

## DIAGNÓSTICO ESTRUCTURAL EN TRES ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO EMPLAZADAS EN LA PARROQUIA COLÓN, PORTOVIEJO MANABÍ, ECUADOR

### STRUCTURAL DIAGNOSIS OF THREE REINFORCED CONCRETE STRUCTURES LOCATED IN THE PARISH OF COLÓN, PORTOVIEJO MANABÍ, ECUADOR

Gabriel Marcelo Moreira Centeno <sup>a</sup> (0009-0006-7635-4157)

Juan Carlos Guerra Mera <sup>b,\*</sup> (0000-0001-6597-0022)

<sup>a</sup> Instituto de Posgrado. Universidad Técnica de Manabí (UTM).

<sup>b,\*</sup> Universidad Técnica de Manabí (UTM). Avenida Urbina y Portoviejo 130105, Manabí, Ecuador.

<sup>b,\*</sup> juan.guerra@utm.edu.ec

Recibido: 17 de octubre de 2025;

Aceptado: 19 de diciembre de 2025;

#### RESUMEN

El diagnóstico estructural fue ejecutado en tres estructuras de hormigón armado emplazadas en una zona urbana de la parroquia Colón perteneciente al cantón de Portoviejo, Manabí Ecuador. Cinco elementos estructurales entre columnas y vigas fueron seleccionados. Ensayos no destructivos y destructivos fueron usados. Debido a la amplia data obtenida, un análisis de varianza, así como el comportamiento de los 10 valores de cada ensayo determinados en los elementos fue usado para demostrar la calidad del hormigón usado, así como la definición del tipo de vida útil de las tres estructuras. El ajuste de modelos de regresiones lineales y lineales múltiples, permitieron demostrar los factores más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en cada uno de los elementos estructurales. Se demostró, que la calidad del hormigón armado usado como un indicador de su durabilidad resultó inadecuada. Las tres estructuras pudieran haber alcanzado su vida útil última y residual. La observación visual de los elementos estructurales de las tres estructuras demostró todo lo contrario. Se continúa confirmando, que la influencia del fenómeno de la carbonatación, no compromete la vida útil de las estructuras, siempre y cuando las mismas estén emplazadas en zonas urbanas y rurales. Los factores más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en cada uno de los elementos estructurales fueron, la constante de carbonatación, el porcentaje de porosidad capilar efectivo y la concentración de iones cloruro solubles. Se demostró que este segundo factor, muy importante en la evaluación de la calidad y durabilidad del hormigón no fue tenido en cuenta en otros estudios de diagnóstico ejecutados anteriormente en estructuras emplazadas en zonas costeras de Manabí. Las sales de iones cloruro procedentes desde el interior del océano y depositadas en forma de disolución salina en las estructuras emplazadas a grandes distancias desde la línea costera y que penetran por la matriz del hormigón que presentan un porcentaje elevado porosidad capilar como sucedió en todos los elementos estructurales de las tres estructuras, pudieran ejercer su influencia en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

**Palabras claves:** Diagnóstico, elementos estructurales, estructuras, corrosión atmosférica, hormigón armado

#### ABSTRACT

The structural diagnosis was carried out on three reinforced concrete buildings located in an urban zone of the Colón parish belonging to the canton of Portoviejo, Manabí, Ecuador. Non-destructive and destructive tests were used. Due to the extensive data obtained, an analysis of variance, as well as the behavior of the 10 values of each test determined in the elements, was used to demonstrate the concrete quality used, as well as the definition of the type of service life of the three buildings. The fitting of linear and multiple linear regression models allowed us to demonstrate the most influential factors in the atmospheric corrosion of reinforcement steel in each of the structural elements. It was demonstrated that reinforced concrete quality used was inadequate as an indicator of its durability. The three buildings may have reached their final, residual service life. Visual observation of the structural elements of all three buildings showed otherwise. It continues to be confirmed that the carbonation phenomenon influence does not compromise the service life of buildings, as long as they are located in urban or rural zones. The most influential factors in the atmospheric corrosion of reinforcement steel embedded in reinforced concrete in each of the structural elements were the carbonation constant, the effective capillary porosity percentage and the concentration of soluble chloride ions. It was shown that this second factor, which is very important in the concrete quality evaluation and durability, was not taken into account in other diagnostic studies previously carried out on structures located in coastal zones of Manabí. Chloride ion salts originating from the interior of the ocean and deposited in saline solution form in structures located at great distances from the coastline and penetrating the concrete matrix, which has a high effective capillary porosity percentage, as occurred in all the structural elements of the three buildings, could influence the atmospheric corrosion of the reinforcement steel embedded in the reinforced concrete.

**Keywords:** Diagnosis, structural elements, buildings, atmospheric corrosion, reinforced concrete.



## INTRODUCCIÓN

La evaluación del diagnóstico estructural en las estructuras de hormigón armado, se basa en un estudio en la ingeniería civil ejecutado generalmente a pie de obra y a corto plazo (Helene, et al, 1996). Como bien se conoce, los síntomas mayores y más abundantes de deterioro anticipado en el tiempo debido al origen y desarrollo del fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, tienden a ocurrir en las estructuras emplazadas en zonas costeras consideradas como de elevado potencial constructivo (Castro, et al, 1998). No deben descartarse las estructuras emplazadas en zonas urbanas. Incluso, hasta la zona rural pudiera identificarse también como de elevado potencial constructivo, debido a la gran cantidad de estructuras existentes. La industria del turismo ecológico se destaca en esta zona por el amplio ecosistema.

En el ámbito de la ingeniería civil, se trata también de una evaluación exhaustiva del estado de las estructuras. Permite saber si una construcción ya sea edificación o no, puede soportar las cargas previstas para garantizar su seguridad y funcionalidad en función del tiempo. El estudio implica un análisis detallado del comportamiento de la resistencia mecánica, física y química a partir de la ejecución de diferentes ensayos, así como la estabilidad de las estructuras bajo diversas condiciones de cargas y fuerzas (Carvajal, et al, 2011).

De acuerdo con varios estudios de corrosión atmosférica, así como de diagnóstico estructural ejecutados en los perfiles costeros de Manabí Ecuador a partir del año 2015, muchas estructuras de hormigón armado se encuentran muy afectadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado (Moreira y Guerra, 2024; Pérez y Guerra, 2024; Rincón, et al, 2025; Guerrero, et al, 2025). Categorías o niveles de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera en dicha zona oscilaron entre elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX) para el acero al carbono (Guerra, et al, 2016, 2019, 2023 y 2024). Actualmente, se está ejecutando un proyecto de investigación de corrosión atmosférica en los perfiles costero de dicha provincia, con el propósito de demostrar el impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera en otros materiales metálicos muy usados también en la industria de la construcción y fabricación como son el acero galvanizado, cobre y aluminio con sus correspondientes aleaciones en los dos últimos.

La existencia de las categorías mencionada anteriormente que condicionan un impacto elevado del ambiente agresivo costero de la atmósfera para el acero al carbono e influyentes en el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado en las zonas costeras, ha motivado la ejecución de los estudios precedentes basados en la evaluación de la durabilidad de elementos estructurales, afectaciones y deterioro por corrosión atmosférica en las estructuras. Por otra parte, otros estudios ejecutados en Cuba también en zonas costeras de elevado potencial constructivo, han mostrado valores de corrosión atmosférica anual mayores que los límites máximos establecidos en la normativa de la especialidad para el acero al carbono estudiado y el cobre para una categoría de agresividad corrosiva de la atmósfera extrema. Una categoría superior a extrema (>CX) para ambos materiales metálicos se viene proponiendo (Castañeda, et al, 2023). Un gran número de estructuras se encuentran muy dañadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. No cabe duda, que el impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera es un factor influyente (Castañeda, et al, 2011).

Por otra parte, categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera entre baja (C2) y media (C3) han sido obtenidas en Cuba y Ecuador, así como a nivel mundial en zonas urbanas principalmente (Corvo, et al, 2008; Guerra, et al, 2023 y 2024). Sin embargo, un deterioro, pero quizás no muy acelerado y anticipado en el tiempo, pudiera existir también en las estructuras en comparación con una zona costera. Por tanto, la realización de estos tipos de estudios basados en la evaluación del diagnóstico estructural de las estructuras en zonas urbanas se le debe prestar también una mayor atención.

