

ARTICULO DE INVESTIGACIÓN

DESEMPEÑO POR DURABILIDAD DE REVESTIMIENTOS DE HORMIGÓN ARMADO EN CONSTRUCCIONES EXPUESTAS A LA CONDICIÓN SUBTERRÁNEA DE EXPOSICIÓN EN CUBA

DURABILITY PERFORMANCE OF REINFORCED CONCRETE COVERINGS IN BUILDINGS EXPOSED TO THE UNDERGROUND EXPOSURE CONDITION IN CUBA

Reneilder Martínez Domínguez^a (0009-0007-9583-7741)
Abel Castañeda Valdés^{b,*} (0000-0002-2531-9224)

^a Departamento de Fortificaciones. Facultad II. Escuela Interarmas de las FAR, General “Antonio Maceo”. Ceiba del Agua, Caimito, Artemisa, Cuba. Código Postal 10699.

^{b,*} Centro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC, Avenida 25, Esquina 21-A, No. 15202, Cubanacán, Playa, La Habana, Cuba.

^{b,*} abel.castaneda@cnic.cu

Recibido: 17 de octubre de 2025;

Aceptado: 19 de diciembre de 2025;

RESUMEN

El desempeño por durabilidad del hormigón armado ha sido muy estudiado para la condición de exposición al exterior a la atmósfera en Cuba. No siendo así en revestimientos de hormigón armado en construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición. Caracterizar el desempeño por durabilidad en nueve construcciones expuestas a dicha condición en tres ambientes exteriores, es el objetivo general del estudio. Evaluar la calidad del hormigón. Estimar las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera como un tipo de condición de exposición al interior. Demostrar los factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión en el acero de refuerzo y estimar la vida útil de proyecto de las construcciones, son los específicos. Tres construcciones en ambientes exteriores costero, rural y urbano, fueron seleccionadas. Cuatro ensayos destructivos y no destructivos a partir de la determinación de 30 valores fueron empleados. El hormigón presentó una calidad inadecuada en los tres ambientes exteriores expuesto a categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera de media y elevada en la condición soterrada de exposición. Plazos elevados de vida útil de proyecto, superiores a 80 años, no fueron obtenidos para las construcciones. Factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión resultaron muy coincidentes, con el hormigón armado expuesto a la condición de exposición al exterior frente a categorías muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera. Los requerimientos por durabilidad obtenidos para esta condición, donde el hormigón garantizó plazos elevados de vida útil de proyecto mayor que 80 años y una resistencia elevada a la carbonatación, pudieran ser usados en los revestimientos de hormigón armado. La velocidad de pulso ultrasónico pudiera resultar necesario, pero no suficiente, siendo el porcentaje de porosidad capilar efectivo un factor muy influyente. Para valores elevados de este parámetro, indicativo de un hormigón de mala calidad, un incremento en el fenómeno de la carbonatación tuvo lugar en el hormigón, acelerando de manera considerable la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, principalmente en las construcciones en el ambiente rural externo, donde para la condición subterránea de exposición, valores mayores de humedad relativa y plazos menores de vida útil fueron demostrados.

Palabras claves: desempeño, durabilidad, hormigón, revestimiento, construcciones.

ABSTRACT

The durability performance of reinforced concrete has been extensively studied under outdoor exposure condition to the atmosphere in Cuba. This is not the case in reinforced concrete coatings in buildings exposed to underground exposure conditions. To characterize the durability performance in nine buildings exposed in three outdoor environments, is the main objective of this study. To evaluate the concrete quality. To estimate the corrosivity categories of the atmosphere as a type of indoor exposure condition. To demonstrate the factors influencing in the corrosion current intensity in reinforcement steel and to estimate the service life of the buildings are the specific objects Three buildings in coastal, rural, and urban outdoor environments were selected. Four destructive and non-destructive tests were used, based on the 30 values determination. The concrete showed inadequate quality in the three outdoor environments exposed to medium and high corrosivity categories of the atmosphere in the underground exposure condition. Long service life project higher than 80 years, were not obtained for the buildings. Factors influencing in the corrosion current intensity were very consistent, with the reinforced concrete exposed to outdoor exposure condition to very high corrosivity categories of the atmosphere. The durability requirements obtained for this condition, where the concrete guaranteed a long service life project higher than 80 years and high resistance to carbonation could be used in reinforced concrete coating. The ultrasonic pulse speed may be necessary but not sufficient, being the effective percentage capillary porosity a very influential factor. For high values of this parameter, indicative of poor quality concrete, an increase in the carbonation phenomenon took place in the concrete, considerably accelerating atmospheric corrosion in the reinforcement steel, mainly in buildings in the external rural environment, where for the underground exposure condition, higher values of relative humidity and shorter service life projects were demonstrated.

Keywords: performance, durability, concrete, coating, buildings.



INTRODUCCIÓN

El desempeño adecuado por durabilidad de los revestimientos de hormigón armado define la vida útil que presentan las construcciones emplazadas en la condición subterránea de exposición. Se lograría que las construcciones mantengan en el tiempo sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto (*Vup*) como son estética, funcionalidad y seguridad, sin costos inesperados en los trabajos, no solo los de mantenimiento, más bien los de reparación resultando los más costosos (Castañeda, *y col*, 2014, 2020).

La tendencia actual en Cuba y a nivel mundial se basa en ejecutar los trabajos costosos de reparación cuando las construcciones, y no solo las de hormigón armado, han alcanzado sus vidas última y residual sin funcionamiento social alguno, expuestas a diferentes medios naturales y condiciones de exposición (Castañeda, *y col*, 2012). Las construcciones intensamente deterioradas se convierten en un problema social de la ciencia y la tecnología muy difícil de solucionar. Las emplazadas en la condición subterránea de exposición, no deben estar exentas de tal situación. Se trata que, los revestimientos de hormigón armado se desempeñen como una barrera física eficaz entre el suelo como medio natural de exposición y la atmósfera interior, capaz el hormigón de resistir la penetración de los agentes agresivos como son el O_2 , el H_2O y el CO_2 (NC-250:2005). Este último, muy presente en las condiciones soterradas de exposición influyendo en el origen y desarrollo del fenómeno de la carbonatación. De ahí, la necesidad imperiosa de elaborar hormigones con un desempeño adecuado por durabilidad en los revestimientos de hormigón armado.

En estudios relacionados con el desempeño por durabilidad del hormigón armado en Cuba, la influencia de la carbonatación en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado a pie de obra, ha sido menos estudiada en comparación con la influencia de iones cloruro procedentes desde el mar y transportados en el aerosol marino. Siempre el hormigón armado sometido a la condición de exposición al exterior. No obstante, en los últimos diez años se han venido ejecutando estudios de patología y diagnóstico en el Centro Histórico de la Habana Vieja, Cuba (Oroza, *y col*, 2023; Castañeda y Oroza, 2024). El intenso deterioro en las construcciones antiguas se debió a la corrosión atmosférica en los elementos estructurales de hormigón armado que la sostienen, producto de la carbonatación, además de la ocurrencia de la eflorescencia en el hormigón. Se demostró que, el uso de arena de mar en la elaboración del hormigón resultó otro factor muy influyente en el deterioro anticipado de las construcciones. La corrosión atmosférica del acero de refuerzo presentó una morfología generalizada y no localizada producto a la no penetración de sales de iones cloruro desde la atmósfera exterior hacia el interior del hormigón por los poros capilares. Por tanto, las construcciones pueden ser sometidas a intensos y costosos trabajos de reparación y no de demolición. Reportes relacionados con el desempeño por durabilidad en revestimientos de hormigón armado en construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición en Cuba no fueron encontrados.

