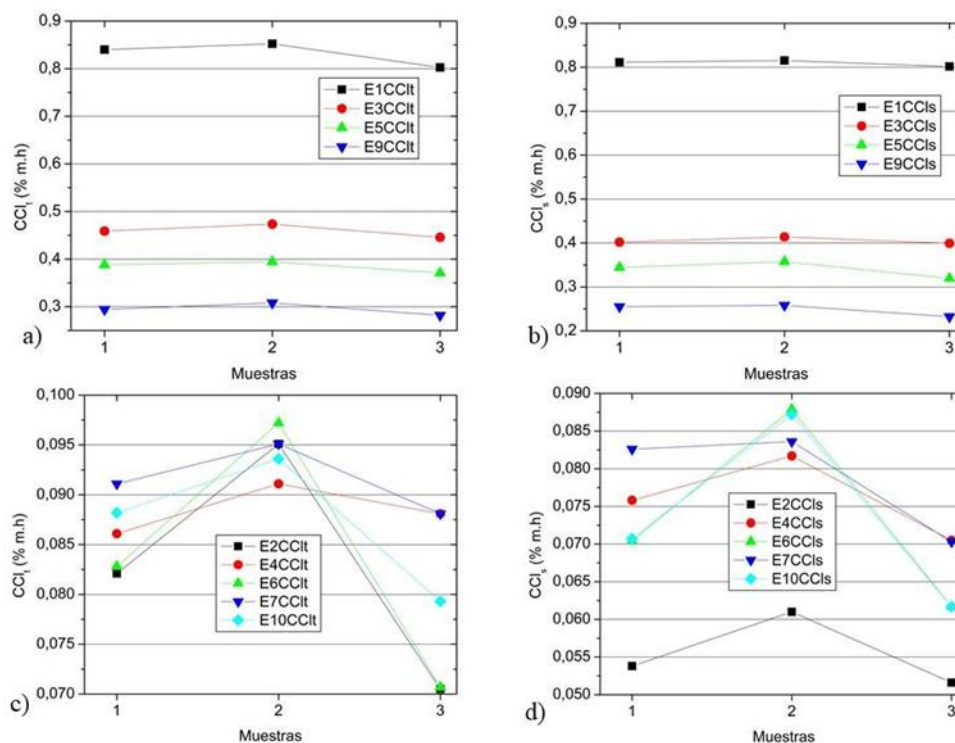


Fig. 12. Comportamiento de las concentraciones de iones cloruro para las tres muestras de polvo en las columnas para cada una de las estructuras.

Por último, una diferencia significativa entre las estructuras E1, E3, E5 y E9 y las E2, E4, E6, E7 y E10 es notada para ambas concentraciones (Figura 12 a), b), c) y d). Un hormigón de mejor calidad ha sido demostrado para estas últimas a partir del comportamiento de los otros parámetros determinados en este estudio en las columnas de cada una de las estructuras. Sin embargo, el ciclo de humectación y secado es mayor, síntoma de que estas últimas son afectadas también por el fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. La existencia de una humedad relativa elevada de la atmósfera en la zona costera de estudio donde se encuentran emplazadas las estructuras es muy probable. De lo contrario elevados índices de carbonatación, la formación del ciclo de humectación y secado, así como de corrosión atmosférica no hubiese sido posible.

Interpretación de los resultados estadísticos

La correspondencia en cuanto al comportamiento de todos los parámetros determinados en las estructuras seleccionadas, así como las bajas variaciones que presentaron los valores determinados de los ensayos no destructivos como ha sido demostrado, resultaron factores fundamentales para la ejecución del análisis estadístico a partir de los dos métodos usados en este estudio.

El buen ajuste del modelo basado en la regresión lineal múltiple (9) a partir de la obtención de un valor elevado del coeficiente de determinación (R^2) y también un nivel elevado de significancia (p) permite confirmar que, el incremento de la CCl_s -% m.h resultó un factor fundamental en la corrosión atmosférica con una ligera disminución de la VPV . Se continúa confirmando la necesidad de ejecutar la determinación de este parámetro en estudios de diagnóstico siempre y cuando sea posible.

$$Ic = a - 0.0004[VPV] + 0,57[CCl_s] \quad R^2 = 92\% \quad p = 0,0000 \quad (9)$$

Sin embargo, el análisis multivariado haciendo uso de los parámetros estadísticos (P.E) como los valores del coeficiente de regresión (r) y también del nivel de significancia permitió demostrar que, solo la CCl_s -% m.h fue el único factor no influyente en la evaluación de la corrosión atmosférica (Tabla 4). Se continúa confirmando que, entre las concentraciones de iones cloruro, la soluble o libre sigue ejerciendo una influencia mayor en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.



