

ESTUDIO DE LA VIDA ÚTIL DE CUATRO ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO UTILIZANDO TÉCNICAS DE ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO

SERVICE LIFE STUDY OF FOUR REINFORCED CONCRETE STRUCTURES USING NON-DESTRUCTIVE ANALYSIS TECHNIQUES

Juan Daniel Pacheco Delgado ^a (0009-0009-5122-4710)

Juan Carlos Guerra Mera ^{b,*} (0000-0001-6597-0022)

Raúl Vinicio Hidalgo Zambrano ^c (0000-0003-1156-7187)

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

^b Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí (UTM). Avenida Urbina y Portoviejo 130105, Manabí, Ecuador.

^c Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Técnica de Manabí. Profesor principal 1.

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

Recibido: 12 de febrero de 2026;

Aceptado: 10 de marzo de 2026;

RESUMEN

Un estudio de vida útil fue ejecutado en cuatro estructuras de hormigón armado, emplazadas en una zona urbana del cantón de Portoviejo, provincia de Manabí Ecuador. Ensayos no destructivos, sin descartar el uso de ensayos destructivos fueron utilizados. El objetivo general del estudio investigativo se basó en estimar la vida útil que pudieran presentar las cuatro estructuras de hormigón armado. Los objetivos específicos fueron, evaluar la calidad del hormigón usado en la construcción de las cuatro estructuras, y demostrar los factores más influyentes en la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Los resultados permitieron estimar, que las cuatro estructuras se encuentran en su vida útil de proyecto sin llegar quizás a sus vidas útiles de servicio, última y residual confirmado con la observación visual. Es posible entonces que la ocurrencia del fenómeno de la carbonatación de por sí solo, no comprometieron la vida útil de proyecto de las estructuras sin la presencia de una concentración elevada de concentración de iones cloruro principalmente solubles. Todo pareció indicar, que los valores de I_c no resultaron confiables. Las cuatro estructuras se encuentran emplazadas en una zona urbana a grandes distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas. Además, se demostró que el frente de carbonatación no alcanzó la zona de interface acero de refuerzo/pasta de hormigón endurecida. Los valores del ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico, permitieron demostrar que el hormigón usado presentó una calidad entre moderada y durable, influyendo en que las columnas y vigas de las cuatro estructuras, no hayan mostrado un deterioro anticipado en el tiempo producto de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. El comportamiento y los valores de los ensayos no destructivos, principalmente la velocidad de pulso ultrasónico, mostraron una influencia mayor en la intensidad de corriente de corrosión.

Palabras clave: vida útil, estructuras, hormigón armado, carbonatación, corrosión atmosférica.

ABSTRACT

A study on the service life of four reinforced concrete structures, located in an urban zone of the Portoviejo canton, Manabí province, Ecuador, was carried out. Non-destructive testing, without ruling out the use of destructive testing, was used. To estimate the service life in the four reinforced concrete structures was the main objective in the research study. To evaluate the concrete quality used in the building of the four structures. To demonstrate the most influential factors in the intensity of corrosion current as an indicator of atmospheric corrosion in the reinforcement steel embedded in the reinforced concrete were the specific objectives. The results allowed us to estimate that the four structures are within their service life project, perhaps not reaching their service life final and residual, confirmed by visual observation. It is possible then that, the carbonation phenomenon occurrence alone did not compromise the service life project of the structures without the presence of high chloride concentration mainly soluble chloride ions. Everything seemed to indicate that the I_c values were not reliable. The four structures are located in an urban zone at great distances from the coastline or the surf zone. Furthermore, it was shown that the carbonation front did not reach the reinforcement steel/hardened concrete paste interface zone. The values of the non-destructive ultrasonic pulse velocity test showed that the concrete used presented a quality between moderate to durable, which influenced the fact that the columns and beams of the four structures did not show premature deterioration over time due to atmospheric corrosion of the reinforcement steel. The behavior and values of the non-destructive tests, mainly the ultrasonic pulse speed, showed a greater influence on the intensity of corrosion current.

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



INTRODUCCIÓN

La vida útil de proyecto (V_{up}) es un componente fundamental a tener en cuenta antes de proceder con las labores de construcción de las estructuras de hormigón armado expuestas a los medios naturales de exposición (Helene, et al, 1996). Se adicionan también, las construidas con los materiales metálicos más usados en la industria de la construcción como son los aceros al carbono y galvanizado (Andrade, et al, 2003).

Los principales medios naturales a que están expuestas las estructuras de hormigón armado son la atmósfera y el agua de mar. Dentro de estos dos medios se encuentran las condiciones de exposición. En el caso de la atmósfera, al exterior. Condición a la cual se encuentran expuestas la mayoría de las estructuras. Con relación al agua de mar las de inmersión total, marea y salpicaduras; siendo estas dos últimas las más agresivas. Se debe lograr siempre, que las estructuras de hormigón armado mantengan en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto (V_{up}) como son estética, funcionalidad y seguridad, sin costos inesperados en los trabajos costosos de reparación (Haque, et al 2007). Significa entonces que la V_{up} pudiera ser proyectada en el tiempo.

Varios modelos que permiten predecir la V_{up} son utilizados a nivel mundial los cuales cubren la penetración de las sales de iones cloruro y el dióxido de carbono en el hormigón armado a partir del fenómeno de la carbonatación (Alexander, 2018). Entre los más citados se encuentran: **Life-365**® Modelo de difusión de cloruros basado en la primera ley de Fick en estado estacionario. Semi-probabilístico que ofrece un análisis sobre el costo del ciclo de vida útil. **Stadium**® Modelo multi-iónico basado en la ecuación de Nernst-Planck el cual ofrece un rango de entrada de iones cloruro e iniciación a la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. También ofrece perfiles de carbonatación y sulfato. **Fib Bulletin 34** basado en la segunda ley de Fick en estado no estacionario y que aborda principalmente la penetración de las sales de iones cloruro y la carbonatación. El modelo **Concrete Works** relacionado también con las leyes de Fick donde se pudiera prevenir la concentración y entrada de sales de iones cloruro. Por último, el **Clin Conc**, un modelo basado solamente en la difusión de iones cloruro.

El origen y desarrollo de estos modelos y quizás otros existentes, se debió a la problemática de investigación trazada por la comunidad científica basada en la necesidad de encontrar herramientas y metodologías que permitan a los proyectistas prever los plazos muy elevados de V_{up} de las estructuras de hormigón armado. Sin embargo, los modelos no tienen en cuenta los procesos temporales transitorios ocurridos en la

atmósfera como es el caso de la penetración del aerosol marino, las variaciones de la humedad relativa, la temperatura, las condiciones del relieve, así como la fuerza y dirección del viento. Estos procesos tienden a acelerar el fenómeno de la corrosión atmosférica, no solo del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, sino también en cualquier material metálico de la construcción expuesto directamente a la atmósfera. De ahí, a que las estructuras, a pesar de la existencia de los modelos, hayan alcanzado un deterioro anticipado en el tiempo debido al fenómeno de la corrosión atmosférica. Por otra parte, estos modelos no han sido aplicados de forma general, debido a que no todas las estructuras han sufrido un deterioro anticipado en el tiempo. De hecho, muchas estructuras de hormigón armado construidas en el siglo XIX y emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo, vienen manteniendo en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto, sin costos inesperados en los trabajos de mantenimiento y reparación (Alexander, 2017).

No obstante, varios países como Canadá, Australia, Estados Unidos, Dinamarca, Noruega, España, Suiza, Suráfrica, Francia (Alexander, 2017), Cuba (Castañeda, et al, 2017) y más reciente el Ecuador (Guerra, 2023), optaron por realizar investigaciones basadas en la durabilidad del hormigón armado. Por otra parte, un proyecto sobre la durabilidad (DURACON) fue ejecutado en varios países de Iberoamérica en el primer lustro de este siglo (Trocónis, et al, 2006 y 2007). Los resultados obtenidos plasmados en las normativas de la construcción de cada país como modelos de V_{up} han demostrado de forma experimental los requerimientos que permiten el desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón, ante el impacto severo del ambiente agresivo costero de la atmósfera. De esta manera, plazos elevados de V_{up} se vienen garantizando en las estructuras y las que pretenden ser construidas en zonas costeras identificadas como de elevado potencial constructivo. En el caso de los estudios ejecutados en los países de América Latina teniendo en cuenta Cuba y el Ecuador, la V_{up} fue proyectada haciendo uso de las especificaciones del modelo conceptual de **Tuutti**. Este modelo concede dos fases distintas, la de iniciación y propagación del fenómeno con sus correspondientes tiempos. La suma de ambos tiempos determinados a partir de la medición experimental de la intensidad de corriente de corrosión en probetas de hormigón armado como un indicador en el tiempo de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, permitió calcular y pronosticar con elevados niveles de confianza la V_{up} que pudieran presentar las estructuras que se pretenden construir principalmente en zonas costeras.



Por otra parte, la Instrucción Española de Hormigón Estructural describe el procedimiento para la estimación de la V_{up} en las estructuras de hormigón armado deterioradas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo iniciado y desarrollado por el fenómeno de la carbonatación en el hormigón. El procedimiento se basa en los cálculos de los tiempos de iniciación y propagación del fenómeno (EHE-08:2008).

La carencia de estos resultados a nivel mundial, es decir el desconocimiento en cuanto al pronóstico de la V_{up} ha traído como consecuencia entonces la ejecución de estudios investigativos, no solo en probetas de hormigón armado, sino también a pie de obra relacionados con el tipo de vida útil que pudiera presentar las estructuras. Siempre, con el propósito de establecer esquemas seguros en cuanto a la ejecución de los trabajos de mantenimiento o reparación. Técnicas de análisis o más bien ensayos no destructivos acompañados de ensayos destructivos, han sido usadas en los estudios ejecutados en varios países de la región. Se destacan México (Castro, et al, 2014), Cuba (Carvajal, et al 2011), Brasil (Costa, et al 2022) y Chile (Ebensperger, et al, 2021).