En la última década del presente siglo otros países de la región como Brasil (Silva, *y col*, 2022), y Chile (Ortega, *y col*, 2015), estudios sobre el desempeño por durabilidad del hormigón a pie de obra, se han centrado en la influencia de la carbonatación también bajo la condición de exposición al exterior, con el propósito de devolverle a las construcciones sus condiciones iniciales de *Vup*. Estudios similares fueron ejecutados más recientes en varias construcciones en zonas costeras de elevado potencial constructivo en Ecuador (Moreira y Guerra; Veliz y Guerra, 2024; Zambraro y Guerra; Navarino y Guerra, 2025). De manera general los resultados permitieron demostrar, que la carbonatación influyó también en el deterioro anticipado en las construcciones producto a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en las estructuras emplazadas cerca y lejos de la línea costera o zona del rompiente de las olas. Sin embargo, se demostró en todos los casos de estudio, que la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo influenciada por la carbonatación, para nada compromete la *Vup* de las estructuras en el tiempo. No siendo así en estudios basados en el desempeño por durabilidad del hormigón en Cuba en estructuras y probetas de hormigón armado emplazadas y colocadas respectivamente en zonas costeras de elevado potencial constructivo, donde la influencia de la penetración de iones cloruro, si compromete la *Vup* de las construcciones (Castañeda, *y col*, 2013^a; Castañeda, *y col*, 2013^b; Castañeda, *y col*, 2014^a; Castañeda, *y col*, 2014^b; Castañeda, *y col*, 2017).

La norma cubana (NC-120:2018), es el documento rector que regula las condiciones del desempeño por durabilidad del hormigón hidráulico y sus especificaciones para la construcción de edificaciones y obras civiles estructurales. Un aporte importante de esta norma, es la influencia de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Es muy válido destacar, la incorporación en dicha norma de dos parámetros muy importantes que pueden medir el desempeño



adecuado por durabilidad de los hormigones. Tal es el caso del porcentaje de porosidad capilar efectivo y la sorptividad. Ambos parámetros, indicadores de la impermeabilidad del hormigón, es decir, su capacidad de resistir la penetración de los agentes agresivos desde el exterior independientemente de la condición y el medio natural de exposición. La norma refleja un análisis muy general de los agentes agresivos a los que pueden estar expuestos los revestimientos de hormigón armado sometidos a la condición soterrada de exposición tomando la acción del CO₂ como un fenómeno poco posible de producirse. Esto hace que deja fuera de sus límites a estos tipos de construcciones por el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo inducida por la carbonatación. De ahí, la necesidad imperiosa en cuanto a la ejecución de este trabajo investigativo. Los resultados obtenidos, que pudieran ser incorporados a dicha norma permitirán solucionar, además, la carencia de conocimientos en cuanto al desempeño por durabilidad de los revestimientos de hormigón armado en las construcciones emplazadas en la condición subterránea de exposición en diferentes ambientes exteriores de Cuba. Es válido volver a destacar que, reportes o trabajos publicados sobre la temática abordada no fueron encontrados; por lo que pudiera tratarse de una primera experiencia en la rama de la construcción en el país. El objetivo general de este trabajo es: caracterizar el estado actual en cuanto al desempeño por durabilidad de los revestimientos de hormigón en nueve construcciones de hormigón armado emplazadas a la condición subterránea de exposición en ambientes exteriores costero, rural y urbano. Los objetivos específicos son: Evaluar la calidad del hormigón armado usado en la construcción de los revestimientos. Estimar las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en las tres construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición como un tipo de condición de exposición al interior. Demostrar los factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo bajo la condición subterránea de exposición. Por último, estimar la V_{up} que pudieran presentar las construcciones.

MATERIALES Y MÉTODOS.

Representatividad de la muestra. Extracción de los testigos cilíndricos

Se seleccionaron nueve construcciones con los años de explotación expuestas a la condición subterránea de exposición en tres regiones topográficas de Cuba (Tabla 1). Tres para cada ambiente exterior costero, rural y urbano. El número de construcciones es representativo de las 15 existentes en el momento del estudio (Montgomery, 1991).

Tabla 1. Principales características de las construcciones subterráneas seleccionadas.

Construcciones/Años	Ambiente exterior	Sistema constructivo	Longitud	Tipo de ventilación
OC-1/34	Costero	Prefabricado	70 m	Natural
OC-2/34	Costero	Prefabricado	150 m	Natural
OC-3/34	Costero	Prefabricado	67 m	Natural
OR-1/41	Rural	<i>In-situ</i>	165 m	Natural
OR-2/41	Rural	<i>In-situ</i>	165 m	Natural
OR-3/41	Rural	<i>In-situ</i>	700 m	Forzada
OU-1/35	Urbano	Prefabricado	2414 m	Deshumidificación
OU-2/35	Urbano	Prefabricado	842 m	Deshumidificación
OU-3/35	Urbano	Prefabricado	900 m	Natural

En las nueve construcciones seleccionadas, 10 testigos cilíndricos fueron extraídos de los revestimientos de hormigón armado para un total de 90 (30 por cada ambiente exterior). Las extracciones de los testigos de dimensiones 7,5 cm de diámetro (d) y entre 9 y 25 cm de altura (h), fueron ejecutadas colocando la máquina de extracción marca HILTI DD-500 de fabricación Liechtenstein de forma horizontal en las paredes y vertical en el techo. De esta forma, se garantizó una relación $h/d > 1$ y en la mayoría de los casos mayor a dos, según las especificaciones exigidas en la normativa cubana (NC-318:2003, RC-9002). Después de la extracción, los testigos cilíndricos se guardaron en bolsas de nylon bien selladas e identificadas. De manera general, los testigos se mostraron sin oquedades de color gris claro de la masa de hormigón con una buena distribución de los áridos.



Ejecución de los ensayos en cada uno de los testigos cilíndricos. Medición del complejo $HR-T$

De acuerdo con la RED DURAR de CyTED; 11 ensayos referenciados para la ejecución de los estudios de patología y diagnóstico en las construcciones deben ser realizados para demostrar la existencia o no de un desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón usado en las construcciones (Tabla 1). De estos, siete se le realizan al hormigón y cuatro al acero de refuerzo (Troconis, *y col*, 1997). Siete ensayos, cuatro destructivos y tres no destructivos (uno a pie de obra), fueron ejecutados en los 90 testigos cilíndricos extraídos.

Valores promedios mensuales del complejo humedad relativa-temperatura ($HR-T$) fueron obtenidos en el interior de tres construcciones seleccionadas en cada uno de los ambientes exteriores. Un equipo termohigrómetro calibrado marca TESTO de fabricación mexicana fue usado. Rango de precisiones $[0-100, \pm 2\% HR \text{ y } -20-55, \pm 5^{\circ}C]$. Los valores del complejo fueron registrados diariamente durante un año en las horas sinópticas (01:00, 07:00, 13:00, 19:00 horas). Los valores promedios diarios permitieron calcular los promedios mensuales del complejo, graficados en el año de estudio.

Ensayos no destructivos

Localización de los aceros de refuerzo y espesor de recubrimiento de hormigón (ERH).

Este ensayo, utilizado para definir la ubicación de los aceros de refuerzo y ERH , fue ejecutado a pie de obra antes de la extracción de los testigos cilíndrico en cada una de las construcciones expuesta a cada ambiente exterior. Un pacómetro digital HILTI PS 200 S Ferroskan de fabricación Liechtenstein fue utilizado. Líneas de coloración azul fueron trazadas en direcciones vertical y horizontal como indicadoras de la presencia de los aceros de refuerzo. De manera general, 30 valores para cada ambiente exterior fueron determinados. Diez por cada construcción.

Velocidad de pulso ultrasónico (VPU-m/s)

Las mediciones de VPU se ejecutaron a partir del método de la transmisión directa (NC-231:2002). Los transductores fueron colocados por ambas caras en cada uno de los testigos cilíndricos en posición horizontal. Un valor de VPU fue obtenido para cada testigo. De esta manera, 90 valores, 30 para cada ambiente exterior de fueron determinados. Un equipo de marca CCONTROLS de fabricación italiana, modelo 58 E 4800 para muestras pequeñas y medianas de hormigón fue utilizado. Antes de la ejecución de las mediciones, se realizó la calibración del equipo a partir de las barras de referencias de hormigón. En estas barras, el recorrido de la onda ultrasónica tiene un tiempo estándar al colocarle de forma directa los transductores.