Tabla 4. Resultados obtenidos del análisis multivariado

Parámetros	P.E	I_c ($\mu A/cm^2$)	R_c (MPa)	VPU (m/s)	X_c (cm)	k_c (mm/año ^{0.5})	CCl_t (% m.h)	CCl_s (% m.h)
I_c ($\mu A/cm^2$)	r	-	-0,84	-0,95	0,70	0,78	0,79	0,77
	p		0,0022	0,0000	0,0227	0,0072	0,059	0,0089

Un valor de $p < 0,01$ se interpreta como un nivel de significancia elevado. Es cumplido para la VPU , R_c , k_c y CCl_s a partir de sus comportamientos en aumentar o disminuir en dependencia de los valores de r ; por lo que se trata de los factores más influyentes sucesivamente en la I_c como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. Mientras que $p < 0,05$ implica una significancia estadística, cumplida solamente para la X_c (Tabla 3). Por tanto, la VPU y la CCl_s -% m.h fueron factores influyentes tenidos en cuenta por ambos métodos estadísticos. Sin descartar la influencia de los otros donde $p < 0,01$.

El análisis multivariado es conceptualizado tradicionalmente como el estudio estadístico de experimentos en los que se realizan múltiples mediciones como es el caso en estos tipos de estudios de diagnóstico a pie de obra. La relación entre las mediciones multivariadas y su estructura son importantes para la comprensión del experimento (Ríos Varilla, 2012). De ahí, a que se recomiende su uso debido a que proporciona un incremento en cuanto a los factores influyentes en el fenómeno que se estudia en comparación con el ajuste de modelos estadísticos basados regresiones lineales y múltiples. En este caso la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Experiencias anteriores no fueron encontradas. El uso de regresiones lineales y lineales múltiples si fue tenido en cuenta en los estudios de diagnóstico realizados recientemente en otras zonas costeras de Manabí.

CONCLUSIONES

Un estudio, basado en evaluar el deterioro por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado, fue ejecutado en una zona costera del cantón de Pedernales perteneciente a la provincia de Manabí, Ecuador. El comportamiento de los resultados obtenidos de una serie de parámetros muy usados en estudios de diagnóstico a pie de obra, permitieron demostrar la calidad insuficiente que presentó el hormigón armado usado en la construcción, confirmado con el comportamiento de los valores de la profundidad y constante de carbonatación, así como el de las concentraciones de iones cloruro totales y solubles en función del incremento de las distancias desde la línea costera donde fueron emplazadas las estructuras. De esta forma, se definió que las estructuras se encontraron en su vida útil última o residual debido al desarrollo acelerado que presentó la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en el hormigón armado en la columna seleccionada en cada una de las estructuras. De acuerdo con el análisis estadístico comparativo a partir de los dos métodos utilizados en el estudio, se continúa confirmando que la concentración de iones cloruro soluble resultó el factor fundamental en el origen y desarrollo de la corrosión atmosférica, a pesar de que el hormigón usado en la columna presentó un grado elevado de carbonatación. Sin descartar otros factores en el hormigón influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo de forma sucesiva como fueron los valores de la velocidad de pulso ultrasónico, la resistencia a la compresión, la profundidad y constante de carbonatación. También, el ciclo de humectación y secado ocurrido por las concentraciones de iones cloruro, principalmente los solubles en el hormigón de las columnas, resultó otro factor influyente en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en cada una de las estructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Valerio, A., Helene, P. (2025), "Evaluación del frente de carbonatación de una estructura de hormigón sometida a hollín de fuego", Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 19 - 34, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.722>.
- 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.



- Chico B, De la Fuente D, Di'az I, Simancas J, Morcillo M (2017) Annual atmospheric corrosion of carbon steel worldwide. An integration of ISOCORRAG, ICP/UNECE and MICAT databases. *Materials* 10 (1): 601–618. <https://doi.org/10.3390/ma10060601>
- Castro, P., Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones. Editorial. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Mérida 1998.
- Howland, J, J., Tecnología del hormigonado. Editorial de la Construcción. Ciudad de La Habana. Cuba. 1995.
- 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.
- Howland, J, J; Castañeda, Abel.; El ambiente agresivo costero de La Habana y su impacto sobre las estructuras de hormigón armado. Editorial Nuevo Milenium. Sello Científico Técnico. ISBN: 978-959-05-1026-7. La Habana, Cuba, Año 2017.
- 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.
- 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.
- 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. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/108>
- Abel Castañeda-Valdés. Francisco Corvo. Rigoberto Marrero-Águila. Alejandro Fernández-Domínguez. Ebelia Del Angel-Meraz. The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. *Materials and Structures* (2023) 56:12.
- 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. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4071>
- 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. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4146>
- 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. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4173>
- Diego Andrés Rincón Zambrano, Juan Carlos Guerra Mera, Abel Castañeda Valdés. Analysis of atmospheric corrosion effects on reinforced concrete structures in Crucita, Portoviejo, Manabí Ecuador. *Rev. CENIC Cienc. Quím.*; Vol. (continued publication): pp. Year. 2025. e-ISSN: 2221-2442. Recuperado a partir de <https://revista.cnic.edu.cu/index.php/RevQuim/article/view/4191>
- 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”
- 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.
- Norma ASTM C-1218/M: 2008. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.
- P. Castro, M. A. Sanjua'n and J. Genezca : ‘Carbonations of concrete in the Mexican Gulf’, *Build. Environ.*, 2000, 35, 145–149.