En Ecuador, varios estudios a pie de obra basados sobre la V_{up} han sido ejecutados recientemente en estructuras emplazadas en varios cantones pertenecientes a la provincia de Manabí en zonas costeras de elevado potencial constructivo y no en zonas urbanas (Moreira y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024; Rincón, et al, 2025; Guerrero, et al, 2025). Los resultados obtenidos a partir de la combinación de ensayos destructivos y no destructivos, siendo estos últimos los más numerosos, permitieron demostrar, que las estructuras desde hace mucho tiempo dejaron atrás sus condiciones iniciales de V_{up} (Helene, et al, 1996). Las mismas, en función del deterioro anticipado que presentaron producto de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado influenciada por la penetración de las sales de iones cloruro y la carbonatación se encontraron en su vida útil de servicio, última y alguna en su vida útil residual sin funcionamiento social alguno, siendo un problema social de la ciencia y la tecnología con vías de solución. Precisamente el objetivo general de este estudio se basa en, estimar de V_{up} que pudieran presentar cuatro estructuras de hormigón armado emplazadas en una zona urbana y no costera en el cantón del Portoviejo, capital de la provincia de Manabí, Ecuador. Diferentes ensayos no destructivos y destructivos, siendo más utilizados los primeros, fueron aplicados en columnas y vigas en cada una de las estructuras. Los objetivos específicos fueron, evaluar la calidad del hormigón usado en la construcción de las cuatro estructuras, y demostrar los

factores más influyentes en la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Selección de las cuatro estructuras de hormigón armado.

Cuatro estructuras de hormigón armado en una zona urbana del cantón de Portoviejo fueron seleccionadas. Los ensayos no destructivos y destructivos fueron ejecutados en elementos estructurales como columnas (C) y vigas (V). Para la estructura E-1, las columnas C-1, C-2, C-3 y C-4 y las vigas V-1, V-2 y V-3. Columnas y vigas C-1, C-2, C-3 y V-1, V-2 y V-3 respectivamente para las estructuras E-2, E-3 y E-4. El estudio investigativo fue ejecutado en los meses comprendidos entre agosto y septiembre del año 2025.

Ensayos no destructivos usados en las columnas y vigas en las cuatro estructuras

Se continúa resaltando, que la metodología experimental es muy similar a la usada en los otros estudios de diagnóstico que fueron ejecutados recientemente en estructuras emplazadas en otros cantones costeros en la provincia de Manabí.

Resistividad Eléctrica Aparente

Primeramente, fue necesario el uso del pacómetro detector de aceros de refuerzo marca M&A INSTRUMENTS modelo ZBL r800 de fabricación china, para estar seguro de la no presencia de aceros de refuerzo en cada una de las columnas y vigas seleccionadas en las cuatro estructuras. De esta forma, se evita falsear el resultado obtenido. Seguidamente, en la zona donde se detectaron los aceros de refuerzo, una línea color naranja con un lápiz cristalográfico fue trazada para la no ejecución de las mediciones de ρ (Fig. 1).

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

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



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. Para cada viga y columna 10 valores fueron obtenidos en las cuatro estructuras los cuales fueron graficados y clasificados de acuerdo con los rangos exigidos en el Comité Técnico de RILEM. Los intervalos establecen el riesgo por corrosión atmosférica del acero de refuerzo en los elementos estructurales de hormigón armado en las estructuras, así como en probetas de hormigón armado colocadas bajo

condiciones exteriores de exposición a la atmósfera (Andrade et al, 2004).



Fig. 1. Medición de la ρ en $k\Omega/cm$ b) en una columna seleccionada de las cuatro estructuras.

Resistencia a la compresión estimada a partir de la Esclerometría

Para la estimación de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa) en las columnas y vigas a partir de la Esclerometría; un Esclerómetro digital, marca Silver Schmidt PC tipo N de Suiza fue utilizado (Troconis, et al, 1997). Aquí también 10 valores fueron obtenidos y graficados. Debido a que las 10 mediciones en las columnas y vigas fueron ejecutadas a tiempos diferentes para cada construcción, la previa verificación del equipo fue necesaria. Para eso, un yunque tarado de 16 kg fue empleado. Posteriormente, fue seleccionada una cuadrícula de área 100 cm^2 en las columnas y vigas donde mismo fueron ejecutadas las mediciones de ρ , es decir, donde no hubo presencia de aceros de refuerzo (Fig. 2).

de los 10 valores de R_c los cuales fueron graficados para cada columna y viga en las cuatro estructuras, 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, colocando el equipo de manera horizontal en las columnas y vigas. Por tanto, el ángulo de inclinación para la obtención de los valores de R_c en el gráfico fue de 0° (Fig. 2).



Fig. 2. Ejemplo de cómo fueron ejecutadas las mediciones de Esclerometría en una de las columnas.

Las mediciones en la cuadrícula se realizaron a una distancia de alrededor de 25 mm entre los puntos de medición. Se tuvo en cuenta, además, la no existencia de recubrimientos (pinturas), piedras abrasivas, fisuras, grietas, humedades e incrustaciones. Para la obtención

Velocidad de pulso ultrasónico

La medición de Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU- m/s) fue ejecutada a partir del método directo, es decir, colocando el transductor emisor y el transductor receptor por las caras opuestas de las columnas y vigas en cada una de las estructuras (Figura 3) (Troconis, et al, 1997). Al realizar las mediciones en las mismas zonas de las vigas y columnas donde fueron ejecutadas las de R_c y ρ es evidente la no presencia de aceros de refuerzo.

dependencia de las columnas y las vigas para cada construcción. En la estructura E-1 los valores de la distancia fueron 25 cm y 30 cm para las vigas y columnas respectivamente. Para la estructura E-2, 30 cm para ambos elementos estructurales. En la estructura E-3, 35 cm y 20 cm para las columnas y vigas. Por último, 25 cm y 20 cm para las columnas y vigas de la estructura E-4.

El ensayo consistió 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. Esta distancia varió en

Intensidad de corriente de corrosión

El cálculo de los valores de Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$), fue realizado a partir de los 10 valores de Resistividad Eléctrica Aparente (en ρ - Ω/cm) obtenidos para cada columna y viga, graficados también. Para esto, fue



usado el criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM (Andrade et al, 2004):

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

Los valores promedios determinados de cada data (n=10) fueron clasificados según los intervalos de clasificación en dicho comité. Esto permitió definir el nivel de corrosión atmosférica en los elementos estructurales (Tabla 1), así como una medida de la pérdida de espesor en los aceros de refuerzo (V_c -mm/años), y el tipo de vida útil que presentaron las cuatro estructuras seleccionadas.

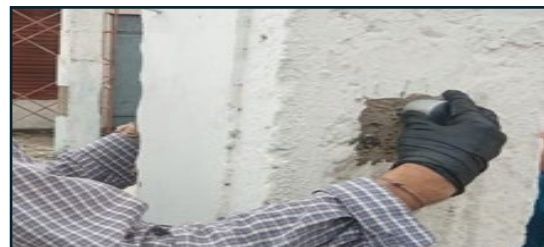


Fig. 3. Ejemplo de medición de la VPU en una de las columnas.

Los 10 valores de VPU obtenido en cada elemento estructural, fueron convertidos a km/s para poder graficarlos de conjunto con los otros parámetros determinados en las cuatro estructuras. Para su clasificación, entonces si los valores fueron convertidos a m/s.

Un equipo Marca MATEST- de fabricación italiana - MODELO: C369N. Rango de medición del tiempo de 0 a 3000 μ s, 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.

Tabla 1. Intervalos de clasificación de Ic y la pérdida de espesor en los aceros de refuerzo

Intensidad de corriente de corrosión (Ic - $\mu A/cm^2$)	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

Determinación de la profundidad y constante de carbonatación

Para la determinación de la profundidad de carbonatación (X_c -cm), fue necesario realizar una perforación en cada una de las columnas y vigas también en las zonas donde fueron ejecutadas las mediciones de R_c y ρ . Para esto, fue necesario el uso del cincel y la mandarina, hasta llegar al acero de refuerzo. Rápidamente, en las zonas perforadas expuestas el medio agresivo en cada elemento estructural, un indicador de fenolftaleína al 1% antes de un tiempo muy inferior a los 15 minutos fue aplicado. Primeramente, las zonas fueron limpiadas con una brochita para librarlas del polvo u otras partículas. Las mediciones de

X_c -mm fueron ejecutadas desde la superficie hasta la profundidad donde el indicador mostró una coloración blanca indicando la existencia del fenómeno de la carbonatación debido a la presencia de un pH ácido en la solución presente en los poros del hormigón (Castro, et al, 2000). Para las mediciones, un pie de rey digital de elevada precisión y exactitud fue utilizado.

De esta forma, 10 valores de X_c -mm fueron determinados en cada elemento y sirvieron para el cálculo de los valores de la constante de carbonatación (k_c -mm/años^{0.5}) teniendo en cuenta el año de construcción de cada estructura (t -año) a partir de la expresión:



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

Los 10 valores de $Xc\text{-mm}$ y $k_c\text{-mm/años}^{0.5}$ fueron graficados. Los valores promedio de la k_c sirvieron para

la clasificación en cuanto a la evaluación preliminar de la calidad del hormigón como un indicador de su durabilidad estructural en las cuatro estructuras seleccionadas (Castro, et al, 2000) (Tabla 2).

Tabla 2. 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

Porcentaje de porosidad capilar efectivo

Para la determinación de este parámetro ($\epsilon\text{-\%}$), muy importante en la vida útil de las estructuras de hormigón armado, testigos cilíndricos de diámetro 6,5 cm y de longitud 20 cm fueron extraídos también en las zonas de las columnas y vigas donde no hubo aceros de refuerzo y donde mismo fueron ejecutadas las mediciones de Rc y ρ . Siempre antes de los ensayos de carbonatación. Una máquina de extracción marca VEVOR, perforadora de hormigón de fabricación China, con una broca diamántica fue usada. Posteriormente, los testigos cilíndricos fueron cortados de forma transversal. De esta forma, 10 muestras cilíndricas de espesor de 2 cm fueron obtenidas para cada testigo. Una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT de fabricación estadounidense fue usada. A cada una de las muestras se le determinó un valor de ϵ para un total de 10 los cuales fueron graficados también. Los valores promedios de cada data experimental ($n = 10$) fueron usados para la clasificación de la calidad del hormigón (Troconis, et al, 1997). Para la determinación de los 10 valores de ϵ fue usada la metodología establecida por Göran Fagerlund basada en flujo de absorción capilar del agua en muestras cilíndricas de hormigones y morteros (Troconis, et al, 1997).