De manera general en cuanto a los estudios de diagnóstico estructural, los resultados permitirán demostrar el estado en que se encuentran las estructuras con relación a la durabilidad del hormigón y si han mantenido en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto como son estética, seguridad y funcionalidad. Además, se demostraría si las estructuras al dejar atrás su vida útil de proyecto se encuentren en su vida útil de diseño, última o desgraciadamente residual sin ningún funcionamiento social. De esta forma, se procedería con un esquema seguro y factible desde el punto de vista económico a la hora de ejecutar los trabajos de mantenimiento y reparación (Alexander, 2018).

En ocasiones, los estudios de diagnóstico estructural se centran en el comportamiento de las cargas sometidas en sus elementos estructurales (vigas, ménsulas y columnas). Esta tendencia ocurre generalmente cuando las



estructuras se encuentran emplazadas en zonas urbanas y rurales. Sin embargo, la influencia de la corrosión en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado ya sea atmosférica influenciada por la carbonatación producto del impacto del ambiente agresivo, clasificada la atmósfera precisamente como urbana o rural, al uso de un hormigón elaborado con arena de mar, la infiltración del agua principalmente la de lluvia que lixivia la reserva alcalina del hormigón en las estructuras provocando el fenómeno de la eflorescencia, no son tenidas en cuenta en estos estudios (Escobar, et al, 2023). Generalmente, una tecnología del hormigón correcta en cuanto a su elaboración, transportación, colocación, compactación, curado y acabado a pie de obra lo cual conduce a una calidad adecuada de este apreciado material, el más usado en la industria de la construcción, tampoco es tenida en cuenta como otro factor influyente en el deterioro anticipado, a la hora de proceder con las labores de construcción (Howland, 2013).

Para esto estudios, técnicas o ensayos no destructivos vienen siendo muy utilizados en la actualidad a pie de obra. Sin embargo, los ensayos destructivos, al menos los mínimos no deben ser descartados. Siempre con el propósito de tener un mayor número de datos posibles que permitan conocer de una forma más profunda los síntomas patológicos de las estructuras a la hora de ejecutar los estudios de evaluación del diagnóstico estructural. No se trata de una destrucción elevada en los elementos estructurales. Más bien mínimas en zonas no visibles en las estructuras a la hora de ejecutar estos ensayos. Los daños mínimos que quedan, además de no afectar la estética y la funcionalidad de las estructuras, pudieran ser resarcidos en un espacio de tiempo muy breve casi sin ningún costo económico.

La evaluación del diagnóstico estructural en tres estructuras de hormigón armado emplazadas en la parroquia de Colón ubicada aproximadamente en las coordenadas 1°03'16"S; 80°27'16"O, correspondientes a la ciudad de Portoviejo, Ecuador es el objetivo general de este trabajo investigativo. Debido a la gran distancia desde la línea costera por el noroeste y por el oeste (~ 50 km), es casi seguro que las estructuras se encuentran emplazadas en una zona urbana.

Los objetivos específicos se basaron en, demostrar la calidad del hormigón armado usado en las tres estructuras como un indicador de su durabilidad. Definir el tipo de vida útil en que pudieran encontrarse las tres estructuras. Por último, demostrar los factores más influyentes que dieron lugar al fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

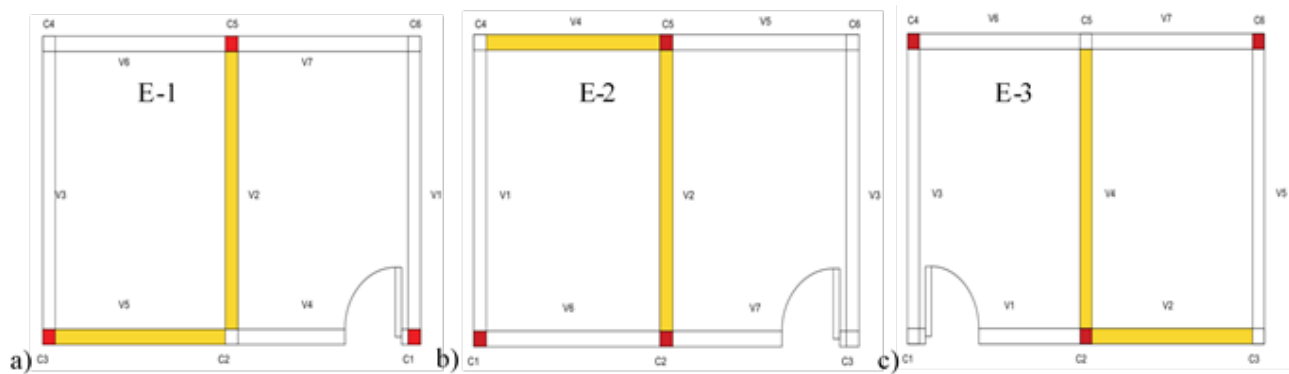
Ensayos no destructivos en el hormigón armado basados en la medición de la Resistividad Eléctrica para el cálculo indirecto de la Intensidad de Corriente de Corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. La Esclerometría como un indicador indirecto de la Resistencia a la Compresión, así como la Velocidad de Pulso Ultrasónico, fueron usados de conjunto con ensayos destructivos. Estos últimos consistieron en la determinación de la Profundidad y Constante de Carbonatación, así como el Porcentaje de Porosidad Capilar efectivo. Más las determinaciones del perfil de penetración de iones cloruro totales y solubles. Ambos tipos de ensayos fueron ejecutados en columnas y vigas seleccionadas en las tres estructuras. Se trata de elementos estructurales que garantizan la resistencia y la estabilidad de las estructuras. La amplia data obtenida permitió darles cumplimiento a los objetivos ingenieriles definidos.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

### Selección de las tres estructuras de hormigón armado

Tres estructuras de hormigón armado en una zona rural de la parroquia fueron seleccionadas. Los ensayos no destructivos y destructivos fueron ejecutados en elementos estructurales como columnas (C) y vigas (V) (Fig. 1 a), b) y c). Para la estructura E-1, las columnas C-1, C-3, C-5 y las vigas V-2 y V-5 (Fig. 1 a). Columnas C-1, C-3, C-5 y vigas V-2 y V-4 para la estructura E-2 (Fig. 1 b). En el caso de la estructura E-3, las columnas C-1, C-3, C-5 y las vigas V-2 y V-4 (Fig.1 C).





**Fig. 1.** Planos elaborados en el programa AutoCad que permiten la identificación de las columnas y vigas en las tres estructuras donde fueron ejecutados los ensayos.

Se trata de edificaciones de un solo nivel, es decir de un solo piso. 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 tres 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.

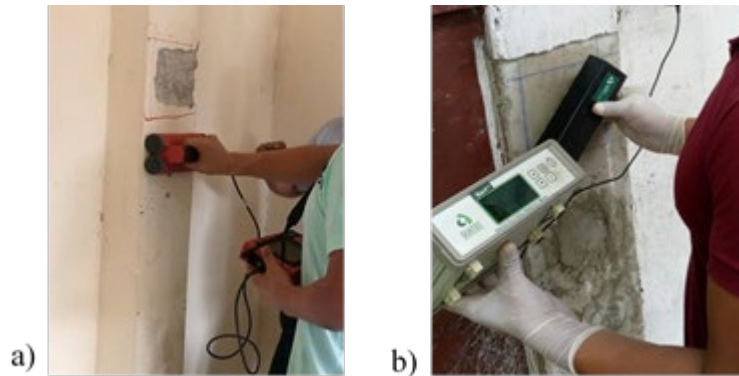
### Resistividad Eléctrica Aparente

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 tres estructuras. De esta forma, se evita falsear el resultado obtenido. Seguidamente, en la zona donde se detectaron los aceros de refuerzo, una línea azul con un lápiz cristalográfico fue trazada para la no ejecución de las mediciones de  $\rho$  (Fig. 2 a).

Para las mediciones de la Resistividad Eléctrica Aparente ( $\rho$ -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  $\rho$  en el hormigón basado a partir del método de las cuatro puntas en condiciones de laboratorio o a pie de obra (Figura 2 b). 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  $\rho$  en k $\Omega$ /cm:

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

El valor de  $a$  (cm), es la distancia entre los electrodos y representa la profundidad a la cual puede ser medida la  $\rho$ , 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 tres 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. 2.** Detección de los aceros de refuerzo a) Medición de la  $\rho$  en  $k\Omega/cm$  b) en una columna seleccionada de las tres 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 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 calibración 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  $\rho$ , es decir, donde no hubo presencia de aceros de refuerzo (Fig. 3).