Resistividad eléctrica aparente ($\rho-k\Omega\cdot cm$)

Al igual que en el ensayo anterior, un valor de ρ fue obtenido en cada testigo para un total de 90. Los 30 valores obtenidos para cada ambiente exterior fueron 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 (Andrade *y col*, 2004). Se utilizó un equipo marca GIATEC SURF™ de fabricación canadiense (Rango de medición: 0.1-1000 $k\Omega/cm$, Rango de frecuencia: 13-100 Hz, Exactitud: $\pm (0,1+1\%)$). Dispositivo para la medición rápida, fácil y precisa de la ρ a partir del método de las cuatro puntas en condiciones de laboratorio o a pie de obra. La técnica se basa en enviar una corriente eléctrica desde los electrodos externos colocados sobre la superficie lateral en los testigos y medir la diferencia de potencial entre los internos (Troconis, *y col*, 1997). De esta forma, el equipo calcula la resistencia eléctrica ($Re-k\Omega$) para la determinación de la Resistividad Eléctrica Aparente ($\rho-k\Omega\cdot cm$):

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

El valor de $a = 40$ mm es la distancia entre los electrodos. Representa además el espesor de recubrimiento de hormigón a que puede ser medida la ρ en los testigos cilíndricos extraídos. Para mejorar la electroconductividad del sistema de medición, las esponjas colocadas en las puntas de los cuatro electrodos en el equipo fueron humedecidas previas a las mediciones.



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

Para evaluar la corrosión del acero de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado, se empleó el método de RILEM (10):

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

I_c = Intensidad de corriente de corrosión ($\mu A/cm^2$)

ρ = Resistividad eléctrica aparente ($\Omega \cdot cm$)

De esta forma, un valor de I_c fue determinado en cada testigo cilíndrico para un total de 90, clasificados según los intervalos de clasificación en dicho comité (Tabla 2). Los valores fueron convertidos a mg/m^2 para la estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera en la condición soterrada de exposición, según las especificaciones exigidas en la RE DURAR a partir de la ley de Faraday. Un factor de conversión de 10 053 fue utilizado.

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

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

Ensayos destructivos

Resistencia a la compresión (R_c -MPa)

De acuerdo con la normativa cubana (NC-244:2005; NC-192:2007), 90 valores de R_c fueron obtenidos en una máquina de ensayo CCONTROLS de fabricación italiana de fuerza máxima de compresión axial de 2 000 kN. Este ensayo fue el último en ejecutarse debido a la destrucción total de los 90 testigos cilíndricos, 30 para cada ambiente exterior.

Carbonatación del hormigón

Este ensayo se realizó a pie de obra en cada una de las construcciones con el propósito de determinar la profundidad de carbonatación (X_{CO_2} - mm) y la constante de carbonatación (k_{CO_2} - $mm/año^{0,5}$) en el tiempo de explotación de cada construcción (t) (Tabla 1):

$$X_{CO_2} = k_{CO_2} \sqrt{t} \quad (2)$$

El procedimiento propuesto (NC 355:2004), fue basado en la aplicación de una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico por atomización de forma uniforme a menos de 15 minutos de ejecutadas las perforaciones. De esta forma, 90 valores de X_{CO_2} y k_{CO_2} fueron determinados y calculados respectivamente en las construcciones, 30 para cada ambiente exterior. Los valores de X_{CO_2} fueron medidos haciendo uso de una regla.

Porcentaje de porosidad capilar efectivo (ε -%)

El ε se determinó de acuerdo con la metodología establecida (NC-345:2005) a partir del flujo de absorción capilar del agua en probetas de hormigones y morteros. Las 90 probetas para la ejecución de los ensayos de absorción capilar de dimensiones 7,2 cm de diámetro y 2 cm de espesor fueron cortadas de los 10 testigos cilíndricos extraídos de cada construcción. Para el corte de las probetas, una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT de fabricación estadounidense fue utilizada. De esta forma, se determinaron de manera experimental 90 valores de ε , 10 para cada construcción o lo que es lo mismo, 30 para cada ambiente exterior.

Estimación de la vida útil de proyecto (V_{up}) de las construcciones seleccionadas

El procedimiento a emplear fue el descrito por la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08:2008). Establece que, para la estimación de la V_{up} en años es necesaria la suma del tiempo de iniciación (t_i) más el tiempo de propagación (t_p) de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo inducida por la carbonatación:

$$V_{up} = t_i + t_p \quad (4)$$

Los t_i y t_p fueron estimados a partir de las expresiones:

$$t_i = \left(\frac{X_c}{k_{CO_2}} \right)^2 \quad (5)$$

$$t_p = \frac{80ERH}{\phi V_c} \quad (6)$$

Por tanto:

$$V_{up} = \frac{X_c}{k_{CO_2}} + \frac{80ERH}{\phi V_c} \quad (7)$$

Donde:

X_c : Profundidad de carbonatación (mm).

k_{CO_2} : Constante de carbonatación (mm/año^{0.5}).

ϕ : Diámetro del acero de refuerzo (mm).

ERH : Espesor de recubrimiento de hormigón (mm).

V_c : Velocidad de corrosión estimada (mm/año) a partir de (3). Los 90 valores fueron convertidos de $\mu A/cm^2$ a mm/año (Tabla 2).

Para la estimación de la V_{up} fueron usados los promedios de los 30 valores de los t_i y t_p calculados.

Análisis estadístico comparativo.

Los 90 valores de los parámetros determinados que permiten caracterizar el estado actual en cuanto al desempeño por durabilidad del hormigón usado en los revestimientos de hormigón armado en las nueve construcciones emplazadas a la condición subterránea de exposición, fueron graficados para cada ambiente exterior (30 valores) y clasificados de acuerdo con su porcentaje referido al número total de ensayos ($n = 90$). Para la elaboración de los gráficos en forma de ejes de coordenada y de pastel, el programa OriginPro 6.1 fue utilizado. Por otra parte, dos métodos de análisis estadístico comparativo, prueba de rango múltiple y el análisis multivariado, fueron utilizados para demostrar los factores más influyentes en la I_c como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. En ambos, la variable dependiente fue lógicamente la I_c siendo los otros parámetros determinados las variables independientes para la data experimental de $n = 90$. El programa STATGRAPHICS CENTURION XV fue utilizado.

RESULTADOS

Ensayos no destructivos

Comportamiento del ERH

Para la clasificación de este parámetro, muy importante en el desempeño por durabilidad del hormigón y la vida útil de las construcciones; rangos de clasificación referidos en la normativa de la construcción en Cuba fueron utilizados (Figura. 1) (NC-120:2018). Es válido destacar, que estos rangos son mostrados en la normativa en dependencia de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera para la condición de exposición al exterior



y no para la que están expuestas las construcciones en este estudio, es decir, la condición soterrada de exposición como un caso particular de la condición interior de exposición. Es de notar claramente, la variabilidad muy elevada que presentaron los valores de *ERH*. Por otra parte, se observa cómo un 40 % de los valores mostraron un *ERH* > 40 mm típico para una agresividad corrosiva de la atmósfera de muy elevada (C5) bajo condiciones exteriores (Fig. 1).

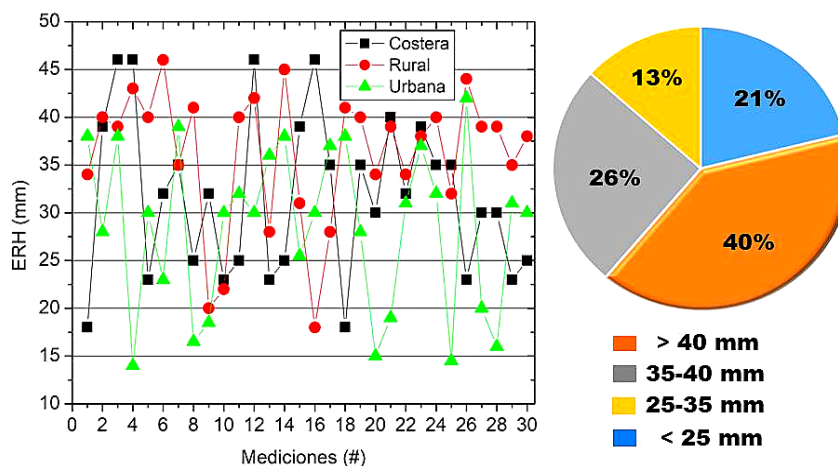


Fig. 1. Comportamiento y clasificación de los valores de ERH.

El resto de los valores de *ERH* se corresponden con las categorías de corrosividad elevada [35-40 mm], media [25-35 mm] y baja [*ERH* < 25 mm].