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 y vigas, también en la misma zona donde se procedió con las mediciones de Rc y ρ . Se trató de los trozos que quedaron del análisis de la carbonatación. Los 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. Tres muestras de 20 g de polvo por cada trozo en las vigas y columnas de cada estructura fueron obtenidas. De esta, 10 g fueron usados para las determinaciones de los valores de $CCLt$ y $CCLs$ en $\% m. h$ respectivamente en cada estructura. Los tres valores determinados para cada concentración fueron graficados.

Las determinaciones de los 10 valores de $CCLt$ y $CCLs$ en $\% m. h$ en cada muestra de 10 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).

Análisis estadístico comparativo

Para la ejecución del análisis estadístico y la elaboración de los gráficos, fueron usados los softwares Statgraphic 19-Centurion, 2009 y Origin 6.1, 2006 respectivamente. Valores promedios (P), Desviación Estándar (DS) y Coeficiente de Variación ($CV\text{-\%}$) de los ensayos fueron calculados de forma general para las columnas y las vigas en las cuatro estructuras. Esto sirvió para la evaluación de la calidad del hormigón.

Para la demostración de los factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en las vigas y columnas, dos métodos estadísticos fueron usados. Se trata del análisis multivariado para las columnas y vigas de la estructura E-1 y en las columnas de las estructuras E3 y E4. El ajuste de regresiones lineales múltiples para las vigas y columnas de la estructura E2, así como para las vigas de las estructuras E3 y E4.



Para ambos métodos, se tomó como variable dependiente la Intensidad de Corriente de Corrosión (I_c - $\mu A/cm^2$). Las variables independientes fueron la ρ , R_c , VPU , X_c , k_c y ϵ . Esto permitió demostrar los factores más

influyentes en la I_c como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo en cada elemento estructural, muy representativo para cada estructura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de la calidad del hormigón armado usado en las cuatro estructuras

El comportamiento de los 10 valores obtenidos para cada ensayo destructivo o no destructivo, es observado

en las columnas y vigas en las cuatro estructuras. Una variación muy baja es notada en todos los casos (Figuras 4, 5, 6, 7 y 8)

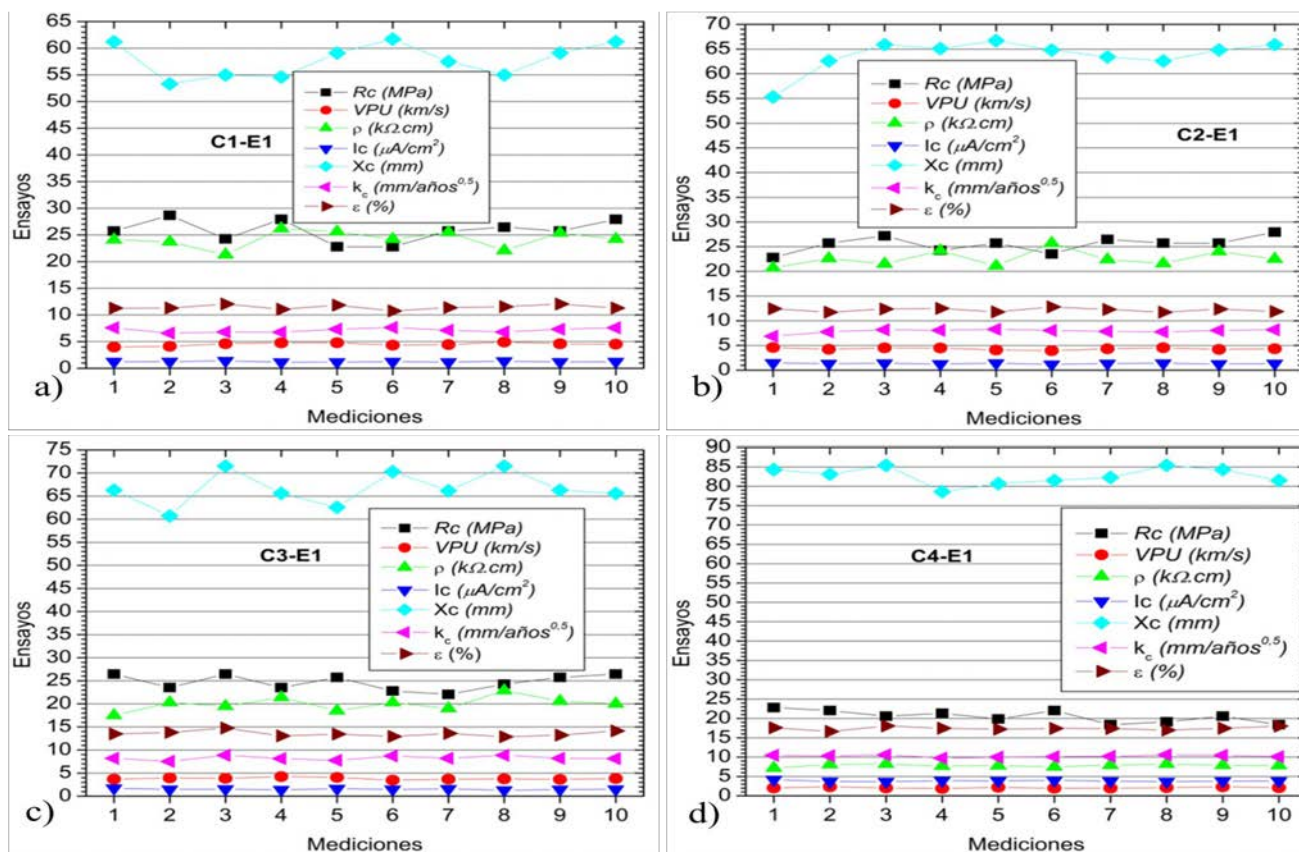


Fig. 4. Comportamiento de los diez valores de ensayos en las columnas (C) de la estructura E-1.

Por tanto, los valores promedios de cada ensayo sirven para tener una idea en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón armado usado en la construcción de las cuatro estructuras.

Por otra parte, la existencia de la variación baja en cuanto a los 10 valores, es un indicador de la repetitividad con que fueron ejecutados los ensayos en cada uno de los elementos estructurales. Se trata de un aspecto muy fundamental a la hora de ejecutar los trabajos de inspección, evaluación y diagnóstico por corrosión en las estructuras de hormigón armado. Siempre, con el propósito de estimar el tipo de vida útil en que pudiera encontrarse las estructuras para

establecer esquemas de trabajo de mantenimiento o reparación. Se basa en establecer los sistemas de protección primarios y secundarios adecuados a base de recubrimientos en función del nivel de deterioro, los tipos de fenómenos que pudieran ocurrir en el hormigón que originan y desarrollan la corrosión del acero de refuerzo como son, la carbonatación, la eflorescencia y la penetración de las sales de iones cloruro o la presencia de este último agente agresivo en los áridos y/o en el agua de amasado, así como del nivel o categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera a la que están expuestas las estructuras.



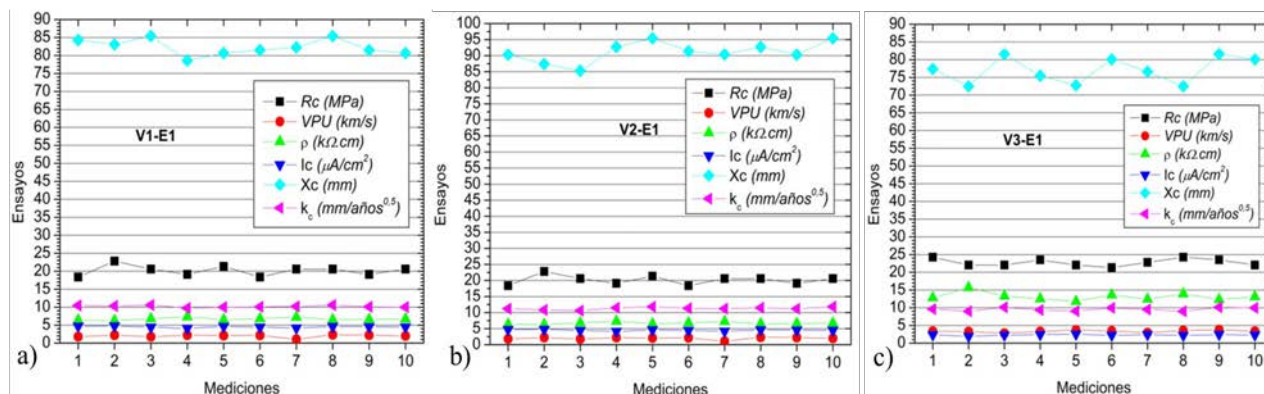


Fig. 5. Comportamiento de los diez valores de ensayos en las vigas (V) de la estructura E-1.