**Fig. 3.** 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 de los 10 valores de  $R_c$  los cuales fueron graficados para cada columna y viga en las tres 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  $0^0$  (Fig. 3).

### 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 (Fig. 4) (Troconis, et al, 1997). Al realizar las mediciones en la misma zona donde fueron ejecutadas las de  $R_c$  y  $\rho$ , es evidente la no presencia de aceros de refuerzo.



**Fig. 4.** Ejemplo de medición de la VPU en una de las columnas.

El ensayo consistió en medir el tiempo (en  $\mu s$  convertido a s) fijado en la pantalla del equipo que tarda la onda ultrasónica (frecuencia entre 20 y 150 kHz) en recorrer la distancia fijada entre los transductores. Esta distancia varió en dependencia de las columnas y las vigas para cada construcción. En la estructura E-1 en ambos elementos estructurales, la distancia fue de 25 cm. Para las estructuras E-2 y E-3, de 20 cm. 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 tres 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  $\mu s$ , 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.

#### 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  $\rho - \Omega/cm$ ) 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):

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

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 tres estructuras seleccionadas.

**Tabla 1.** 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

### 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  $\rho$ . 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, una disolución de fenolftaleína al 1% antes de un tiempo muy inferior a los 15 minutos fue aplicada. 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-rozada, 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 (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  $X_c$ -cm fueron determinados en cada elemento y sirvieron para el cálculo de los valores de la constante de carbonatación ( $k_c$ -mm/años<sup>0.5</sup>) teniendo en cuenta el año de construcción de cada estructura ( $t$ -año) a partir de la expresión:

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

Los 10 valores de  $X_c$ -cm y  $k_c$ -mm/años<sup>0.5</sup> fueron graficados. Los valores promedio del  $k_c$  sirvieron para la clasificación en cuanto a la evaluación preliminar de la calidad del hormigón como un indicador de su durabilidad estructural en las tres 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 ( $mm/año^{1/2}$ )	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 ( $\varepsilon$ -%), muy importante en el diagnóstico estructural, 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  $\rho$  y Esclerometría. Siempre antes de los ensayos de carbonatación. Una máquina de extracción marca VEVOR, perforadora de hormigón de fabricación China, con una broca diamántica (Fig. 5) fue usada.





*Fig. 5. Máquina perforadora usada en la extracción de los testigos cilíndricos.*

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  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$  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 Esclerometría y  $\rho$ . 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. Diez muestras de 20 g de polvo por cada trozo 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 10 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.

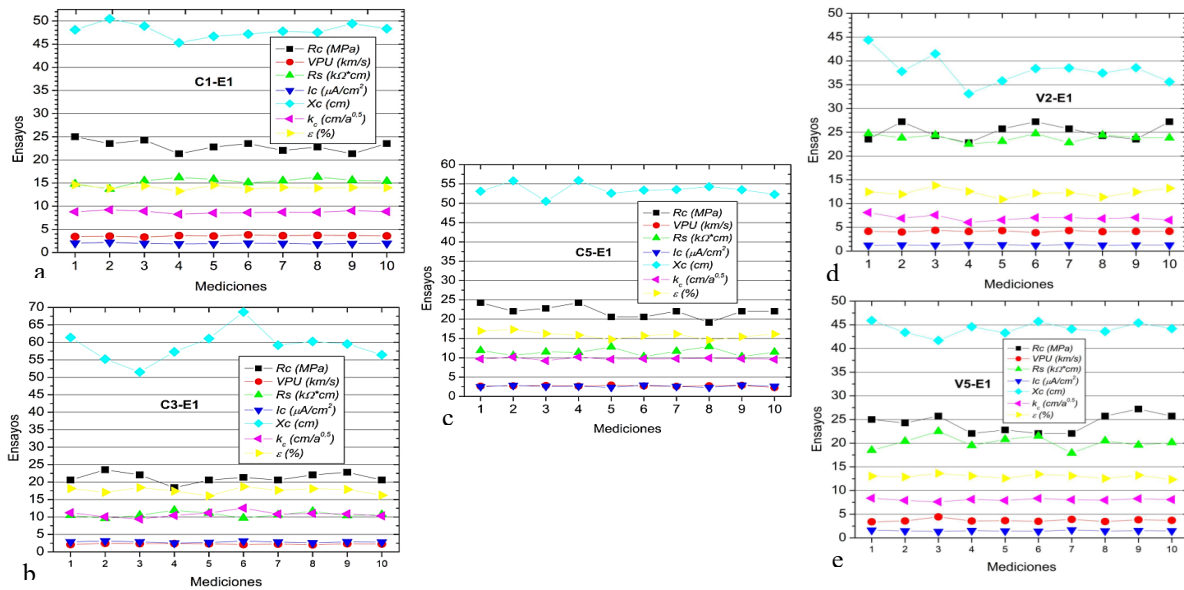
El análisis de varianza fue el primer método estadístico usado en este estudio. Como bien se conoce, se trata de una prueba estadística utilizada para comparar las medias de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas. En este caso consistió en cinco grupos basados en las tres columnas y las dos vigas seleccionadas en las tres estructuras a partir de los 10 valores determinados para un mismo ensayo destructivo y no destructivo.

El otro análisis estadístico se basó en el ajuste de regresiones lineales y lineales múltiples para cada elemento estructural seleccionado en las tres estructuras. Se tomó como variable dependiente la Intensidad de Corriente de Corrosión ( $I_c - \mu A/cm^2$ ). Las variables independientes fueron la  $\rho$ ,  $R_c$ ,  $VPU$ ,  $X_c$ ,  $k_c$  y  $\varepsilon$ . 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 tres estructuras**

El comportamiento de los 10 valores determinados en cada uno de los ensayos para los cinco elementos estructurales, es decir, las tres columnas (C) y las dos vigas (V) en las tres estructuras (E-1, E-2 y E-3) es mostrado (Figuras 6, 7 y 8, a-d) y Figura 9 a), b) y c). De manera general, se observa la variación baja que presentaron, confirmado con la determinación de los valores de la varianza (*V*) en cada uno de los elementos estructurales en las tres estructuras. Por tanto, los valores promedios calculados (*P*) de cada ensayo, constituyen un indicador eficaz en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón usado (Tablas 3, 4 y 5). Al hacer una caracterización por cada ensayo en cuanto a la calidad del hormigón a partir de los promedios, valores de *R<sub>c</sub>* estimados obtenidos de la Esclerometría no resultaron mayores que 25 MPa. Quizás se tuvo en cuenta, antes de proceder con las labores de construcción, el criterio establecido en la RED DURAR-CyTED basado en que, los valores promedio *R<sub>c</sub>* al ser mayor que 20 MPa, es indicativo de un hormigón de buena calidad y durabilidad adecuada en cuanto al diagnóstico estructural (Tablas 3, 4 y 5).



**Fig. 6.** Comportamiento de los 10 valores determinados en los ensayos para la construcción E-1.

**Tabla 3.** Valores de la varianza (*V*) y promedios calculados en cada uno de los elementos estructurales en la construcción E-1. Análisis de varianza.