- A. Castañeda, F. Corvo, J.J. Howland, T. Pérez. Corrosion of steel reinforced concrete in tropical coastal atmosphere of Havana City QUÍMICA NOVA, BRASIL. Vol. 36, No. 2, 220-229, 2013.
- 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>.
- Juan José Howland Albear, Abel Castañeda Valdés, Rigoberto Marrero Águila, Cecilia Valdés Clemente. Technological requirements to build reinforced concrete structures highly resistant to the aggressive coastal environment of Cuba. Revista CENIC JOURNAL, EBESCO, CHEMICAL SCIENCES, Vol. 50 (1), pp. 10-21. Year 2019.
- 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.
- A. Lorenzi, J. A. Chies, D. S. Adamatti, L. C. P. Silva Filho (2017), "*Avaliação da capacidade de detecção de falhas no concreto através do ensaio ultrassônico*", Revista ALCONPAT, 7 (3), pp. 286-301, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v7i3.127>.
- M. T. A. Silva, J. H. A. Rocha, E. C. B. Monteiro, Y. V. Póvoas, E. R. Kohlman Rabbani (2019), "*Evaluación del ensayo de ultrasonido para la estimación de la profundidad de fisuras en concreto*", Revista ALCONPAT, 9 (1), pp. 79 – 92, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.289>.
- Silva, R. R. C., Bertoldo, C. (2022), "*Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>.
- Silva, R. R. C., Bertoldo, C. (2022), "*Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico*", Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 210, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.564>.
- Mancilla, *et al*, Utilización de técnicas no destructivas en la evaluación del estado de conservación de la Torre del Reloj de Iquique. Monumento Histórico Nacional de Chile. Revista de la Construcción de Chile. Revista de la Construcción vol.18 no.2 Santiago jul. 2019. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.18.2.238>.
- Sathiparan *et al*. Prediction of moisture content of cement stabilized earth blocks using soil characteristics, cement content, and ultrasonic pulse velocity. *Journal of Engineering and Applied Science* (2024) 71:187.
- Kairu *et al*. Application of schmidt hammer and ultrasonic pulse velocity for structural integrity assessment in water dams. *J Infrastruct Preserv Resil* (2025) 6:11.
- 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.
- 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. <https://doi.org/10.1002/maco.201810442>
- Juan Carlos Guerra Mera, Angel Ramón Sabando García, Miriam Goretty Pin-Mera, Joan Manuel Rodríguez Díaz, Abel Castañeda Valdés. Assesment of atmospheric corrosivity in coastal areas: Case study in port Lopez, Manabí, Ecuador. *Case Studies in Chemical and Environment and Engineering*, 9 (2024), 100703, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100703>
- 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.
- Albert, C., Mundra, S., Isgor, O. B., Angst, U. (2024), "Entendiendo fundamentalmente la corrosión del acero inducida por carbonatación en hormigones con menor impacto ambiental", Revista ALCONPAT, 14 (3), pp. 332 – 343, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v14i3.764>
- Abel Castañeda Valdés, Alberto Hernández Oroza. Concentration of chloride ions in reinforced concrete exposed to different mediums and exposure conditions in Cuba. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (Continued publication): 161-178. Year. 2024. e-ISSN: 2221-2442.
- Angst, U, M., Elsener, B., Larsen, C, K., Vennesland, 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, 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.

Corvo, F., Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel. Revista Corrosion Science. 41 (1999), pp. 75-86.

Ann, Y, K., Ahn, J, H, Ryou, J, S., The importance of chloride content of the concrete surface in assessing the time to corrosion of steel in concrete structure. Revista Construction and Building Materials. 23, (2009), pp. 239-245.

Cecilia Ríos Varillas. Estadística y diseño de experimentos. Universidad Nacional de Ingeniería. Editorial Universitaria. Universidad Nacional de Ingeniería. Editorial Universitaria. Perú, (2012).

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

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

Efren Andrés Mendoza Loo: Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las estructuras. 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).

Juan Carlos Guerra Mera: 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.