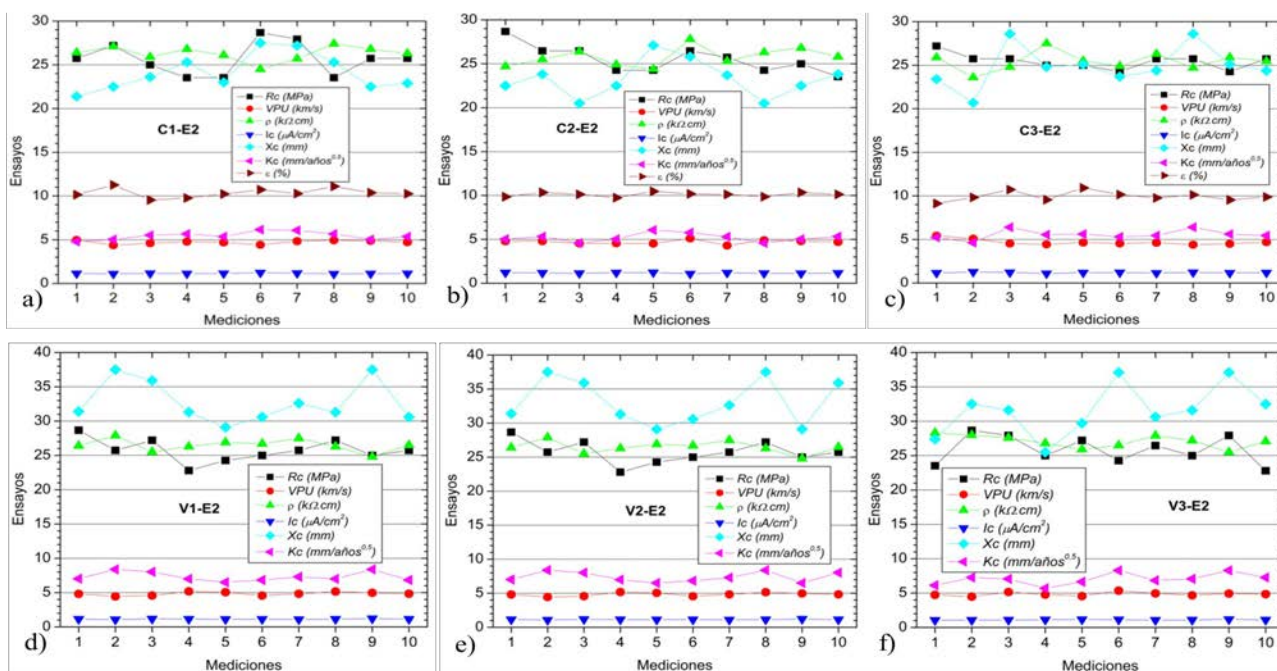


Fig. 6. Comportamiento de los diez valores de ensayos en las columnas (C2) y vigas (V) de la estructura E-2.

Siempre con el propósito de devolverle a las mismas sus condiciones iniciales de V_{up} como son estética, funcionalidad y seguridad. Experiencias han sido obtenidas en Cuba en estructuras de hormigón armado y metálicas de acero al carbono y galvanizado que presentaron un deterioro muy avanzado y anticipado emplazadas en una zona costera de muy elevado potencial constructivo (Castañeda, et al, 2012). Al hacer uso de las variables estadísticas (VE), es de notar los valores bajos del coeficiente de variación (CV) en los elementos estructurales en las cuatro estructuras E1, E2, E3 y E4. Por tanto, se confirma que los valores promedios (P), mayores que sus respectivas desviaciones estándares ($D.S$), pueden ser usados en la

evaluación de la calidad del hormigón (Tabla 3). La eficacia elevada en cuanto a la ejecución de los ensayos continúa siendo demostrada.



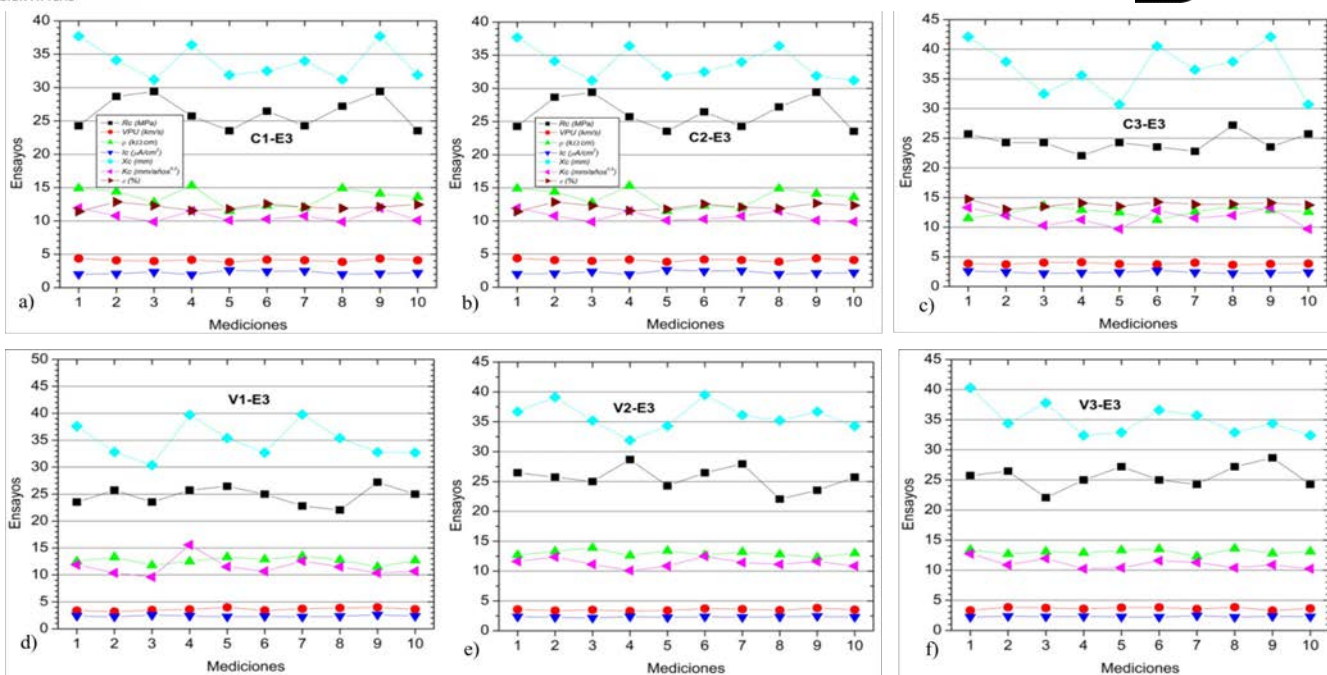


Fig. 7. Comportamiento de los diez valores de ensayos en las columnas (C) y vigas (V) de la estructura E-3

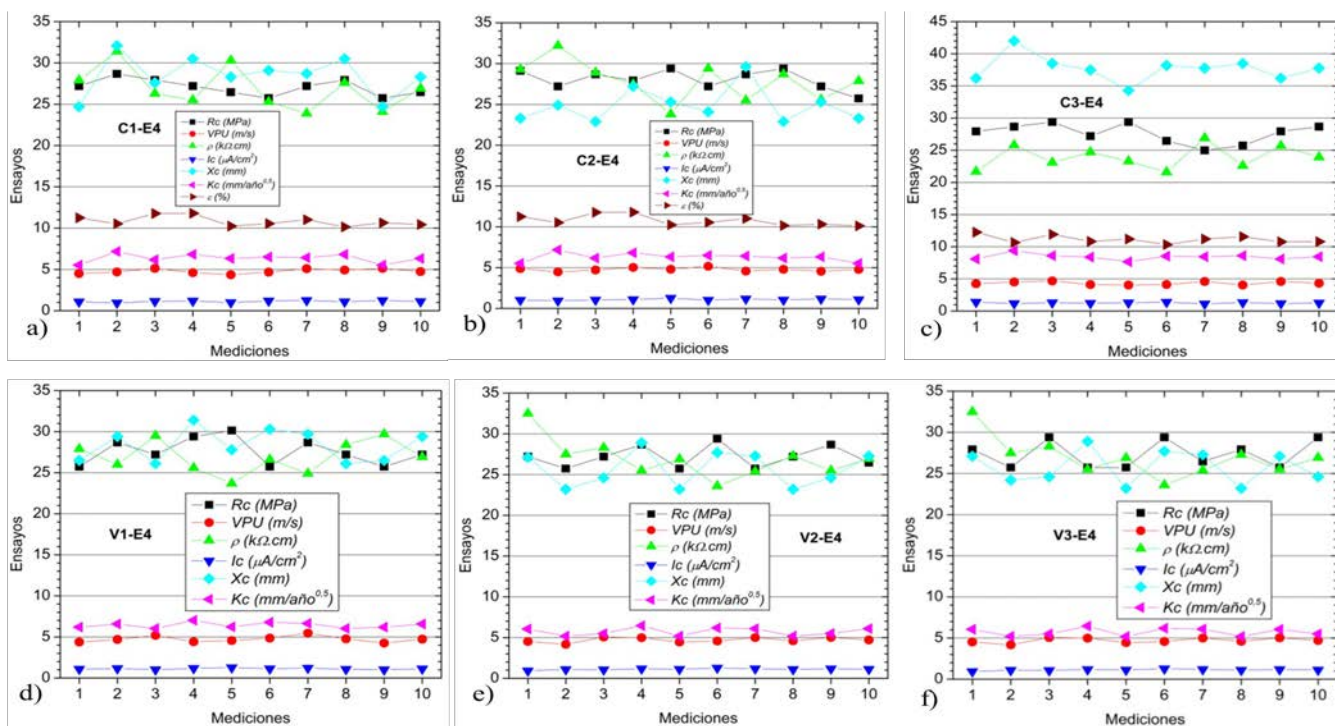


Fig. 8. Comportamiento de los diez valores de ensayos en las columnas (C) y vigas (V) de la estructura E-4



Tabla 3. Variables estadísticas usadas en la evaluación de la calidad del hormigón en los elementos estructurales de las cuatro estructuras.