Construcción E-1														
<i>R<sub>c</sub></i> (MPa)	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i> ( <i>&lt;0,05</i> )	<i>VPU</i> (km/s)	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i> ( <i>&lt;0,05</i> )	<i>Rs</i> (kΩ*c m)	<i>P</i>	<i>V</i>	<i>F</i>	<i>P</i> ( <i>&lt;0,05</i> )
C1-E1	23,0	1,4			C1-E1	3,5	0,01			C1-E1	15,3	0,55		
		4			E1	8	9				8			
C3-E1	21,2	2,0			C3-E1	2,2	0,02			C3-E1	10,6	0,53		
	4	9	<b>10,1</b>	<b>6,0E-6</b>	E1	6	0	<b>159,</b>	<b>0,0000</b>		5		<b>363,</b>	<b>0,0000</b>
			<b>4</b>					<b>5</b>					<b>1</b>	
C5-E1	21,9	2,5			C5-E1	2,6	0,03			C5-E1	11,4	0,83		
	7	8			E1	9	2				8			
V2-E1	25,1	2,8			V2-E1	4,1	0,02			V2-E1	23,8	0,61		
E1	4	6			E1	4	3				1			



$I_c$ ( $\mu A/cm^2$ )	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )	$X_c$ (cm)	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )	$k_c$ ( $cm/a^{0,5}$ )	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )
V5-E1	24,25	3,60			V5-E1	3,7	0,091			V5-E1	20,13	1,82		
C1-E1	1,95	0,01			C1-E1	47,9	2,12			C1-E1	8,76	0,07		
C3-E1	2,82	0,03			C3-E1	59,0	20,7			C3-E1	10,8	0,68		
C5-E1	2,62	0,04	<b>228,5</b>	<b>0,0000</b>	C5-E1	53,4	2,56	<b>89,18</b>	<b>0,0000</b>	C5-E1	9,7	0,08	<b>89,18</b>	<b>0,0000</b>
V2-E1	1,26	0,01			V2-E1	38,1	9,86			V2-E1	6,9	0,33		
V5-E1	1,49	0,01			V5-E1	44,2	1,64			V5-E1	8,1	0,05		
$\varepsilon$ (%)	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )	$CCl_t$ (%m. h)	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )	$CCl_s$ (%m. h)	$P$	$V$	$F$	$P$ ( $<0,05$ )
C1-E1	14,03	0,16			C1-E1	0,030	2,3E-7			C1-E1	0,020	3,8E-7		
C3-E1	17,56	0,78			C3-E1	0,032	2,4E-7			C3-E1	0,021	3,7E-7		
C5-E1	15,90	0,73	<b>92,13</b>	<b>0,0000</b>	C5-E1	0,031	2,0E-7	<b>24,01</b>	<b>1,1E-10</b>	C5-E1	0,019	4,4E-7	<b>58,22</b>	<b>0,0000</b>
V2-E1	12,30	0,68			V2-E1	0,030	2,5E-7			V2-E1	0,021	2,8E-7		
V5-E1	12,97	0,16			V5-E1	0,031	3,1E-7			V5-E1	0,023	1,1E-7		



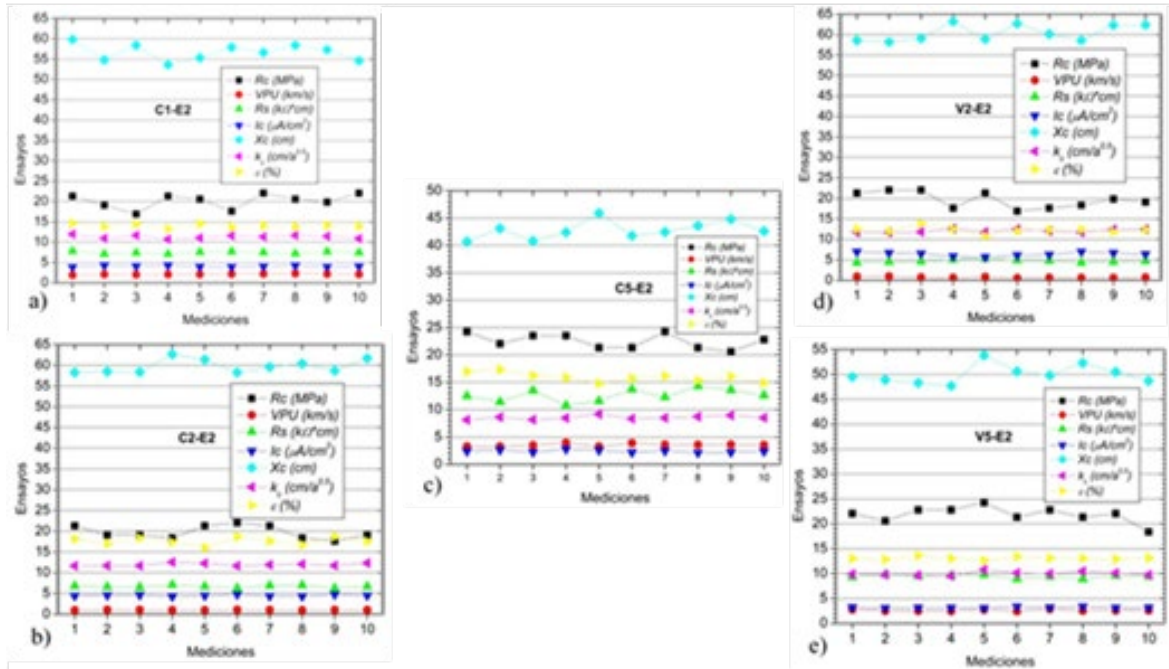


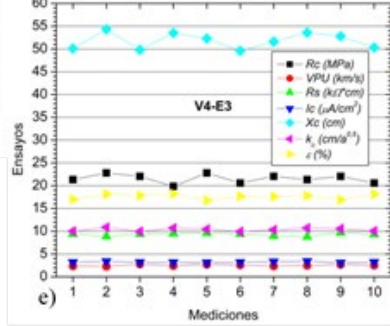
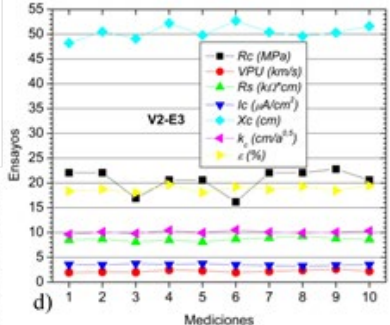
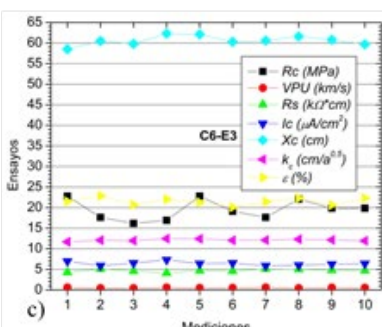
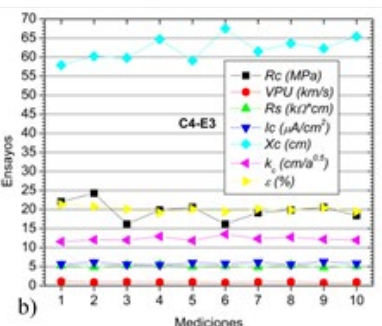
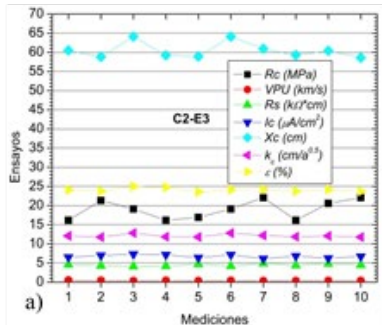
Fig. 7. Comportamiento de los 10 valores determinados en los ensayos para la construcción E-2.

Tabla 4. Valores de la varianza (V) y promedios calculados en cada uno de los elementos estructurales en la construcción E-2. Análisis de varianza.

Construcción E-2														
$R_c$ (MPa)	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )	VPU (km/s)	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )	$R_s$ ( $k\Omega \cdot cm$ )	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )
C1-E2	20,1	3,1			C1-E2	2,1	0,01			C1-E2	7,45	0,06		
	4	4			E2	2				C2-E2	6,68	0,07		
C2-E2	19,7	2,4			C2-E2	1,0	0,00							
	7	5			E2	2	1			C5-E2	12,6	1,29	274,8	0,0000
C5-E2	22,4	1,8	6,15	4,8E-4	C5-E2	3,5	0,05	589,0	0,0000	C5-E2	3			
	9	2			E2	4				V2-E2	4,7	0,10	8	
V2-E2	19,6	3,8			V2-E2	0,5	0,02			V2-E2				
	2	4			E2	3	1			V4-E2	9,42	0,10	1	
V4-E2	21,8	2,5			V4-E2	2,6	0,02			V4-E2				
	3	2			E2	2	3							
$I_c$ ( $\mu A/cm$ )	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )	$X_c$ (cm)	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )	$k_c$ ( $cm/a^0$ )	P	V	F	$p$ ( $<0,05$ )