Comportamiento de la VPU

Con relación a la *VPU*, los valores menores fueron obtenidos en el ambiente exterior rural, así como una variabilidad elevada. Esto último concuerda con el comportamiento del *ERH* (Fig. 2). Sin embargo, de acuerdo con los intervalos de clasificación exigidos en la RED DURAR, el 88% de los valores indican una calidad elevada del hormigón [3001-4000 m/s], quedando solo un 10% con una calidad normal [2001-3000 m/s]. Exclusivamente el 2% presentó un hormigón durable [*VPU* > 4001] (Fig. 2).

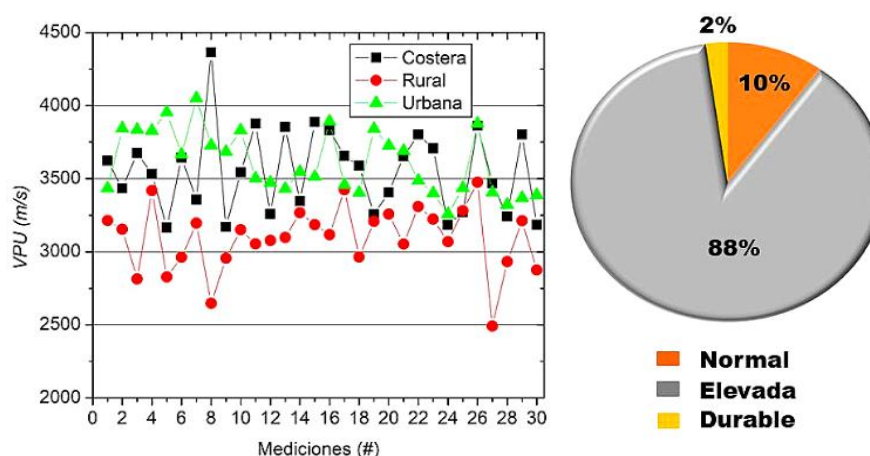


Fig. 2. Comportamiento y clasificación de los valores de VPU.



Comportamiento de la ρ

Al evaluar este parámetro, indicativo del grado de saturación de agua en los poros capilares del hormigón y contrario a su conductividad, se puede apreciar que los valores menores fueron obtenidos también en el ambiente exterior rural (Fig. 3). De esta forma, se mantiene la misma tendencia mostrada por el comportamiento de los valores de VPU . Según los intervalos de clasificación exigidos en RILEM TC 154-EMC para este parámetro, solo el 4% de los valores mostraron un riesgo insignificante de corrosión en los aceros de refuerzo embebido en el hormigón armado [$\rho > 100 \text{ k}\Omega\text{-cm}$] en las construcciones expuestas a la condición subterránea. Este bajo porcentaje, indicador también de un desempeño adecuado por durabilidad del hormigón, pudiera corresponderse con los picos de valores elevados en el ambiente exterior urbana (Fig. 3).

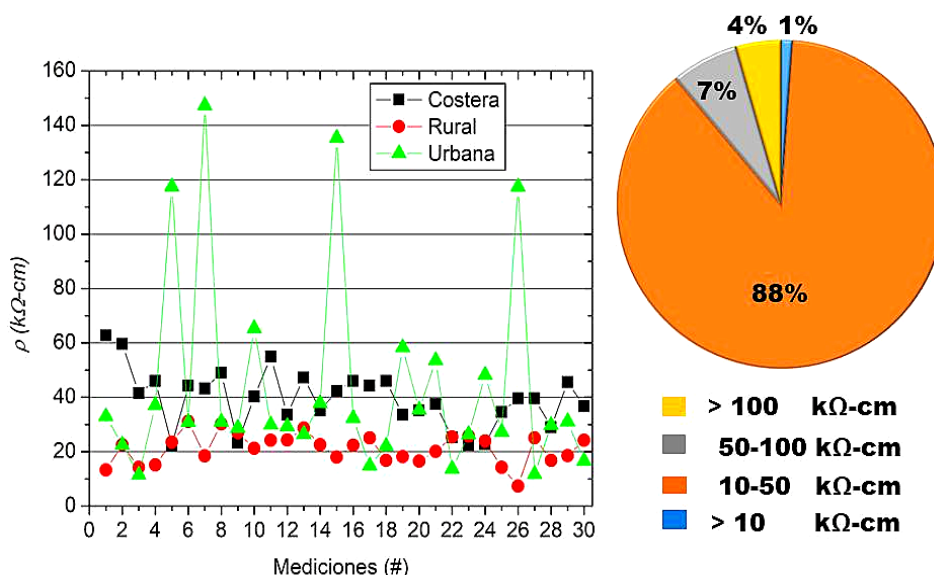


Fig. 3. Comportamiento y clasificación de los valores de ρ .

También, un bajo porcentaje de los valores (7%) representativo de un riesgo bajo de corrosión [50-100 kΩ-cm] fue obtenido. A pesar de que solo un 1% fue representativo de un riesgo elevado [$\rho < 10 \text{ k}\Omega\text{-cm}$]; un porcentaje riesgo moderado [10-50 kΩ-cm] resultó el más característico. De manera general, existe un impacto del ambiente agresivo bajo condiciones interiores que pudieran propiciar la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado en las construcciones expuestas a las condiciones subterráneas. Una mayor influencia de la humedad relativa interior en los ambientes rural y costero es posible.

Comportamiento de la I_c

Posterior a la ρ , es común analizar el comportamiento de la I_c . Es lógico que los valores mayores fueron obtenidos en el ambiente exterior rural (Fig. 4). De acuerdo con los intervalos de clasificación requeridos en RILEM TC 154-EMC (Tabla 2); se puede observar cómo un 93% de los valores cubren entre un nivel muy elevado (40%) y elevado (53%) de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado en las tres construcciones en cada ambiente exterior. Solo un 7% mostró un nivel moderado (Fig. 4). Ningún valor se correspondió con un nivel insignificante ($I_c < 0.1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$).

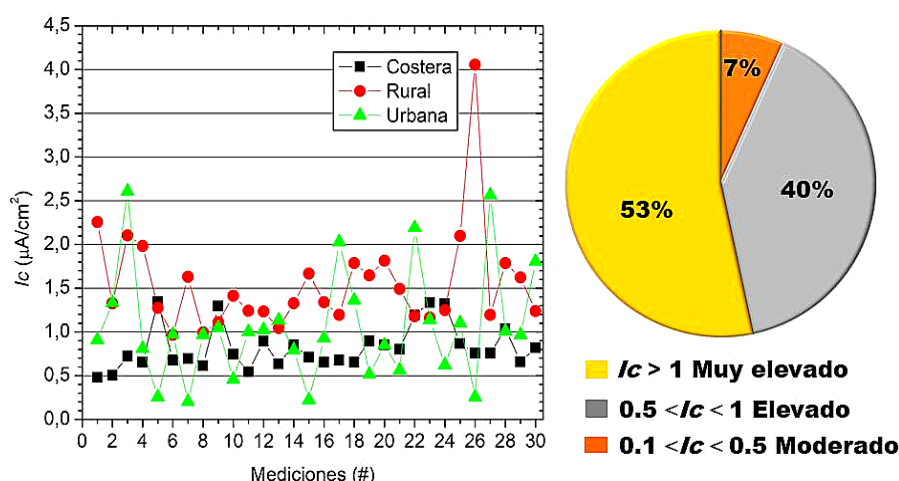


Fig. 4. Comportamiento y clasificación de los valores de I_c .

Ensayos destructivos

Comportamiento de la Resistencia a la Compresión (R_c -MPa)

Es de notar, como solamente un 2% de los 90 valores determinados, la R_c resultó mayor que 30 MPa (Fig. 5), es decir, que se pudiera considerar supuestamente un hormigón durable. Por otra parte, entre 20-30 MPa, el 19% de los valores de R_c estuvieron en ese intervalo. De esta forma, la mayoría de los valores de R_c representativo de un 79% (10-20 MPa y < 10 MPa) pueden ser considerados muy bajos, siendo indicativo virtualmente de un desempeño inadecuado por durabilidad (Fig. 5). Para este comportamiento mostrado de R_c , las construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición, pudieran haber dejado atrás su vida útil de proyecto, estando las mismas en su vida útil de servicio. Quizás en sus vidas última y residual.