Estructura E1 Columnas n = 40							
VE	I_c ($\mu A/cm^2$)	R_c (MPa)	ρ ($k\Omega.cm$)	VPU (km/s)	X_c (mm)	K_c (mm/años ^{0.5})	ε (%)
P	1,97	24,0	18,67	3,69	67,71	8,39	13,65
DS	0,45	2,72	6,64	0,99	9,80	1,21	2,37
CV (%)	22,8	11,2	35,5	26,8	14,4	14,4	17,3
Vigas n = 30							
P	3,75	21,0	8,85	2,44	83,5	10,35	-
DS	1,06	1,77	3,15	0,74	6,60	0,81	-
CV (%)	28,2	8,4	35,5	30,3	7,9	7,8	-
Estructura E2 Columnas n = 30							
P	1,16	26,0	25,84	4,70	24,08	6,40	10,4
DS	0,04	1,43	1,01	0,24	2,20	0,48	0,47
CV (%)	3,4	5,6	3,9	5,1	9,1	8,8	4,5
Vigas n = 30							
P	1,12	26,0	26,67	4,84	32,7	7,26	-
DS	0,03	1,73	0,91	0,24	3,30	0,74	-
CV (%)	2,6	6,7	3,4	4,9	10,0	10,1	-
Estructura E3 Columnas n = 30							
P	2,28	26,0	13,23	4,02	34,74	10,98	12,70
DS	0,21	2,23	1,24	0,20	3,38	1,06	0,94
CV (%)	9,2	8,7	9,3	4,9	9,7	9,6	7,4
Vigas n = 30							
P	2,32	25,0	1,91	3,60	35,27	11,29	-
DS	0,09	1,83	0,52	3,21	2,67	1,13	-
CV (%)	4,2	7,2	4,07	5,8	7,6	10,01	-
Estructura E4 Columnas n = 30							
P	1,12	28,0	26,24	4,63	30,34	7,02	10,92
DS	0,12	1,27	2,76	0,32	5,88	1,11	0,61
CV (%)	10,4	4,6	10,5	6,9	19,3	15,8	5,64



Vigas n = 30

<i>P</i>	1,12	27,0	26,93	4,71	26,60	6,97	-
<i>DS</i>	0,08	1,49	2,16	0,31	2,33	0,53	-
<i>CV (%)</i>	7,6	5,4	8,0	6,6	8,8	8,9	-

De manera general, se aprecia como todos los valores de intensidad de corriente de corrosión (I_c) como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado resultaron mayores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. De acuerdo con los intervalos de clasificación establecidos por el Comité Técnico de RILEM, un nivel elevado de corrosión atmosférica existe en las cuatro estructuras (Tabla 2). Por tanto, es casi seguro que de acuerdo con los valores promedios de I_c en términos de vida útil, que las cuatro estructuras no hayan mantenido en el tiempo sus condiciones iniciales de V_{up} como son estética, funcionalidad y seguridad. Más bien, pudieran encontrarse en su vida útil de servicio, última o residual. Este resultado, se corresponde con los obtenidos en los estudios de inspección, evaluación y diagnóstico por corrosión que fueron ejecutados en estructuras emplazadas en varios cantones costeros pertenecientes a la provincia de Manabí Ecuador en zonas costeras de elevado potencial constructivo.

Sin embargo, llama la atención el resultado con relación a los valores promedios de los otros ensayos ejecutados. Se parte de la interpretación de los valores de porcentaje de porosidad capilar efectivo (ϵ) que como bien se conoce, es una variable, factor e indicador fundamental en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón para garantizar plazos elevados de V_{up} en las estructuras (Tabla 3). Parámetro incluso que su tendencia se basa en conocerlo a pie de obra, sin aparecer en la normativa de la construcción de cada país como variable rectora de la calidad del hormigón. No siendo así en países de América Latina como Cuba, Ecuador (Howland, et al, 2019; Marrero, et al, 2020) y los participantes en el proyecto DURACON. De acuerdo con los intervalos de clasificación exigidos en la RED DURAR todos los valores de ϵ en las columnas de las cuatro estructuras, cayeron en el intervalo entre 10-15% indicador de un hormigón de calidad moderada. Incluso, los valores obtenidos en las columnas de las estructuras E2 y E4 alrededor de 10% son indicativos de un hormigón durable (Tabla 3). Valores mayores que 15% típicos de una durabilidad inadecuada no fueron obtenidos. Por tanto, es casi seguro que los valores de I_c que indicaron una vida útil de servicio, última o residual no sean confiables.

Al interpretar el comportamiento de la constante de carbonatación (k_c), los valores indican un hormigón de

calidad moderada ($9 > k_c > 6$) para las columnas en la estructura E1, así como para ambos elementos estructurales en la E2 y E4. Una calidad baja ($k_c > 9$) es notada en las vigas de la estructura E1 y en ambos elementos en la E3. Por tanto, la V_{up} de las cuatro estructuras es afectada por el fenómeno de la carbonatación. Es de notar, como las columnas y vigas que mostraron una calidad moderada según los valores de la k_c fueron los que presentaron menores valores de ϵ indicativos de un hormigón de mejor calidad. (Tabla 3). En el caso de la V_{PU} pero los valores convertidos a m/s, a pesar de que la V_{up} en las estructuras pudiera estar afectada por la carbonatación como fue demostrado anteriormente y que las cuatro estructuras pudieran encontrarse en su vida útil de servicio, última y quizás residual, solamente el hormigón usado en las vigas de la estructura E1 mostró una calidad normal (2001-3000 m/s). Los otros entre una calidad elevada (3001-4000 m/s) y durable (> 4001 m/s), según los intervalos de clasificación exigidos en la RED DURAR CyTED (Tabla 3). Otra forma más de revisar los valores de I_c obtenido los cuales indicaron una vida útil de servicio, última o quizás residual. Sin embargo, este ensayo (V_{PU}) mostró ser necesario, pero no suficiente, en hormigones expuestos a una atmósfera costera-industrial ante categorías muy elevada (C5), extrema (CX) y mayor que extrema ($>CX$) de agresividad corrosiva de la atmósfera en el clima tropical costero de Cuba. Para una calidad elevada y durable como mismo sucedió en este estudio, la V_{up} de las estructuras no superó los cinco años. Se trató de hormigones de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 con espesores de recubrimiento de 20 y 40 mm y valores de ϵ alrededor de 13% y mayor que 15% respectivamente, elaborados teniendo en cuenta en su diseño de mezcla el logro de un porcentaje mínimo de vacío entre los agregados finos y gruesos, en presencia de una mezcla de consistencia fluida, es decir de una buena laborabilidad (Castañeda, et al, 2023 y 2024).

Por último, valores de R_c estimados del ensayo de Esclerometría resultaron mayores que 25 MPa. Es posible que se haya tenido en cuenta antes de proceder con las labores de construcción de las cuatro estructuras, el criterio establecido en la RED DURAR-CyTED (Tabla 3). Se basa en que los valores promedios de R_c al ser mayor que 20 MPa, es indicativo de un hormigón de buena calidad y durabilidad adecuada en cuanto al



diagnóstico estructural. Sin embargo, se demostró que este criterio no resultó factible con relación a los resultados obtenidos en los estudios de inspección, evaluación y diagnóstico por corrosión en las estructuras emplazadas a cortas distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas en los diferentes cantones costeros pertenecientes a la provincia de Manabí. Las estructuras analizadas, donde la corrosión atmosférica estuvo influenciada además de la carbonatación del hormigón por la concentración elevada de iones cloruro totales y solubles en la matriz de hormigón, se encontraron en sus vidas útiles última y residual sin funcionamiento social alguno. Valores mucho más elevados de I_c en comparación con los mostrados en este estudio fueron determinados principalmente en las columnas de las estructuras.

Todo parece indicar de manera general, que el hormigón usado en la construcción de las cuatro estructuras emplazadas en el cantón de Portoviejo, Manabí, presentó una calidad moderada y durable en algunas ocasiones, a pesar de que los valores de I_c resultaron mayores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ lo cual indica que las cuatro estructuras hayan dejado atrás sus condiciones iniciales de V_{up} como son estética, seguridad y funcionalidad, estando quizás las mismas en sus vidas útiles de servicio, última y residual. Esto hace entonces que el fenómeno de la carbonatación de por sí solo, no comprometa la V_{up} de las cuatro estructuras. Todo lo contrario fue mostrado en un estudio reciente ejecutado en Cuba, donde la presencia de concentraciones elevadas de iones cloruro totales, solubles y enlazados en la matriz porosa del hormigón en estructuras emplazadas en zonas costeras y urbanas, en este último caso los cloruros incorporados en el árido fino y en el

agua de amasado condujeron a un deterioro intenso y muy anticipado en las estructuras de hormigón armado estudiadas, encontrándose las mismas en su vida útil última y residual, además de la ocurrencia del fenómeno de la carbonatación y la eflorescencia en el hormigón (Castañeda y Hernández, 2024).

Observación visual. Comportamiento de la concentración de iones cloruro totales y solubles

Lo planteado anteriormente es confirmado con la observación visual de las cuatro estructuras E1, E2, E3 y E4 (Figura 9). Un deterioro intenso y anticipado en las vigas y principalmente en las columnas no fue observado. Por tanto, se continúa confirmando, que la carbonatación como factor influyente en la intensidad de corriente de corrosión indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, para nada compromete la V_{up} de las estructuras, a pesar de que los valores de I_c hayan resultado mayores que $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. De esta forma, se estima que las cuatro estructuras mantienen sus condiciones iniciales de V_{up} principalmente funcionalidad, seguridad y quizás con alguna disminución en su estética que para nada impide que las estructuras no aporten el beneficio social.

La primera condición para que se cumpla lo planteado anteriormente, es que las estructuras no estén emplazadas en una zona costera, más a cortas distancias desde la zona del rompiente de las olas con una gran influencia en la calidad del hormigón. Las cuatro estructuras se encuentran emplazadas a una distancia alrededor de 20 km desde la línea costera en dirección noroeste donde se encuentra el perfil costero de Manabí más cercano a la ciudad de Portoviejo.