2)					5)									
$\epsilon$ (%)	P	V	F	P (<0,05)	CCLt (%m.h)	P	V	F	P (<0,05)	CCLs (%m.h)	P	V	F	P (<0,05)
C1-E2	4,02	0,01			C1-E2	56,6	4,08			C1-E2	11,33	0,163		
C2-E2	4,49	0,03			C2-E2	59,8	2,70			C2-E2	11,96	0,108		
C5-E2	2,39	0,04	<b>376,8</b>	<b>0,0000</b>	C5-E2	42,8	2,67	<b>163,9</b>	<b>0,0000</b>	C5-E2	8,56	0,106	<b>163,9</b>	<b>0,0000</b>
V2-E2	6,41	0,19			V2-E2	60,4	4,00			V2-E2	12,08	0,160		
V4-E2	3,18	0,01			V4-E2	50,0	3,52			V4-E2	10,00	0,140		
C1-E2	14,02	0,17			C1-E2	0,044	3,1E-7			C1-E2	0,038	1,4E-7		
C2-E2	17,64	0,73			C2-E2	0,045	5,0E-7			C2-E2	0,039	8,1E-7		
C5-E2	15,92	0,65	<b>110,0</b>	<b>0,0000</b>	C5-E2	0,044	2,1E-7	<b>21,5</b>	<b>5,3E-10</b>	C5-E2	0,037	9,2E-7	<b>38,1</b>	<b>5,9E-14</b>
V2-E2	12,25	0,50			V2-E2	0,046	1,1E-7			V2-E2	0,038	4,0E-7		
V4-E2	13,08	0,08			V4-E2	0,046	8,9E-7			V4-E2	0,035	4,9E-7		



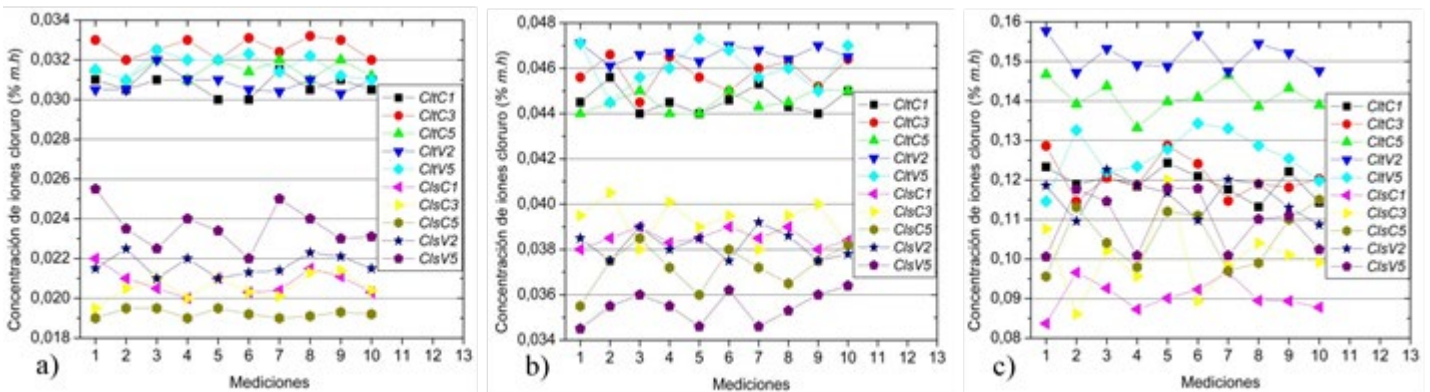
**Fig. 8.** Comportamiento de los 10 valores determinados en los ensayos para la construcción E-3.

**Tabla 5.** Valores de la varianza (V) y promedios calculados en cada uno de los elementos estructurales en la construcción E-3. Análisis de varianza.

**Construcción E-3**

Construcción E-3														
$R_c$ (MPa)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$VPU$ (km/s)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$R_s$ ( $k\Omega \cdot cm$ )	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )
C2-E3	18,9	6,0 9			C2-E3	0,3 6	0,00 2			C2-E3	4,46	0,07		
C4-E3	19,7	6,1 0			C4-E3	0,9 1	0,01 1			C4-E3	5,15	0,06		
C6-E3	19,4	5,9 1	<b>7,86</b>	<b>5,3E-5</b>	C6-E3	0,5 0	0,00 5	<b>470</b>	<b>0,000 0</b>	C6-E3	4,7	0,10	<b>581, 9</b>	<b>0,000 0</b>
V2-E3	20,5	5,1 6			V2-E3	2,2 0	0,05 6			V2-E3	8,62	0,12		
V4-E3	21,5	0,9 6			V4-E3	2,5 1	0,00 2			V4-E3	9,3	0,09		
$I_c$ ( $\mu A/cm^2$ )	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$X_c$ (cm)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$k_c$ ( $cm/a^{0,5}$ )	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )
C2-E3	6,73	0,1 6			C2-E3	60, 4	4,25			C2-E3	12,1 0	0,16		
C4-E3	5,83	0,0 7			C4-E3	62, 2	9,42			C4-E3	12,2 9	0,34		
C6-E3	6,41	0,2 1	<b>280, 4</b>	<b>0,000 0</b>	C6-E3	60, 6	1,34	<b>76,3</b>	<b>0,000 0</b>	C6-E3	12,1 2	0,05	<b>75,4</b>	<b>0,000 0</b>
V2-E3	3,48	0,0 2			V2-E3	50, 4	1,94			V2-E3	10,0 8	0,07		
V4-E3	3,22	0,0 1			V4-E3	51, 7	3,07			V4-E3	10,3 5	0,12		
$\epsilon$ (%)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$CCl_t$ (%m.h)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )	$CCl_s$ (%m.h)	P	V	F	$P$ ( $<0,05$ )
C2-E3	24,1 1	0,2 2			C2-E3	0,1 1	1,3E-5			C2-E3	0,09	1,6E-5		
C4-E3	20,0 7	0,4 2			C4-E3	0,1 2	2,4E-5			C4-E3	0,10	8,9E-5		
C6-E3	21,5 2	0,7 6	<b>155, 4</b>	<b>0,000 0</b>	C6-E3	0,1 4	1,6E-5	<b>87,9</b>	<b>0,0000</b>	C6-E3	0,10 5	5,6E-5	<b>18,3 8</b>	<b>5,11E- 9</b>
V2-E3	18,7 8	0,3 4			V2-E3	0,1 5	1,5E-5			V2-E3	0,11	2,5E-5		
V4-E3	17,6 0	0,2 9			V4-E3	0,1 2	4,0E-5			V4-E3	0,10 9	5,6E-5		





**Fig. 9.** Comportamiento de los 10 valores de concentración de iones cloruro totales (CClt) y solubles (CCls) en cada una de las estructuras, E-1 a), E-2 b) y E-3 c).

Sin embargo, resultados posteriores obtenidos en estudios investigativos ejecutados en otros países de Latinoamérica incluyendo España y Portugal y posteriormente en Cuba y Ecuador en probetas de hormigón armado colocadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo a cortas distancias desde el mar o zona del rompiente de las olas, demostraron la necesidad de elaborar un hormigón armado con una  $R_c \geq 35 \text{ MPa}$  (Troconis, et al, 2006 y 2007; Guerra, 2023; Castañeda 2024). Este valor de  $R_c$  se correspondió con un hormigón armado elaborado con una relación agua/cemento de 0,4. El hormigón utilizado en la elaboración de las probetas fue dosificado teniendo en cuenta en su diseño el logro de un porcentaje mínimo de vacío entre los agregados finos y gruesos. La combinación entre los agregados y el cemento como aglomerante hidráulico fue: cemento 365 kg; arena II 750 kg; gravilla 1 030 kg. El volumen de agua fue de 148 L y el porcentaje de aditivo superplastificante usado fue de 5% con relación al peso del cemento. Plazos elevados de vida útil de proyecto por más de 60 años fueron demostrados para proceder con las labores de construcción en zonas costeras de elevado potencial constructivo en ambos países, así como en zonas urbanas como la de este estudio.

Con relación a la  $VPU$ , pero convertidos los valores de  $km/s$  a  $m/s$  para poder establecer criterios de calidad en cuanto a su clasificación, solamente tres valores en los elementos estructurales de las estructuras E-1 (C1-E1 y V2-E1) y E-2 (C5-E2), cayeron en el intervalo 3001-4000  $m/s$  y  $> 4000$  indicativo de un hormigón de calidad elevada y durable respectivamente. El resto de los valores promedios estuvieron en el intervalo 2001-3000  $m/s$  y  $< 2000$   $m/s$ , lo cual representa un hormigón de calidad normal y deficiente respectivamente (Tablas 3, 4 y 5). Este comportamiento se corresponde con los valores de  $R_c$  determinados.