Por otra parte, llama mucho la atención dos aspectos. Primero, como los valores menores de R_c fueron determinados en el ambiente exterior rural. Es de notar valores de R_c < 10 MPa. Quiere decir, que el 23% pudiera corresponderse con dicho ambiente (Fig. 5). Segundo, la variabilidad elevada que presentaron los valores de R_c en los tres ambientes exteriores. Se trata de dos indicadores que continúan confirmando la calidad inadecuada que pudo presentar el hormigón usado en la construcción de los revestimientos de hormigón armado.

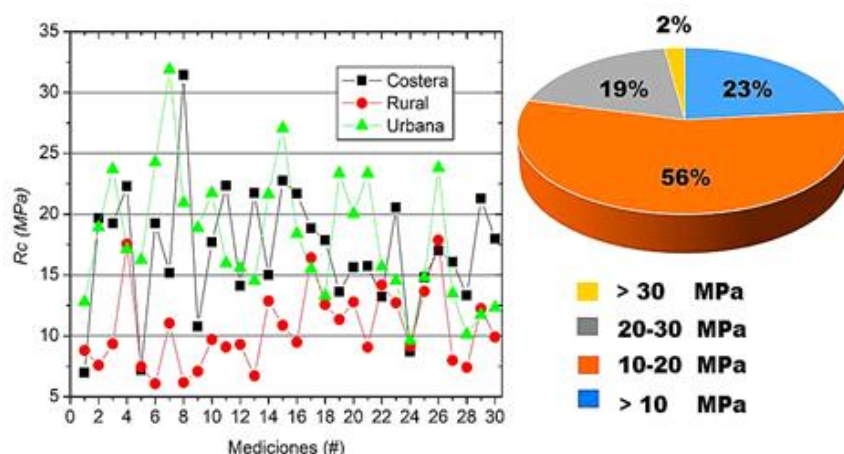


Fig. 5. Comportamiento y clasificación supuesta de los valores de R_c .



Comportamiento de la X_{CO_2} y la k_{CO_2}

Los valores más elevados de cada parámetro fueron determinados en las estructuras emplazadas en el ambiente exterior costero seguido del ambiente rural. De acuerdo con los intervalos de clasificación para la constante o velocidad de carbonatación (k_{CO_2}), un 59% de los valores son indicativo de un hormigón de calidad mala ($k_{CO_2} > 6$ mm/año^{0.5}) (Fig. 6). Un 27% se correspondió con una calidad moderada y solo un 14% con una calidad buena (Fig. 6).

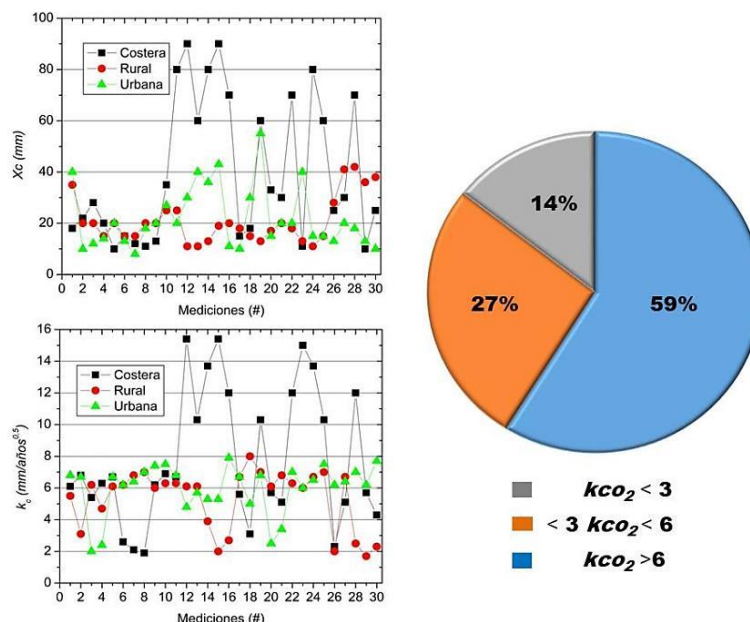


Fig. 6. Comportamiento los valores de la X_{CO_2} , la k_{CO_2} y su clasificación.

El comportamiento de ambos parámetros permite demostrar que, de forma general, los revestimientos de hormigón armado no presentaron una buena resistencia a la carbonatación en las nueve estructuras. Este comportamiento se corresponde con el mostrado por los otros parámetros basados en la evaluación del desempeño por durabilidad del hormigón en cuanto a su calidad.

Porcentaje de porosidad capilar efectivo

De acuerdo con los valores de este parámetro, muy importante también en la evaluación de la calidad y desempeño por durabilidad del hormigón a pie de obra o bajo condiciones de laboratorio, es de notar como solo un 29% demostró una calidad buena en los revestimientos estructurales. El resto entre una calidad moderada y una durabilidad inadecuada según los rangos de clasificación exigidos en la RED DURAR CyTED (Fig. 7). De ahí, la penetración elevada del CO_2 en toda la matriz de hormigón originándose el fenómeno de la carbonatación y posteriormente la intensa corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo como fue demostrado anteriormente.

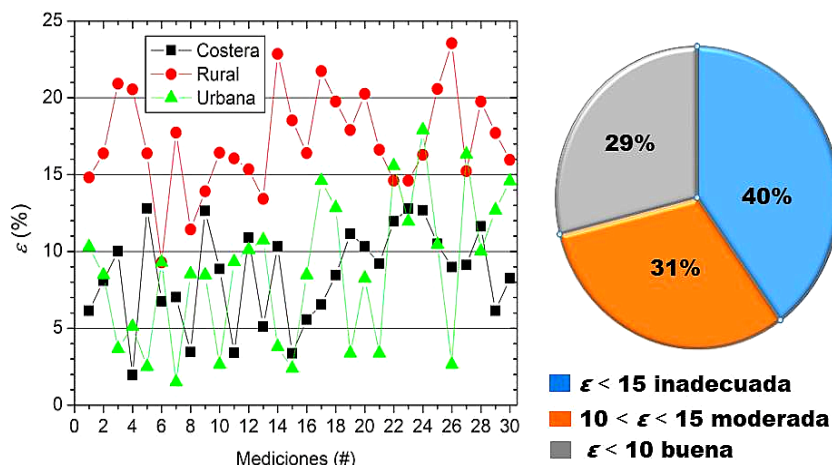


Fig. 7. Comportamiento y clasificación de los valores de ϵ

Llama la atención, como los valores mayores de ϵ fueron determinados en las tres estructuras emplazadas en el ambiente exterior rural (Fig. 7).

Categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera bajo condiciones soterradas de exposición.

Comportamiento del complejo HR-T

Lo más interesante en cuanto al comportamiento de los valores promedios mensuales del complejo HR-T, es ver como los valores de HR resultaron mayores que 70% (Fig. 8).

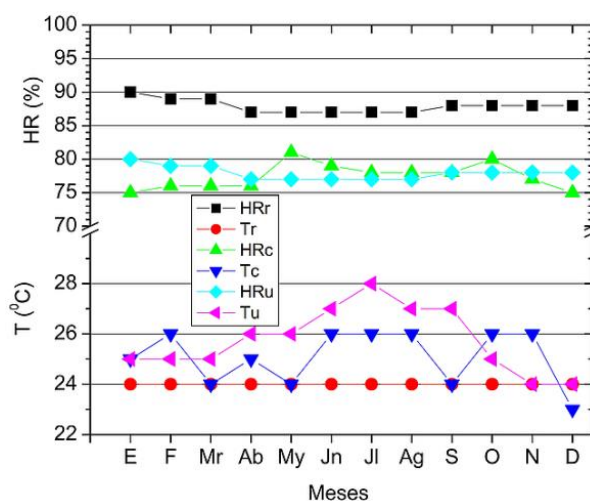


Fig. 8. Comportamiento del complejo HR-T en los tres ambientes exteriores

Los valores promedios más elevados de HR fueron determinados en el ambiente exterior rural. De acuerdo con la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica en condiciones interiores, se está en presencia de un nivel IV, típico de categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera para la condición de exposición al interior o soterradas. Por otra parte, una variación muy baja experimentó los valores promedios mensuales del complejo HR-T para los tres ambientes exteriores (Fig. 8).

Estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera

De acuerdo con los valores de velocidad de corrosión anual (r_{corr}), categorías medias (IC3) y elevada (IC4) fueron estimadas en las construcciones en los tres ambientes exteriores.

Tabla 3. Estimación de las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera

Costero			Rural		Urbano	
No.	r_{corr} mg/(m ² a)	Categoría (IC)	r_{corr} mg/(m ² a)	Categoría (IC)	r_{corr} mg/(m ² a)	Categoría (IC)
1	5 062,97		23 895,55		9 628,12	IC 3
2	5 338,36		14 055,58		14 119,13	IC 4
3	7 647,42	IC 3	22 296,16		27 634,52	
4	6 905,98		21 014,52		8 579,52	
5	14 225,05	IC 4	13 525,98		2 711,55	IC 3
6	7 181,37		10 221,28		10 274,24	IC4
7	7 350,84	IC 3	17 254,36		2 160,76	IC 3
8	6 492,89		10 517,85		10 253,05	
9	13 695,45	IC 4	11 767,71		11 068,64	IC4
10	7 891,04		14 966,49		4 861,728	
11	5 783,23		13 144,67		10 613,18	IC 3
12	9 458,65		13 081,12		10 856,82	
13	6 725,92		11 068,64		12 000,73	IC 4
14	9 024,38		14 055,58		8410,04	
15	7 509,72	IC 3	17 656,86		2 351,42	IC 3
16	6 905,98		14 182,68	IC 4	9 829,37	
17	7 181,37		12 646,84		21 469,98	
18	6 905,98		18 917,31		14 415,71	IC 4
19	9 490,43		17 455,61		5 454,88	
20	9 024,38		19 213,88		8 992,60	IC 3
21	8 484,19		15 813,85		5 942,11	
22	12 604,48		12 509,15		23196,48	IC 4
23	14 150,91	IC 4	12 318,49		12 043,10	
24	14 002,62		13 240		6 588,22	IC 3
25	9 183,26		22 222,01		11 661,79	IC 4
26	8 018,14	IC 3	42 939,96		2 711,55	IC 3
27	8 018,14		12 657,44		27 157,88	
28	10 952,12	IC 4	18 917,31		10 676,73	
29	6 969,53		17 180,22		10 221,28	IC 4
30	8 674,84	IC 3	13 134,08		19 139,74	

Las categorías de agresividad estimadas son referidas para el acero al carbono, según los intervalos de clasificación exigidos también en la normativa de la especialidad de corrosión atmosférica para la condición de exposición al interior ($[1\ 000 < r_{corr} \leq 10\ 000\ IC3]$, $[10\ 000 < r_{corr} \leq 70\ 000\ IC3]$) (ISO-11844:2006) Además, existe una correspondencia entre el comportamiento del complejo mensual de $HR-T$ y las categorías estimadas. Un deterioro anticipado en los revestimientos de hormigón armado en las construcciones debido a la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo, es posible. Otro aspecto interesante resulta en que la categoría IC4 fue la existente totalmente en las construcciones en el ambiente exterior urbano. Precisamente, donde el hormigón demostró un



menor desempeño por durabilidad de acuerdo con la descripción de los resultados. Un deterioro más anticipado en las construcciones sometidas bajo la condición soterrada de exposición es posible.

Factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión

De acuerdo con el primer análisis estadístico basado en la comparación a partir de la prueba del rango múltiple. Es de notar como solamente la *VPU* no cayó en el mismo grupo homogéneo (*GH*) en comparación con los otros ensayos para los tres ambientes exteriores (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis estadístico basado en la comparación a partir de la prueba del rango múltiple

Costero				Rural				Urbano			
<i>E</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>GH</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>GH</i>	<i>E</i>	<i>M</i>	<i>P</i>	<i>GH</i>
<i>Ic</i>		0,82	X	<i>Ic</i>		1,54	X	<i>Ic</i>		1,01	X
k_{CO_2}		7,82	X	k_{CO_2}		5,36	X	k_{CO_2}		6,01	X
ε	30	8,46	X	ε	30	17,16	X	ε	30	8,66	X
<i>Rc</i>		17,07	X	<i>Rc</i>		10,54	X	<i>Rc</i>		18,04	X
<i>ERH</i>		31,76	X	<i>ERH</i>		36,16	X	<i>ERH</i>		28,56	X
<i>Xc</i>		35,03	X	<i>Xc</i>		19,96	X	<i>Xc</i>		11,16	X
ρ		39,44	X	ρ		21,17	X	ρ		44,06	X
<i>VPU</i>		3 554	X	<i>VPU</i>		3 097	X	<i>VPU</i>		3 608	X
<i>Cont.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Dif.</i>	$\pm$ <i>Lím.</i>	<i>Cont.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Dif.</i>	$\pm$ <i>Lím.</i>	<i>Cont.</i>	<i>Sig.</i>	<i>Dif.</i>	$\pm$ <i>Lím.</i>
<i>Ic-Rc</i>		-16,24		<i>Ic-Rc</i>		-8,99		<i>Ic-Rc</i>		-16,98	
<i>Ic-VPU</i>	*	-3554		<i>Ic-VPU</i>	*	-3095		<i>Ic-VPU</i>	*	-3607	
<i>Ic-ρ</i>		-38,62		<i>Ic-ρ</i>		-19,62		<i>Ic-ρ</i>		-39,62	
<i>Ic-ERH</i>		-30,94	39,94	<i>Ic-ERH</i>		-34,61	39,94	<i>Ic-ERH</i>		-27,51	39,94
<i>Ic-Xc</i>		-34,21		<i>Ic-Xc</i>		-18,41		<i>Ic-Xc</i>		-10,11	
<i>Ic-k_{CO_2}</i>		-5,18		<i>Ic-k_{CO_2}</i>		-1,26		<i>Ic-k_{CO_2}</i>		-0,82	
<i>Ic-ε</i>		-7,64		<i>Ic-ε</i>		-2,61		<i>Ic-ε</i>		-7,60	

Leyenda. *E*: Ensayos, *M*: # de mediciones, *P*: Promedios, *GH*: Grupos Homogéneos, *Cont*: Contraste, *Sig*: Diferencia significativa, *Dif*: Valor de la diferencia. *Lím*: Límite.

La mitad inferior muestra la diferencia calculada (*Dif.*) entre cada par de valores promedios o contraste (*Cont.*) (Tabla 4). El asterisco en rojo que se encuentra en la columna a la derecha del par (*Ic-VPU*) es indicativo de la existencia de una diferencia estadísticamente significativa para un nivel de confianza del 95%. De esta forma, se identificaron dos grupos homogéneos según la alineación del signo X en la parte superior, donde dentro de los niveles que tienen el signo X forman un grupo homogéneo (*GH*) de medias o valores promedios que no tienen diferencias significativas para los tres ambientes exteriores (Tabla 4). El valor de la diferencia es menor que el del límite establecido ($Dif < \pm Lím$) para los tres ambientes exteriores (Tabla 4). Por tanto, los valores promedios de los otros ensayos destructivos (

k_{CO_2} , ε , *Xc*) o no destructivos (*Rc*, *ERH*, ρ) resultaron influyentes en la *Ic* como un indicador del deterioro que vienen sufriendo los revestimientos estructurales de hormigón armado bajo la condición subterránea de exposición a partir de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

Por otra parte, es de notar en la mitad inferior, como los pares *Ic- k_{CO_2}* y *Ic- ε* mostraron un valor menor de diferencia (*Dif.*) en los tres ambientes exteriores, en comparación con los otros valores para el mismo grupo homogéneo (Tabla 4). De esta forma se demuestra que, entre los factores, los más influyentes fueron la k_{CO_2} y el ε . Sin embargo, de acuerdo con los indicadores estadísticos (*I.E*) a partir del segundo método relacionado con el análisis multivariado, la disminución de los parámetros *Rc*, *VPU* y ρ según el signo negativo del coeficiente de



regresión (r), así como un incremento en el ε (signo positivo en el r) resultaron los factores más influyentes. Niveles de significación ($p < 0,05$) (Tabla 5).