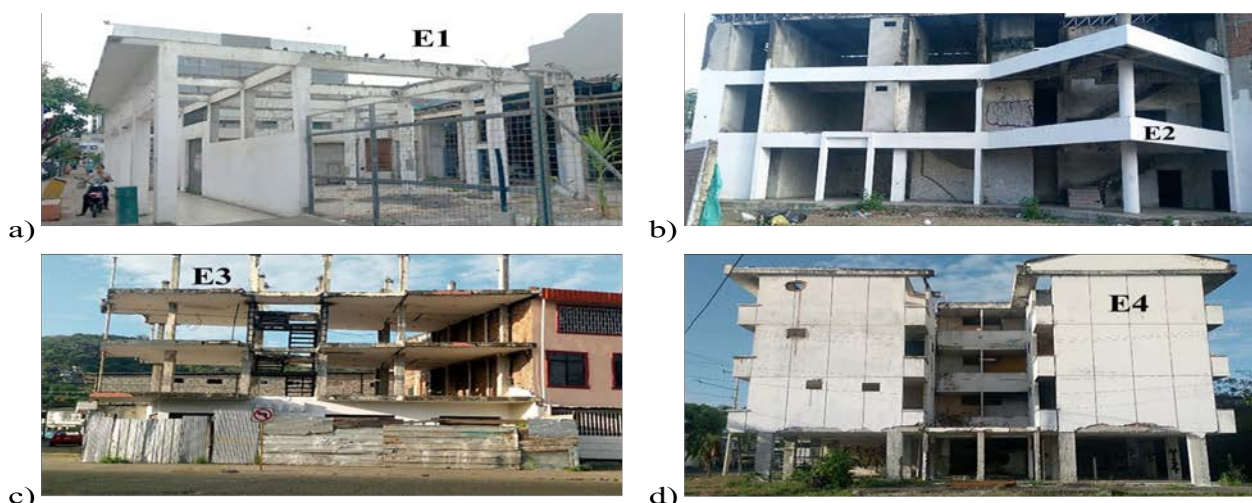


Fig. 9. Observación visual de las cuatro estructuras emplazadas en el cantón de Portoviejo, Manabí.

Esto significa que, como atmósfera urbana, no están expuestas directamente al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera. A tal punto que, los valores de concentraciones de iones cloruro totales (Cl_t) y principalmente los solubles (Cl_s) en las columnas (C) y vigas (V) resultaron muy bajos. En estos últimos menores que 0,05 (% m. h) (Figura 10). De esta forma, se continúa demostrando, que la corrosión atmosférica

en el acero de refuerzo es influenciada por la carbonatación sin comprometerse la V_{up} en cada una de las estructuras. Se trata del valor crítico de Cl_s -%m.h que más ha sido demostrado en la literatura de la especialidad capaz de iniciar y desarrollar el fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado (Ansgt, et al, 2019).

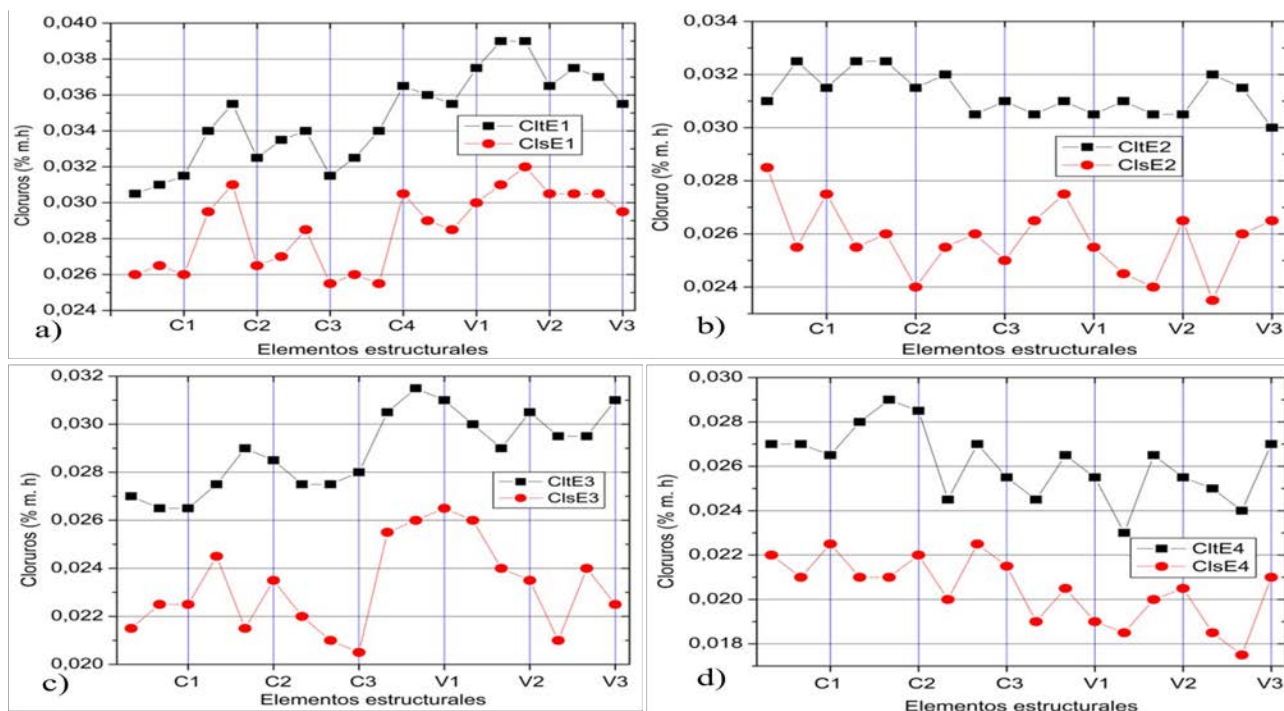


Fig. 10. Comportamiento de la concentración de iones cloruro totales y solubles en las columnas y vigas en las cuatro estructuras.

Por otra parte, los resultados de estudios de corrosión atmosférica realizados en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Cuba y Ecuador, demostraron que entre el 90-95% del total de la deposición de sales de iones cloruro en forma de disolución salina y no seca en forma de cristales de sales, quedaron depositadas hasta una distancia de 30 m, más con la existencia de las condiciones de apantallamiento (Castañeda, et al, 2018; Guerra et al, 2019, 2023 y 2024).

Se trata de las partículas salinas de mayor peso y tamaño originadas en la zona del rompiente de las olas. Esto hace, que se depositen en las zonas más bajas de los elementos estructurales principalmente en las columnas acelerando de manera considerable la corrosión atmosférica del acero de refuerzo principalmente en hormigones que presenten una calidad moderada y durabilidad inadecuada. Una concentración elevada de cloruros totales y solubles en

la matriz del hormigón fue demostrada. Las otras partículas salinas originadas en el interior del océano de menor peso y tamaño continúan su penetración hacia el interior de la tierra impactando en las estructuras emplazadas a grandes distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas sin ninguna influencia en la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo. Otros fenómenos ocurridos en el hormigón como la carbonatación y la eflorescencia influyeron en el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado.

La segunda condición se basa en que quizás el frente de carbonatación, es decir, la disminución del pH que tiende a ocurrir de 12,5 hasta 8 aproximadamente debido a la neutralización de la disolución alcalina presente en los poros del hormigón, identificado por la no coloración rosada, producto de las reacciones del CO_2 proveniente de la atmósfera con los compuestos



alcalinos del hormigón fundamentalmente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, no haya alcanzado las zonas de la interface entre el acero de refuerzo y el hormigón. En este caso la pasta de cemento endurecida donde tienden a formarse los poros capilares. De esta forma, el acero de refuerzo pudiera mantener las condiciones de pasivación, es decir, sin ser afectado por el fenómeno de la corrosión atmosférica. Como bien se conoce, cuando el frente de carbonatación llega a los aceros de refuerzo ocurre su despasivación originándose y desarrollándose la

corrosión atmosférica con una morfología generalizada como consecuencia de la disminución de pH de la disolución alcalina

Es de notar un ejemplo durante el ensayo de la carbonatación en una de las columnas para cada estructura E1, E2, E3 y E4, como la coloración rosada, la cual indica la presencia de un pH alcalino alrededor de 12 y 12,5 aparece en la zona de las interfaces acero de refuerzo/pasta de hormigón endurecida después de haber aplicado el indicador de la fenolftaleína (Fig. 11).

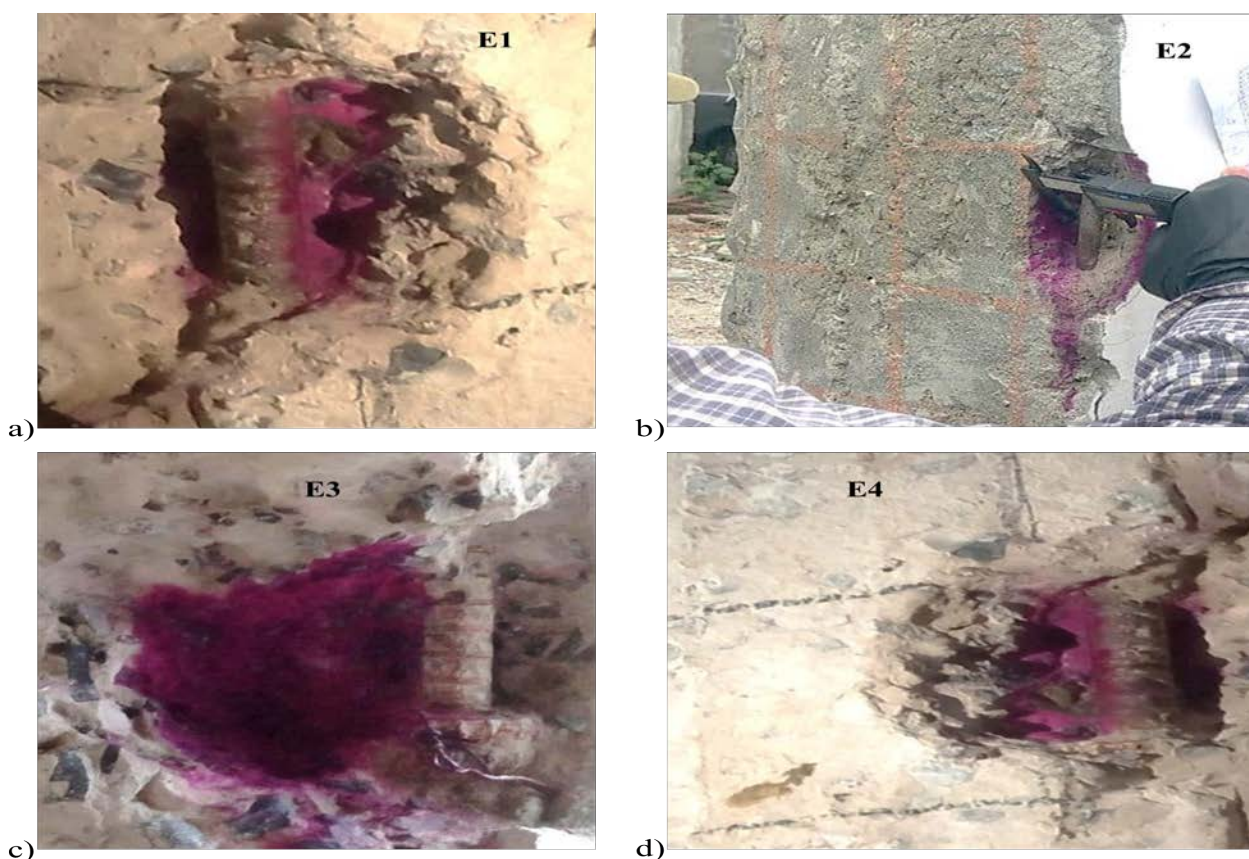
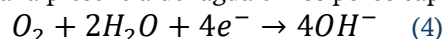