Para la  $R_s$ , únicamente los valores promedios  $P$  de los elementos estructurales de la construcción E-1 indicaron un riesgo de corrosión moderado [ $10-50 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ ]. En las otras dos estructuras, el riesgo resultó elevado [ $< 10 \text{ k}\Omega/\text{cm}$ ] (Tablas 3, 4 y 5). Por tanto, para nada es sorprendente que los valores de  $I_c$  como un indicador de la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, calculados a partir del criterio establecido por el Comité Técnico de RILEM, hayan resultado mayores que  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para las tres estructuras E-1, E-2 y E-3 (Tablas 3, 4 y 5). De esta forma, un nivel de corrosión elevado en los aceros de refuerzo en los elementos estructurales existe según los intervalos de clasificación. Una pérdida considerable de espesor en  $\text{mm}/\text{años}$ , es posible (Tabla 1). De acuerdo con los valores obtenidos de  $I_c$ , se estima que las tres estructuras emplazadas en la zona urbana se encuentren en su vida útil última o residual. Se continúa confirmando la calidad inadecuada que presentó el hormigón usado en las tres estructuras.

Con relación al fenómeno de la carbonatación, caracterizado a partir de los ensayos de determinación y cálculo de la  $X_c$  y  $k_c$  respectivamente. La mayoría de los valores de este último parámetro cayeron en el intervalo  $9 > k_c > 6$  y  $> 9 \text{ cm}/\text{a}^{0.5}$ , lo cual clasifica al hormigón de calidad moderada y mala respectivamente. Ningún valor calculado de  $k_c$  resultó  $< 6 \text{ cm}/\text{a}^{0.5}$  en los elementos estructurales de las tres estructuras indicativo de un hormigón de calidad buena (Tabla 2). Es evidente que, valores muy elevados de  $X_c$  garanticen una velocidad de penetración del  $\text{CO}_2$  ( $k_c$ ) elevada a través de los poros capilares del hormigón armado de los elementos estructurales,



procedente este agente agresivo desde la atmósfera como medio natural de exposición que impactan las tres estructuras (Tablas 3, 4 y 5).

Esto último es confirmado a partir del porcentaje de porosidad capilar efectivo  $\varepsilon$  (%). Se trata de un parámetro muy importante y que no debe quedar ausente en los estudios de diagnóstico estructural. Los resultados permitirán definir las patologías que pudieran presentar las estructuras para la ejecución futura de los trabajos de mantenimiento o reparación. Solamente cinco valores promedios de  $\varepsilon$ , dos en la estructura E-1 (V2-E1, V5-E1) y los otros tres en la estructura E-2 (C1-E2, V2-E2, V4-E2) cayeron en el intervalo de clasificación [10-15%] indicativo de un hormigón de calidad moderada. El resto de los valores promedios resultaron  $> 15\%$ , siendo indicativo de un hormigón de durabilidad inadecuada. Ningún valor determinado resultó  $< 10$  lo cual indica un hormigón de buena calidad y compacidad (Tablas 3, 4 y 5).

Por último, es de notar como la *CCLt* fue mayor que la *CCLs* en los cinco elementos estructurales en las tres estructuras. De esta forma, valores muy bajos de concentración de iones cloruro enlazados (*CCLe*) menores que *CCLs* pudieran obtenerse (Figura 9 a), b) y c) Por tanto, se demuestra que el hormigón usado en las tres estructuras no fue elaborado haciendo uso de la arena de mar como agregado fino, así como del agua de mar como de amasado. Quizás una ligera penetración de este otro peligroso agente agresivo pudiera haber ocurrido por los poros capilares del hormigón, a pesar de que las tres estructuras se encuentren emplazadas a grandes distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas. Pudiera tratarse de la penetración de las sales de iones cloruro originadas no solo en la zona del rompiente de las olas, sino también en el interior del océano que, al poseer un menor peso y tamaño, son transportadas a través del flujo horizontal del aerosol marino debido a la influencia del viento depositándose a grandes distancias hacia el interior de la tierra (Meira, et al, 2010; Castañeda, et al, 2015 y 2018).

Un caso contrario sucedió en Cuba, es decir, *CCLs*  $<$  *CCLe*, donde fue demostrado que el hormigón si fue construido con arena y agua de mar. Un deterioro muy anticipado en el tiempo producto a la corrosión en los aceros de refuerzo pudo ser notado en los elementos estructurales como vigas de contención y columnas en una estructura emplazada también en una zona urbana. Esto siempre y cuando el hormigón armado este expuesto en la estructura a la atmósfera como medio natural de exposición bajo condiciones exteriores e interiores. En caso de que el hormigón armado se encuentre expuesto a la condición de inmersión total en agua de mar cumpliéndose la condición *CCLs*  $<$  *CCLe*, la corrosión en el acero de refuerzo resulta insignificante debido a la baja solubilidad del oxígeno en el agua de mar, lo cual dificulta la reducción catódica del mismo (Castañeda y Hernández, 2024).

De manera general, el comportamiento de los 10 valores determinados, así como los promedios (*P*) con sus respectivas varianzas (*V*) de los nueve ensayos ejecutados en los cinco elementos estructurales, demostraron que el hormigón usado en las tres estructuras no presentó la calidad adecuada. Se trata de un estudio muy integral debido a que fueron usados la gran mayoría de los ensayos a la hora de ejecutar el diagnóstico estructural a pie de obra; por lo que se demuestra la necesidad de usar siempre que sea posible la combinación entre los ensayos destructivos (*Xc*,  $\varepsilon$ , *CCL*) y los no destructivos (*Rc*, *VPU*, *Rs*, *Ic*). La combinación de ambos tipos de ensayos fue empleada en un estudio basado en el diagnóstico estructural de un edificio de hormigón armado basado en su perfil bio-sísmico y un análisis dinámico incremental, emplazado en la zona costera de Concepción Chile, específicamente en la zona afectada por el sismo de Maule en el año 2010 (Olivera y Oyarzo, 2020).

Recientemente fue demostrado que, ensayos no destructivos muy novedosos han sido empleados por muchos autores en metodologías efectivas que conducen a la investigación del estado de conservación actual en estructuras históricas de hormigón armado siguiendo su evolución en respuesta a los cambios ambientales de sus alrededores. Al tratarse de estructuras históricas y de elevado valor patrimonial, el uso de ensayos destructivos se dificulta (Boccacci, et al, 2024). Una metodología nueva de diagnóstico en estructuras de hormigón armado también en Chile haciendo uso de ensayos no destructivos, complementaria a la Inspección Visual, permitió entregar como resultado una evaluación cuantitativa integral del "Estado de Salud" de los distintos elementos estructurales. Lo anterior trajo como resultado contar con información fundamental para ajustar los ciclos de mantención o tomar decisiones a tiempo de situaciones críticas, con el objetivo de asegurar el desempeño futuro de las estructuras (Ebensperger y Donoso, 2021).

Por otra parte, una metodología similar a la usada en este estudio en cuanto al uso de ensayos destructivos y no destructivos, teniendo en cuenta además la identificación de elementos estructurales como vigas y columnas haciendo uso de los planos, fue ejecutada en un edificio emplazado en el muelle de Progreso que alberga 70 años



de antigüedad expuesto a un impacto muy elevado del ambiente agresivo costero de la atmósfera, Yucatán en el golfo de México. Los resultados permitieron concluir que, a pesar del deterioro anticipado que presentó la estructura debido a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, se indicó la necesidad de demoler solamente partes de la cubierta específica inferior de la losa y la sustitución de la armadura por polímero reforzados con fibras de carbono (Castro, et al, 2014). De ahí, la importancia en cuanto a la ejecución de los estudios de diagnóstico estructural antes de tomar una decisión final con las estructuras.

Sin embargo, a diferencia de este estudio, los referenciados anteriormente no contaron con una base amplia de datos, lo cual imposibilitó la ejecución de un análisis de varianza con el propósito de profundizar más en la evaluación de la calidad del hormigón usado en las tres estructuras emplazadas en la zona rural (E-1, E-3 y E-3).