Tabla 5. Análisis multivariado donde se demuestran los factores más influyentes

Costera n = 30								
	$I.E$	R_c (MPa)	VPU (m/s)	ρ (k Ω /cm)	ERH (mm)	X_c (mm)	k_{CO_2} (mm/año ^{0.5})	ε (%)
I_c	r	-0,53	-0,47	-0,95	0,10	0,23	0,22	0,80
	p	0,0024	0,0074	0,0000	0,5968	0,2203	0,2223	0,0000
Rural n = 30								
I_c	r	-0,54	-0,42	-0,89	0,18	0,19	0,27	0,63
	p	0,0018	0,0202	0,0000	0,5968	0,2203	0,2223	0,0002
Urbana n = 30								
I_c	r	-0,36	-0,35	-0,73	0,03	0,002	0,003	0,59
	p	0,0442	0,0556	0,0000	0,8478	0,9891	0,9870	0,0006

El factor influyente de ε aparece en ambos análisis estadísticos en la I_c como un indicador en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado bajo la condición soterrada de exposición para los tres ambientes (Tablas 4 y 5).

Estimación de la V_{up}

De acuerdo con la suma de los tiempos promedios de iniciación y propagación, la V_{up} de los revestimientos de hormigón armado o lo que es lo mismo, las construcciones expuestas a la condición soterrada de exposición no sobrepasan los 80 años para los tres ambientes exteriores (Tabla 6). Se trata del valor (80) basado en el estado límite de durabilidad (ELD) exigido para estos tipos de construcciones expuesta a este tipo de condición de exposición (EHE-08:2008).

Tabla 6. Vida útil de proyecto estimada en los revestimientos de hormigón armado en los tres ambientes exteriores

Ambiente exterior	Tiempo promedio de iniciación (t_i - años)	Tiempo promedio de propagación (t_p - años)	Vida útil de proyecto (V_{up} - años)
Costera	34	21	55
Rural	30	12	42



Urbana	35	15	50
--------	----	----	----

De manera general, existe una correspondencia entre la V_{up} estimada para los tres ambientes exteriores y el desempeño por durabilidad que presentó el hormigón armado usado en los revestimientos estructurales como fue demostrado, haciendo uso del comportamiento de los valores de los ensayos destructivos y no destructivos.

DISCUSIÓN

La variación elevada de los valores de espesor de recubrimiento de hormigón y los otros parámetros determinados en los ensayos destructivos y no destructivos, es un indicador y resultado del hormigonado inadecuado durante el momento de la construcción del revestimiento para los tres ambientes exteriores (Figuras 1-7) (Howland y Castañeda, 2017). Factor fundamental en el desempeño inadecuado por durabilidad del hormigón en cuanto a su impropia calidad, usado en la construcción de los revestimientos de hormigón armado para no garantizar plazos elevados de $V_{up} > 80$ años en las construcciones sometidas a la condición soterrada de exposición. Se continúa demostrando que el hormigón tiene que ser visto, por su carácter formáceo, como un recubrimiento basado en un sistema de protección primario contra la corrosión atmosférica del acero de refuerzo independiente de su medio natural de exposición los cuales son la atmósfera, las aguas de mar, ríos, lagos, manantiales y el suelo. En este último medio, referido a la condición soterrada de exposición como un tipo de condición de exposición al interior en estudios de corrosión atmosférica. De esta forma, además de su elaboración, traslado, colocación, compactación, curado y acabado final, dos aspectos fundamentales hay que tener en cuenta a pie de obra. Estos son uniformidad y espesor durable del recubrimiento de hormigón.

Actualmente en Cuba, para que el hormigón presente un desempeño adecuado por durabilidad y garantice plazos elevados de V_{up} en las estructuras sometidas a condición de exposición al exterior con una agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (C4), muy elevada (C5), extrema (CX), incluso mayor que extrema ($>CX$), esta última como una propuesta de categoría en atmósferas costeras-industriales (Castañeda, y col, 2023). Se demostró la necesidad de elaborarlo con una relación agua/cemento 0,4 dosificado teniendo en cuenta en su diseño el logro de un porcentaje mínimo de vacío entre los agregados finos y gruesos con un asentamiento de 15 cm; por lo que se estuvo en presencia de una mezcla de consistencia fluida, es decir, de una buena laborabilidad. La combinación entre los agregados y el cemento (P-350) como aglomerante hidráulico fue: cemento 365 kg; arena natural de río II 750 kg; gravilla 1 030 kg. El volumen de agua y el porcentaje de aditivo superplastificante usado fueron 148 L y 1,7% respectivamente (Castañeda, y col, 2024). Los requerimientos por durabilidad obtenidos, que están permitiendo actualmente garantizar plazos elevados de $V_{up} > 80$ años en las estructuras que se construyen y que pretenden ser construidas en zonas costeras de Cuba de elevado potencial constructivo, aparecen en la normativa cubana de la construcción basada en las especificaciones del hormigón hidráulico (Tabla 7) (NC-120:2018).

Tabla 7. Requerimientos por durabilidad que aparecen en la normativa cubana de la construcción.

a/c	ERH (cm)	VPU (m/s)	Rc (MPa)	ε (%)
	[40-60]	[2340-2360]	>35	[5-9]
0,4	I_c ($\mu A/cm^2$)	t_i (años)	t_p (años)	V_{up} (años)
	[0,001-0,002]	40	> 40	> 80

Un resultado similar, fue obtenido en los diferentes tipos de hormigones que fueron usados en el proyecto internacional DURACON. Diferentes probetas de hormigón armado fueron colocadas en zonas costeras de



elevado potencial constructivo a cortas distancias del mar o zona del rompiente de las olas en Portugal, Venezuela, España, Colombia y Chile (Troconis, *y col*, 2006 y 2007). Plazos elevados de V_{up} en las construcciones vienen siendo garantizados.

De acuerdo con la descripción de los resultados, ninguno de los hormigones usados en la construcción de los revestimientos de hormigón armado sometidos a la condición soterrada de exposición en los tres ambientes exteriores, cumplió con los requerimientos mostrados (Tabla 7). Por tanto, se pudiera hacer una extensión en la normativa cubana de la construcción que indique la aplicación de estos requerimientos para garantizar el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón, en las obras que se pretenden construir sometidas a la condición soterrada de exposición independiente del tipo de ambiente exterior. La resistencia a la carbonatación de este tipo de hormigón en cuanto a su calidad (Tabla 7), fue demostrada frente a un impacto muy elevado del ambiente agresivo costero de la atmósfera de Cuba en una zona del malecón habanero a 20 m desde la línea costera o zona del rompiente de las olas. Valores de la

k_{CO_2} resultaron alrededor de $1 \text{ mm/años}^{0.5}$ para un tiempo de exposición de 30 años (Carvajal, *y col*, 2011). Se continúa confirmando entonces, la necesidad de usar este tipo de hormigón; más si se estima y/o determina la existencia de categorías media (IC3) y elevada (IC4) de agresividad corrosiva de la atmósfera en la condición soterrada de exposición como un tipo de condición de exposición al interior.

De acuerdo con otros estudios ejecutados en el clima tropical costero de Cuba en el siglo pasado y otros más recientes en el presente siglo. Para la condición de exposición al interior, ya sea efecto estufa y espacio cerrado, un nivel IV de HR fue obtenido también de acuerdo con el comportamiento de los valores promedios mensuales. Una categoría elevada (IC4) de agresividad corrosiva para el acero al carbono fue demostrada (Corvo, *y col*, 2007, 2008^a y 2008^b, Castañeda, *y col*, 2020 y 2021). Valores promedios mensuales muy elevados influyeron en una corrosión atmosférica mayor en el acero al carbono, así como en el cobre, cinc y aluminio expuestas las probetas a las diferentes condiciones interiores de exposición mencionadas. La influencia de la HR quedó demostrada. Como mismo sucedió en este estudio, las construcciones sometidas a la condición soterrada de exposición al ambiente exterior urbano al presentar los valores promedios mensuales mayores de HR , valores mayores anuales de velocidad de corrosión fueron obtenidos, indicadores de una agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (IC4); por lo que se continúa demostrando la necesidad del uso del tipo de hormigón mostrado para la condición soterrada de exposición (Tabla 7). Para este tipo de condición y de manera general para la de interior, una influencia del viento no existe, así como una diferencia en las estaciones del año principalmente verano e invierno como sucede para la condición de exposición al exterior originándose cambios bruscos en el complejo $HR-T$ (Castañeda, *y col*, 2015 y 2018)

Por otra parte, como bien se conoce, el hormigón gana el agua más rápido de lo que la pierde. Esto trae como resultado el incremento de la carbonatación con una mayor influencia en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado. Más, si la temperatura promedio de la atmósfera interior no sufre variación como sucedió en las construcciones sometida al ambiente exterior urbano a valores promedios elevados de HR .