Fig. 11. Coloración rosada indicadora de la presencia de un pH alcalino en la interface acero de refuerzo/pasta endurecida de hormigón. Se nota como los aceros de refuerzo mantienen su pasivación.

Por otra parte, se nota como los aceros de refuerzo mantienen su condición de pasivación, es decir, la no existencia de una corrosión atmosférica de forma generalizada (Figura 11). De esta forma, se confirma que el frente de carbonatación, a pesar no ha alcanzado los aceros de refuerzo quizás en las columnas y vigas de las cuatro estructuras, a pesar de haber alcanzado valores elevados de X_c

El hecho de que la mayoría de los valores de I_c hayan resultado alrededor de $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ pudiera deberse a que la disolución alcalina en los poros capilares en la pasta

de cemento endurecida del hormigón presenta su conductividad, producto de la presencia de los iones de calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), los iones cloruro por muy baja que sea su concentración principalmente los solubles y el oxidrilo (OH^-) radical formado por un átomo de hidrógeno y otro de oxígeno a causa de la reducción catódica de este último (4) debido a la presencia del agua en los poros capilares:



Es evidente que la conductividad en un hormigón de calidad moderada y no durable expuesto a una

atmósfera costera sea mayor, como fue demostrado en los estudios a pie de obra ejecutados recientemente en estructuras emplazadas en varios cantones pertenecientes a la provincia de Manabí en zonas costeras de elevado potencial constructivo y no en zonas urbanas. Como se conoce, el hormigón gana el agua más rápido de lo que la pierde y una mayor cantidad se encuentra precisamente en la interface acero de refuerzo/pasta de cemento endurecida.

Factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión

A pesar de indicar que el fenómeno de la carbonatación de por sí solo no compromete la V_{up} en las estructuras analizadas. No está demás demostrar los factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión (I_c) como un indicador en la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

Para ambos elementos estructurales en la estructura E1, así como en las columnas de las estructuras E3 y E4, los valores ajustados por el método estadístico del análisis multivariado, permitieron demostrar como la disminución de la VPU resultó el factor más influyente en el incremento de la I_c . Los valores de la variable estadística ($V.E$) coeficiente de regresión (r) fueron los más cercanos a -1 (Tabla 4). Es evidente, que no se tenga en cuenta la disminución de la resistividad (ρ) como otro ensayo no destructivo debido a que los valores de I_c fueron determinados por el criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM (3) (Tabla 4). No obstante, su disminución contraria a la conductividad no deja de ser un factor muy influyente, sin descartar la influencia de la disminución de la R_c y el ϵ , así como un incremento en los factores que caracterizan la carbonatación como la X_c y la K_c . De manera general, se cumple la condición de que el nivel de significación $p < 0,05$ (Tabla 4).

Tabla. 4. Análisis multivariado donde se demuestran los factores influyentes en la I_c

Estructura E1. Columnas n=40							
	VE	Rc (MPa)	ρ (k Ω .cm)	VPU (km/s)	Xc (mm)	Kc (mm/años0,5)	ϵ (%)
Ic (μ A/cm2)	r	-0,76	-0,98	-0,95	0,90	0,90	0,95
	p	0,0000					
	Vigas n=30						
	r	-0,66	-0,99	-0,84	0,70	0,70	-
	p	0,0000					
Estructura E3. Columnas n=30							
Ic	r	-0,37	-0,99	-0,49	0,0006	0,0012	0,44



Estructura E4. Columnas n=30							
($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	p	0,042	0,0000	0,0054	0,99	0,99	0,01
I_c ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	r	-0,02	-0,99	-0,40	0,58	0,48	0,29
	p	0,89	0,0000	0,02	0,0008	0,007	0,10

Para ambos elementos estructurales, pero en la estructura E2 y las vigas de las estructuras E3 y E4 el ajuste de todas las regresiones lineales múltiples demostraron también la influencia en cuanto a la disminución de la VPU de conjunto lógicamente con la resistividad (ρ). Sin descartar un incremento de la X_c y la K_c en las vigas de la estructura E2 (Tabla 5).

De manera general, el comportamiento y los valores de los ensayos no destructivos, principalmente la VPU , mostraron una influencia mayor en la I_c . Como bien se conoce la VPU es una técnica o ensayo no destructivo que permite evaluar la calidad del hormigón armado a pie de obra y en laboratorio. Más si la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo es influenciada por el fenómeno de la carbonatación y quizás no por la concentración de iones cloruro primordialmente los

solubles. Por otra parte, es una técnica que permite expresar la homogeneidad del hormigón indicando la presencia de fisuras, huecos y coqueras. Valores elevados como los mostrados en este estudio indicaron una calidad entre moderada y durable en el hormigón como fue demostrado anteriormente. De esta forma, es un ensayo que debe ser usado no solo en la patología de las estructuras sino también en la profilaxia, es decir, todas las medidas que deben ser tomadas antes y en las labores de construcción principalmente en la tecnología del hormigón para que las estructuras mantengan en el tiempo sus condiciones iniciales de V_{up} . Se trata de una buena elaboración, transportación, colocación, compactación, curado y acabado del hormigón. Aspecto en la tecnología del hormigón no muy usado en ocasiones en las labores de construcción (Howland, 2013; Howland y Castañeda, 2017).

Tabla 5. Regresiones lineales múltiples ajustadas en las estructuras.

Estructura E2. Columnas n=30			
Regresión	R2 (%)	p	
$I_c = 2,32 - 0,017[VPU] - 0,045[\rho]$	99,77	0,0000	
Estructura E2. Vigas n=30			
$I_c = 2,28 - 0,002[VPU] - 0,04[\rho] + 0,08[X_c] + 0,35[K_c]$	99,86	0,0000	



Estructura E3. Vigas
n=30

$$Ic = 4,69 - 0,006[VPU] - 0,18[\rho] \quad 99,77 \quad 0,0000$$

Estructura E4. Vigas
n=30

$$Ic = 2,07 - 0,003[VPU] - 0,03[\rho] \quad 98,93 \quad 0,0000$$

El ensayo de *VPU* últimamente está siendo muy usado en estudios de inspección, evaluación y diagnóstico con vistas a demostrar la vida útil en que se pudieran encontrar las estructuras emplazadas en zonas urbanas y rurales. Incluso, el ensayo ha sido utilizado en elementos estructurales de madera como fue el caso de la Torre del Reloj, ubicada en la plaza urbana Arturo Prat de Iquique – Chile (Ortiz, et al, 2018).

Esta técnica o ensayo no destructivo ha sido usada para demostrar la influencia del espesor de juntas de morteros en la capacidad de resistencia de la mampostería de ladrillo bajo cargas de compresión (Monteagudo, 2015). Recientemente un estudio patológico usando ensayos no destructivos permitió demostrar la eficacia de la *VPU* en las estructuras de hormigón armado emplazadas en una zona urbana, permitiendo tomar decisiones inmediatas con el propósito de devolverle sus condiciones iniciales de *Vup* (Ergueta, et al, 2024). Otro estudio también reciente demostró como la integración de los ensayos no destructivos como la Esclerometría y la propia *VPU* permitió estimaciones seguras y precisas en elementos estructurales de hormigón armado en presas de volúmenes elevados de almacenamiento de agua potable (Kairu, et al 2025). El ensayo de *VPU* resultó vital en un estudio basado en la simulación de manifestaciones patológicas en muros a través de hormigones elaborados con diferentes adiciones de polímero sintético, proponiendo obtener modelos de predicción de resistencia y rigidez (Silva y Bertoldo, 2022).

Por otra parte, el ensayo fue utilizado para la estimación de la profundidad de fisuras, así como en la evaluación de la capacidad de detección de fallas en diferentes tipos de hormigones expuestos en zonas urbanas (Lorenzi, et al, 2017; Silva, et al, 2019). Ha sido muy usado también en estudios de patología y diagnóstico en estructuras antiguas y patrimoniales de hormigón armado las cuales se encuentran emplazadas en zonas urbanas

(Boccacia, et al, 2024). Como bien se conoce, ensayos destructivos no son autorizados en estos tipos de estructuras por su elevada significación patrimonial, emplazadas en sitios históricos muy visitados en cualquier país.