Es de notar a partir del análisis de varianza, como los valores de  $p$  al ser menores que  $0,05$  para valores elevados de la  $F$  de Fischer, demuestran la existencia de diferencias significativas entre los cinco valores promedios ( $P$ ), es decir grupos, en los nueve ensayos en las tres estructuras (Tabla 3, 4 y 5). Por tanto, la baja variación de los 10 valores determinados para cada ensayo (Figuras 6, 7 y 8, a)-d) y Figura 9 a), b) y c) obedece a diferencias reales en un mismo grupo de ensayo para cada elemento estructural en cada una de las estructuras. Era de esperar, debido a la baja variación confirmado con los valores de la varianza ( $V$ ) la no existencia de diferencias significativas entre los cinco grupos para cada ensayo (Tabla 3, 4 y 5). Por tanto, se continúa demostrando lo heterogéneo que resulta el hormigón armado.

La existencia en cuanto a la diferencia significativa en los cinco grupos para cada ensayo permite seguir confirmado que el hormigón usado en las tres estructuras no presentó la calidad adecuada. Quizás, aspectos referidos en cuanto a la tecnología del hormigón no fueron tenidos en cuenta, así como la posibilidad de emplear hormigones diferentes en cuanto a su relación agua/cemento y al método de diseño de mezcla a la hora de proceder con las labores de construcción de las tres estructuras. Además de los estudios referidos anteriormente, reportes donde una valoración en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón haciendo uso de un análisis de varianza no fueron encontrados en la bibliografía de la especialidad.

#### Factores influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo

Es de notar, como para cada elemento estructural ( $E.E$ ) en las tres estructuras (E-1, E-2 y E-3) diferentes factores influyeron en la intensidad de corriente de corrosión ( $I_c$ ) como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado a partir del ajuste de modelos basados en regresiones lineales y lineales múltiples (Tabla 6). Para un mejor entendimiento en cuanto a la demostración de los factores más influyentes, un conteo de ensayo o lo que es lo mismo variable o parámetro independiente fue realizado por modelo ajustado en cada elemento estructural seleccionado en las tres estructuras (Tabla 7). La  $R_s$  no fue tenida en cuenta en el ajuste de los modelos, debido que los 10 valores fueron usados para el cálculo de la  $I_c$  (2).

**Tabla 6.** Modelos ajustados que permiten demostrar los factores influyentes en la corrosión atmosférica en los cinco elementos estructurales en las tres estructuras.

E-1					
$E.E$	Modelos	$R^2$ (%)	$r$	$P$ ( $<0,05$ )	
C1-E1	$I_c = 2,41 + 2,23X_c - 11,97k_c - 99,20CCl_s$	72	-	<b>0,0130</b>	
C3-E1	$I_c = 4,37 - 2,23R_c - 214,39CCl_s$	63	-	<b>0,013</b>	
C5-E1	$I_c = -0,132 + 70,36\varepsilon$	60	0,65	<b>0,00232</b>	
V2-E1	$I_c = 1,67 + 0,45X_c - 2,41k_c$	59	-	<b>0,034</b>	
V5-E1	$I_c = -0,40 + 80,41CCl_s$	69	0,84	<b>0,0013</b>	



E-2				
C1-E2	$Ic = 7,02 - 0,21\varepsilon$	41	-0,64	<b>0,0042</b>
C2-E2	$Ic = 9,19 + 1,92VPU + 145,84CCl_t$	55	-	<b>0,0256</b>
C5-E2	$Ic = 18,66 + 15,91Xc - 80,31k_c + 959,36CCl_t + 542,62CCl_s$	94	-	<b>0,0008</b>
V2-E2	$Ic = 11,90 + 80,31k_c$	59	0,61	<b>0,023</b>
V4-E2	$Ic = -2,68 + 0,17k_c + 0,32\varepsilon$	52	-	<b>0,0238</b>
E-3				
C2-E3	$Ic = 2,58 + 0,38k_c$	55	0,6	<b>0,023</b>
C4-E3	$Ic = 2,28 - 1,69VPU + 0,25\varepsilon$	53	-	<b>0,046</b>
C6-E3	$Ic = 10,9 + 31,90CCl_t$	48	0,52	<b>0,042</b>
V2-E3	$Ic = 6,02 + 0,13\varepsilon$	49	0,54	<b>0,0101</b>
V4-E3	$Ic = 2,10 + 0,29k_c + 0,25\varepsilon + 10,73CCl_t$	63	-	<b>0,0287</b>

**Tabla 7.** Factores más influyentes en la corrosión atmosférica.

Estructura	Ensayos							
	Rc (MPa)	VPU (km/s)	Rs (kΩ*cm)	Xc (cm)	k <sub>c</sub> (cm/a <sup>0,5</sup> )	ε (%)	CClt (%m.h)	CCls (%m.h)
E-1	1	-	-	2	2	2	1	3
E-2	-	1	-	1	1	1	2	1
E-3	-	1	-	-	2	3	-	2
Total	-	2	-	3	5	6	3	6

De forma general, se observa como los factores más influyentes, es decir, los que más estuvieron de moda en los 15 modelos ajustados, cinco para cada construcción correspondiente con los elementos estructurales seleccionados, resultaron la  $k_c$ , el  $\varepsilon$  y la  $CCls$ . La  $k_c$  apareció en cinco modelos. El  $\varepsilon$  y la  $CCls$  aparecieron en 6 de los modelos ajustados en las tres estructuras E-1, E-2 y E-3 (Tabla 7). Por tanto, se continúa demostrando que, en una zona urbana, la carbonatación es uno de los factores más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.



A pesar de que la  $R_c$  solo apareció en la construcción E-1, se trata de un factor muy importante en la durabilidad del hormigón armado (Tabla 7). Resultados a partir del ajuste de modelos lineales y lineales múltiples permitieron demostrar que el factor más influyente en la  $R_s$  fue la  $R_c$  y ambos parámetros en la  $I_c$  obtenidos en un estudio de diagnóstico en estructuras ejecutado en una zona costera del cantón de Manta en Manabí (Moreira y Guerra, 2024). En otro estudio ejecutado en el mismo cantón, la  $R_c$  debido a su influencia en la  $k_c$  y en la  $I_c$ , resultó un factor determinante y muy importante en la elaboración del hormigón, antes de proceder con las labores de construcción de las estructuras que se pretenden emplazar en zonas costeras de elevado potencial constructivo. De acuerdo con los valores determinados, la  $k_c$  con relación a su clasificación, incluso predicha en el tiempo, resultó un indicador eficaz en cuanto a la evaluación de la calidad del hormigón usado en la construcción de los elementos estructurales de hormigón armado, así como su influencia en la  $I_c$ ; parámetro ( $k_c$ ) no muy usado en estudios de diagnóstico a pie de obra y no solo en el Ecuador (Pérez y Guerra, 2024).

Con relación a otro estudio ejecutado en la parroquia de Crucita perteneciente al cantón de Portoviejo de la provincia de Manabí, la  $R_c$  del hormigón y la  $CCLt$  (%m. h) donde se incluye su mecanismo de penetración desde la superficie hacia el interior del hormigón, constituyeron los factores necesarios y muy influyentes en el desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón y que compromete la vida útil de las estructuras (Rincón, et al. 2025).

Otro estudio más reciente ejecutado en una zona costera del cantón de Pedernales también de la provincia de Manabí, el análisis estadístico comparativo a partir de los dos métodos utilizados permitieron confirmar que la  $CCLs$  (%m. h) resultó el factor fundamental en el origen y desarrollo de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, 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 la  $VPU$ ,  $R_c$ ,  $X_c$  y la  $k_c$  (Guerrero, et al, 2025). De manera general, los resultados obtenidos en los cuatro estudios a partir de los ensayos realizados a pie de obra, permitieron demostrar que el hormigón usado en las estructuras no presentó la calidad adecuada como mismo sucedió en este estudio a diferencia de que fue ejecutado en una zona urbana y no costera. Sin embargo, la influencia del  $\varepsilon$  como un factor influyente no fue tenida en cuenta en los cuatro estudios anteriores, así como en los referenciados. La determinación de este parámetro o factor muy importante permite seguir confirmando la necesidad de usar hormigones compactos y durables, es decir, resistente a la penetración de los agentes agresivos como el  $CO_2$  y las sales de iones cloruro. Más, cuando las estructuras se encuentran emplazadas a cortas distancias desde la zona del rompiente de las olas en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Es válido reiterar que este factor, casi nunca es tenido en cuenta a la hora de evaluar la calidad del hormigón antes de proceder con las labores de construcción. Se conoce, cuando realmente son ejecutados los estudios de diagnóstico estructural a pie de obra. Lo que sucede realmente es que no aparecen en la normativa de durabilidad del hormigón estructural. No siendo así en países como Cuba y Ecuador, donde las normativas ya reflejan que, entre los criterios por durabilidad es muy necesario usar hormigones en las labores de construcción que posean un  $\varepsilon < 10\%$  (Marrero, et al, 2018). Más, cuando las estructuras estarán sometidas a un impacto elevado del ambiente agresivo costero con categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera desde elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX). En zonas costeras de Cuba, ya se han mostrado ejemplos de una propuesta de categoría superior a extrema (>CX) para el acero al carbono y el cobre. Los resultados están siendo procesados para publicaciones futuras.

A pesar de que los 10 valores de  $CCLs$  no pudieron clasificarse como elevados debido a que ninguno resultó mayor que 0,5% en masa de hormigón (% m. h) para cada elemento estructural seleccionado en las tres estructuras (Figura 9 a), b) y c), valor de  $CCLs$ -(% m. h) que ha sido muy tomado como referencia en literatura de la especialidad. La  $CCLs$  resultó entre los factores más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo (Tabla 7). Se trata de un factor muy influyente, pero siempre y cuando las estructuras estén emplazadas a cortas distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas y no en una zona urbana como la tratada en este estudio. Todo parece indicar que, las sales de iones cloruro procedentes del interior del océano y depositadas en forma de disolución salina en las estructuras emplazadas a grandes distancias desde la línea costera y que penetran por la matriz del hormigón que presentan un porcentaje elevado porosidad capilar como es el caso en todos los elementos estructurales de las tres estructuras, influyeron en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.



### Observación visual de las tres estructuras

A pesar de que el hormigón usado en las estructuras no haya presentado la calidad adecuada, así como los valores de  $I_c$  demostraron que las tres estructuras pudieran haberse encontrado en su vida útil última o residual. La observación visual demostró todo lo contrario (Figura 10 a), b) y c). Un deterioro estructural y anticipado en el tiempo no es observado en la condición de exposición al exterior, que es donde realmente comienza a notarse la existencia de fisuras y grietas en los elementos estructurales de hormigón armado en las estructuras. Solo se observa un ligero fenómeno de la eflorescencia en zonas de las columnas y en los cimientos de las tres estructuras (Figura 10 a), b) y c). Fenómeno casi normal en estructuras emplazadas en zonas urbanas y rurales. Por tanto, se continúa demostrando, que la influencia del fenómeno de la carbonatación de por sí solo, no compromete la vida útil de las estructuras, siempre y cuando las mismas estén emplazadas en zonas urbanas y rurales. No siendo así en zonas costeras de elevado potencial constructivo donde la combinación de la carbonatación a partir de sus variables de caracterización ( $X_c$  y  $k_c$ ) y la  $CCI$  totales y solubles influyen de forma determinante en el deterioro anticipado en las estructuras de hormigón armado debido a la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo principalmente en los elementos estructurales como son las columnas y las vigas.



*Fig. 10. Observación visual de las tres estructuras, E-1 a), E-2 b) y E-3 c).*

### CONCLUSIONES

Un estudio sobre el diagnóstico estructural, fue ejecutado en tres estructuras de hormigón armado, emplazadas en una zona urbana de la Parroquia de Colón, Portoviejo Manabí, Ecuador. Los resultados obtenidos permitieron llegar a las siguientes conclusiones: De acuerdo con el comportamiento de los diez valores determinados y sus promedios en cada uno de los ensayos no destructivos y destructivos ejecutados, basados en su baja variación en los elementos estructurales, columnas y vigas de hormigón armado, seleccionados en las tres estructuras, así como el método estadístico usado que consistió en un análisis de varianza, debido a la gran acumulación de datos. Se demostró, que la calidad del hormigón armado usado en las tres estructuras como un indicador de su durabilidad resultó inadecuada. De esta forma, las tres estructuras pudieran haber alcanzado su vida útil última y residual. La observación visual de los elementos estructurales de las tres estructuras demostró todo lo contrario. De ahí, la importancia de esta otra herramienta ingenieril en estos tipos de estudios de diagnóstico estructural a pie de obra. Se continúa confirmando, que la influencia del fenómeno de la carbonatación de por sí solo, no compromete la vida útil de las estructuras o estructuras, siempre y cuando las mismas estén emplazadas en zonas urbanas y rurales. Los factores más influyentes en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en cada uno de los elementos estructurales fueron, la constante de carbonatación ( $k_c$ ), el porcentaje de porosidad capilar efectivo ( $\epsilon$ ) y la concentración de iones cloruro solubles ( $CCIs$ ). Se demostró que este segundo factor, muy importante en la evaluación de la calidad y durabilidad del hormigón, no fue tenido en cuenta en los cuatro estudios de diagnóstico ejecutados anteriormente en

estructuras emplazadas en zonas costeras de Manabí. Con relación al tercer factor, todo parece indicar que, las sales de iones cloruro procedentes desde el interior del océano y depositadas en forma de disolución salina en las estructuras emplazadas a grandes distancias desde la línea costera y que penetran por la matriz del hormigón que presentan un porcentaje elevado porosidad capilar como es el caso en todos los elementos estructurales de las tres estructuras, pudieran influir en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado.

## 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.
- Castro, P., y col., 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.
- 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.
- 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.
- Guerra, Mera, J, C; Castañeda, A; Howland, J, J.; Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador. Revista CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICA. Vol. 47, pp. 17-30, 2016.
- Guerra, 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.
- Guerra, Juan Carlos, y col.; Case Studies in Chemical and Environmental Engineering. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9 (2024) 100703.
- Castañeda, Valdés, A.; Corvo, F; Marrero-Águila, R; Fernández-Domínguez, A; Del Angel-Meraz, Eb.; The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. Materials and Structures 56:12. 2023.
- 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.
- Corvo, F., Pérez, T., Dzib, L, R., Martín, Y., Castañeda, A., González, E., Pérez, J., Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. Revista Corrosion Science. 50, (2008), pp. 220 - 230.
- 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.
- Escobar, M., et al. (2023). "Modelo de gestión para el diagnóstico de estructuras de edificios de hormigón armado" en: Álvaro G. Sánchez Bellido, Juan Carlos Rojas Vidovic, Alan J. Aparicio Ortubé, Enio J. Pazini Figueiredo y Pedro Castro Borges (Eds.), Memorias del XVII Congreso Latinoamericano de Patología de la



- Construcción y XVIII Congreso de Control de Calidad en la Construcción, CONPAT 2023. Santa Cruz de la Sierra (BOL), (pp. 14).
- Howland, J, J., Tecnología del hormigón para ingenieros y arquitectos. Editorial Félix Varela, La Habana, 2013.
- 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; 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.
- Trocónis, O., Duracon Collaboration. Durability of concrete structures: DURACON, an iberoamerican project. Preliminary results. Revista Building and Environment. 41, (2006), pp. 952-962.
- Trocónis, O., Duracon Collaboration. Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED. Corrosion Science. 49, (2007), pp. 2832-2843
- Castañeda, Valdés, A; Corvo, 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, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R.; Airborne salinity penetration in the coastal tropical climate of Havana City Cuba. CENIC JOURNAL, EBESCO, CHEMICAL SCIENCES, Vol. 46, Número Especial, pp. 90-99, 2015.
- 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.
- 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.
- Olivera-López, J. y Oyarzo-Vera, C. (2020). Diagnóstico estructural de un edificio de hormigón armado basado en su perfil bio-sísmico y un análisis dinámico incremental. 27, 95-106.
- Boccaccia, G; Frascasca, 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.
- 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.
- 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.
- 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.

## CONTRIBUCIÓN AUTORAL

**Gabriel Marcelo Moreira Centeno:** Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las estructuras. Gestor de las estructuras para la realización del estudio. Acumulación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición)

**Juan Carlos Guerra Mera:** Autor, estadística, revisión final del artículo.

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