CONCLUSIONES

Un estudio sobre la vida útil fue ejecutado en cuatro estructuras de hormigón armado, emplazadas en una zona urbana del cantón de Portoviejo, provincia de Manabí Ecuador. Técnicas de análisis o ensayos no destructivos como la Esclerometría para la estimación de los valores de Resistencia a la compresión (*Rc*), resistividad (ρ) para el cálculo de la intensidad de corriente de corrosión (*Ic*) como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo y la velocidad de pulso ultrasónico (*VPU*) fueron utilizadas en elementos estructurales como columnas y vigas en cada una de las estructuras. Sin descartar el uso de ensayos destructivos como la determinación de la profundidad de carbonatación (*Xc*) permitiendo calcular los valores de la constante de carbonatación (*Kc*) y el porcentaje de porosidad capilar efectivo (ϵ). Los resultados permitieron estimar, que las cuatro estructuras se encuentran en su vida útil de proyecto (*Vup*), sin llegar quizás a sus vidas útiles de servicio, última y residual confirmado con la observación visual. Todo parece indicar, que los valores de *Ic* no resultaron confiables. Se demostró, la posibilidad de que la ocurrencia del fenómeno de la carbonatación de por sí solo en las columnas y vigas, no comprometieron la *Vup* de las estructuras debido a que dos condiciones fundamentales fueron demostradas. La primera, la no presencia de una concentración elevada de concentración de iones cloruro principalmente solubles, debido a que las cuatro estructuras se encuentran emplazadas en una zona urbana a grandes distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas. La segunda, que el frente de carbonatación, no alcanzó



la zona de interface acero de refuerzo/pasta endurecida de hormigón armado. De acuerdo con los resultados de los ensayos principalmente los valores de *VPU*, se pudo demostrar que el hormigón usado presentó una calidad entre moderada y durable, influyendo en que las columnas y vigas de las cuatro estructuras, no hayan mostrado un deterioro anticipado en el tiempo producto de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. El comportamiento y los valores de los ensayos no destructivos, principalmente la *VPU*, mostraron una influencia mayor en la *Ic*.

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.
- Andrade, C., y col., Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón. Reparación, Refuerzo y Protección. **Editorial CyTED, Sao Paulo, Brasil, 2003.**
- Haque, M, N., Al-Khaiat, H., John, B., Climatic zones. A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf. **Revista Building and Environment. 42, (2007) 2410–2416.**
- M. G. Alexander (2018) “Diseño y modelado de vida útil de estructuras de hormigón: antecedentes, desarrollos e implementación”, Revista ALCONPAT, 8 (3), pp. 224 245.
- Alexander, M. G., Bentur, A., Mindess, S. (2017), “Durability of Concrete: Design and Construction”. CRC Press, Taylor & Francis Group, U.K.
- Castañeda, F. Corvo, J. J. Howland, R. Marrero, and D. Fernández, Reinforced Concrete: Design, Performance and Applications. Chapter 4 Atmospheric Corrosion of Steel Reinforced Concrete in a Coastal City Located in a Tropical Island. Series: Construction Materials and Engineering Binding: Softcover Pub. Date: 2017 1st Quarter Pages: 6x9 (NBCR) ISBN: 978-15-3610-75-24 Status: AN. Nova Science Publishers, Inc. USA. Publicado en SCOPUS.**
- Juan Carlos Guerra. "Study of the durability performance of concrete in the coastal profile of Manabí, Ecuador. Technical University of Manabí, Ecuador. Defended on July 6, 2023. Faculty of Civil Engineering TECHNOLOGICAL UNIVERSITY OF HAVANA.
- 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.**
- EHE. EHE-08. Instrucción del hormigón estructural. España: Suplemento del Boletín Oficial del Estado N° 203; 2008.
- Castro, Borges, P; Balancán, Zapata, M; López, González, A; Córdova-Quintal, M.; Inspección de una losa de 70 años de un edificio en el Golfo de México. Revista ALCONPAT, Volumen 4, Número 3, Septiembre- Diciembre 2014, Páginas 202 – 210.
- A. M. Carvajal, R. Vera, F. Corvo and **A. Castañeda.** Diagnosis and rehabilitation of real reinforced concrete structures in coastal areas. REVISTA CORROSION ENGINEERING, SCIENCE AND TECHNOLOGY. UK. Vol. 47. No.1. 2011.
- Costa, R., Franchetto, A., Gouveia, A., Ziegler, F., Pessoa, K., Garcez, M. (2022), "Predicción de la vida útil de estructuras en concreto a partir de modelos para el avance del frente de Revista ALCONPAT, 12 (1), pp. 47 – 60.
- Ebensperger, L; Donoso, J, P.; New methodology for assessment of reinforced concrete structures with non-destructive testing. Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol. 36, N°2, 2021.
- Eudoro, Moreira, F; Guerra, Mera, J, C.; Análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en una zona costera de Manta, Manabí Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (publicación continua): 078-086. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.
- Pérez, Véliz, J, A; Guerra, Mera, J, Carlos.; Evaluación de la durabilidad en elementos estructurales de hormigón armado en estructuras emplazadas en Manta Manabí, Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (Publicación continua): 179-195. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442.
- Rincón Zambrano, D, A., Guerra, Juan Carlos., Análisis de afectaciones por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en crucita, Portoviejo, Manabí Ecuador. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 56. (publicación continua): 001-023. Año. 2025. e-ISSN: 2221-2442.



- Navarino Guerrero Zambrano, J, *y col.*; Evaluación del deterioro por corrosión atmosférica en estructuras de hormigón armado en una zona costera de Pedernales, Manabí Ecuador. Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA. Pruebas de Galera, 2025.
- Trocónis, O.; Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil, 1997.
- Andrade, C; Alonso, C; Gulikers, R; Polder, R; Cigna, Ø; Vennessland, M; Salta, A; Elsener, B.; Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method. RILEM TC 154-EMC: 'Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion' Recommendations. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, Vol. 37, pp 623-643. November 2004.
- Castro, P., Sanjuán, M, A., Genesca, J., Carbonation of concretes in the Mexican Gulf. **Revista Building and Environment. 35, (2000), pp. 145-149.**
- Norma ASTM C-1218/M: 2008. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.
- A. Castañeda, C. Rivero, F. Corvo** Assessment of corrosion protection systems in the rehabilitation of structures built in sites of high corrosive aggressiveness in Cuba. CHILE CONSTRUCTION JOURNAL. Volumen 11. No 3, pp 49-61. 2012.
- 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. WORK CONCEIVED WITH THE NATIONAL AWARD FOR TECHNOLOGICAL INNOVATION. YEAR 2018. Revista CENIC JOURNAL, EBESCO, CHEMICAL SCIENCES, Vol. 50 (1), pp. 10-21. Year 2019.
- Rigoberto Marrero Águila, **Abel Castañeda Valdés**, Juan José Howland Albear, Cecilia Valdés Clemente, Francisco Corvo Pérez. Lilia González Ortega, Brenda McNeil Montañés, Juan Carlos Guerra Mera. Study on protection of construction materials exposed to the tropical coastal climate of Cuba. Journal ANNALS OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF CUBA. Vol. 10, pp.183-186. Year 2020.
- 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.
- 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.
- Castañeda, Valdés, A; Hernández, Oroza, A.; Concentración de iones cloruros en el hormigón armado expuesto a diferentes condiciones y medios de exposición en Cuba. Rev. CENIC Cienc. Quím.; Vol. 55. (publicación continua): 161-178. Año. 2024. e-ISSN: 2221-2442
- Ueli M. Angst, et al. The effect of the steel-concrete interface on chloride-induced corrosion initiation in concrete: a critical review by RILEM TC 262-SCI. Materials and Structures. Volume 52, article number 88, (2019)
- 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, J, C; Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Rodríguez J.; Atmospheric corrosion of low carbon steel in a coastal zone of Ecuador: Anomalous behavior of chloride deposition versus distance from the sea. Materials and Corrosion; 70: 444-460; 2019.
- Guerra, Juan Carlos; Castañeda, Valdés, Abel; Goretty, Pin, Mera, Miriam; Monserrate, Pin, Palma, Melissa; Leonor, Pisco, Suarez, Jennifer.; Corrosividad de la atmósfera sobre el acero al carbono en una zona costera del cantón de Manta Manabí, Ecuador. Revista CENIC, CIENCIAS QUÍMICAS, Vol. 54 (publicación continua), pp. 166-183. Año 2023a.
- Juan Carlos Guerra Mera, Angel Ramón Sabando García, Miriam Goretty Pin-Mera, Joan Manuel Rodríguez Díaz, **Abel Castañeda Valdés.**; Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9 (2024) 100703.



- Howland, J. J., Tecnología del hormigón para ingenieros y arquitectos. Editorial Félix Varela, La Habana, 2013.
- Juan José Howland, Abel Castañeda. The aggressivity coastal environment of Havana and its impact on reinforced concrete structures. Editorial Nuevo Milenium. Technical Scientific Seal. ISBN: 978-959-05-1026-7. Havana, Cuba, Year 2017.
- Ortiz. Osvald, 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 vol.18 No.2 Santiago jul. 2019.
- Monteagudo, Silvia M.; Influencia del espesor de la junta de mortero en la capacidad de resistencia de la mampostería de ladrillo bajo cargas de compresión: una evaluación de ultrasonido. Revista de la Construcción, 2015, 14(1).
- Ergueta, G. A.; Quino, M. V. (2024), "Estudio patológico empleando ensayos de ultrasonido aplicado a estructuras en construcción", Revista ALCONPAT, 14 (1), pp. 82 – 95.
- Wilson M. Kairu, Siphila W. Mumenya, Kenneth D. Njoroge and Ian M. Kaniu.; Application of schmidt hammer and ultrasonic pulse velocity for structural integrity assessment in water dam. J Infrastruct Preserv Resil.
- 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.
- 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.
- 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 concreto".
- Boccaccia, G; Frascosa, F; Bertolind, Ch; Maria Siani A.; Diagnosis of Historic Reinforced Concrete Buildings: A Literature Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques. Procedia Structural Integrity 55 (2024) 160–167.

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Juan Daniel Pacheco Delgado: Autor principal. Gestor de las estructuras para la realización del estudio Responsable de la ejecución de las mediciones en las estructuras. Acumulación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición).

Juan Carlos Guerra Mera: Ejecutor de la modelación estadística. Elaboración de tablas y gráficos. Actualización y revisión final del artículo

Raúl Vinicio Hidalgo Zambrano: Actualización y revisión final del artículo

Los autores no declaran conflictos de intereses.