Para otros tipos de hormigones elaborados con el mismo diseño de mezcla, pero de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 con un $EHR = 40 \text{ mm}$; un desempeño adecuado por durabilidad no fue garantizado. La V_{up} de las estructuras construidas no superó los cinco años también frente a una agresividad corrosiva de la atmósfera elevada (C4), muy elevada (C5), extrema (CX), incluso mayor que extrema ($>CX$). El resultado fue confirmado con la observación visual de las grietas en las probetas de hormigón armado producto de la intensa corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado. Tampoco resultaron resistentes al fenómeno de la carbonatación (Castañeda, *y col*, 2023 y 2024). Es casi seguro, que el hormigón usado en la construcción de los revestimientos estructurales haya sido similar. Aquí los factores influyentes en la I_c como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo fueron muy similares a los demostrados en este estudio para los revestimientos estructurales de hormigón armado sometidos a la condición soterrada de exposición. Con la única diferencia en cuanto a la deposición elevada de sales de iones cloruro de la atmósfera, lo cual originó una penetración elevada de este peligroso agente agresivo que, al llegar a los aceros de refuerzo originó y desarrolló de manera considerable la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. De ahí, la necesidad de no usar hormigones similares en las construcciones futuras sometidas a las condiciones soterradas de exposición.



Se continúa demostrando, como mismo sucedió para la condición de exposición al exterior, que el ensayo de *VPU* resultó necesario, pero no suficiente. Los resultados obtenidos independientes del medio y la condición de exposición a pesar de mostrar hormigones de calidad durable, normal y elevada, plazos elevados de *Vup* no fueron garantizados como sucedió en este estudio. Para un hormigón de relación agua/cemento 0,5 dosificado con el mismo diseño de mezcla, mostró una calidad durable según los valores obtenidos de *VPU*. La *Rc* promedio fue de 30 MPa en testigos cilíndricos (30 cm altura y 15 cm de diámetro). Sin embargo, valores de ε estuvieron entre 11-14% siendo un hormigón de calidad moderada (Castañeda, y col, 2023 y 2024).

Se mantiene el ε como un ensayo y parámetro necesario y suficiente demostrado por ambos métodos estadísticos como un factor muy influyente en la *Ic* indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado usado en la construcción de los revestimientos. Este importante indicador en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón y no solo en el usado en los revestimientos de hormigón armado en las construcciones sometidas a la condición soterrada de exposición se conoce generalmente a pie de obra, es decir, no se tienen en cuenta antes de proceder con las labores de construcción. De ahí su inclusión en la normativa de la especialidad de la construcción en Cuba como un factor muy determinante en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón (NC-120:2018). Se continúa demostrando en este estudio que, si el *ERH* es el requerido para categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera, pero el hormigón usado presenta valores elevados de ε que demuestren una calidad moderada e inadecuada, un desempeño adecuado por durabilidad no es garantizado de forma general, es decir, independiente del medio o condición de exposición a que pudiera ser sometido el hormigón armado.

CONCLUSIONES

Un estudio, basado en el desempeño por durabilidad del hormigón usado en la construcción de los revestimientos de hormigón armado en construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición a la atmósfera en ambientes exteriores costero, rural y urbano, fue ejecutado en Cuba. La caracterización de los resultados obtenidos, a partir la variación muy elevada que mostraron los 30 valores de cada ensayo destructivos o no destructivos a pie de obra y bajo condiciones de laboratorio, permitieron demostrar la calidad inadecuada que presentó el hormigón en los tres ambientes exteriores. De esta forma, un desempeño adecuado por durabilidad de este apreciado material de la construcción, no fue garantizado, expuesto posiblemente a categorías estimadas de agresividad corrosiva de la atmósfera de media y principalmente elevada para el acero al carbono en la condición subterránea, como un tipo de condición de exposición al interior. Plazos elevados de vida útil de proyecto, superiores a 80 años, no fueron obtenidos para las construcciones expuestas a la condición subterránea de exposición en los tres ambientes exteriores seleccionados. Factores influyentes en la intensidad de corriente de corrosión demostrados por los análisis estadísticos, como un indicador de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, resultaron muy coincidentes, con el hormigón armado expuesto a la condición de exposición al exterior frente a categorías muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera en zonas costeras de elevado potencial constructivo del clima tropical de Cuba a cortas distancias desde la línea costera. Por tanto, para garantizar un desempeño adecuado por durabilidad, que proporcione plazos elevados de vida útil de proyecto, la normativa cubana de la construcción pudiera hacer una extensión basada en que, los requerimientos por durabilidad obtenidos para la condición de exposición al exterior que vienen garantizando plazos elevados de vida útil de proyecto mayor que 80 años, donde el hormigón mostró una resistencia elevada a la carbonatación, pudieran ser usados en la construcción de los revestimientos de hormigón armado en las construcciones sometida a la condición subterránea de exposición. Se continúa demostrando, que el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico pudiera resultar necesario, pero no suficiente, siendo el porcentaje de porosidad capilar efectivo un factor muy influyente, demostrado por los dos métodos estadísticos empleados en el estudio. Para valores elevados de este parámetro, indicativo de un hormigón de mala calidad, expuesto a un nivel elevado de humedad relativa, típico de esta importante variable climática en la condición subterránea de exposición y para otros tipos de condición de exposición al interior, un incremento en el fenómeno de la carbonatación tiene lugar en el hormigón, acelerando de manera considerable la corrosión atmosférica en el acero de refuerzo embebido en los revestimientos de hormigón armado, principalmente en las construcciones en el ambiente rural donde, para la condición subterránea de exposición, valores mayores de humedad relativa y plazos menores de vida útil fueron demostrados.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- Castañeda, A; Rodríguez, Manuel.; Economic losses caused by the phenomenon of atmospheric corrosion of reinforcement steel embedded in reinforced concrete. Preliminary results. REVISTA CENIC, EBSCO, CIENCIAS QUÍMICAS, Vol. 45, No. 1, pp. 52-59. LA HABANA, CUBA, 2014.
- Castañeda, Abel; Marrero, R; Valdés, C; Howland, J, J.; Economic contribution in studies of atmospheric corrosion and deterioration of materials in strategic zones of the tropical coastal climate of Cuba. Chemical Technology Journal, Vol. 40, N° 1. ISSN 2224 6185. Year 2020.
- Cubana N. NC-250 Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural. Oficina Nacional de Normalización; 2005.
- Oroza, A; Castañeda, A; Marrero, M.; Edificio Bacardí: historia arquitectónica y estado de conservación de un ícono habanero del siglo XX. Yachana Revista Científica Vol. 12 No. 2. Julio-Diciembre, 2023
- 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.
- Silva, R. R. C., Bertoldo, C.; Simulación de manifestaciones patológicas en muro pantalla mediante propagación de pulso ultrasónico.; Revista ALCONPAT, 12 (2), pp. 200 – 210, 2022.
- Ortega, Madrigal L; Fran, Bretones, J, M; Begoña, Serrano, L.; Propuesta metodológica para estimación de la vida útil de la envolvente de los edificios. Revista de la Construcción, 2015, 14(1) 60-68.
- 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.
- Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Pérez, T.; Corrosion of steel reinforced concrete in tropical coastal atmosphere of Havana City. QUÍMICA NOVA, BRASIL. Vol. 36, No. 2, 220-229, 2013.
- Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Pérez, T.; Atmospheric corrosion of reinforced concrete steel in tropical coastal regions. ENGINEERING JOURNALS. TAILANDIA. Vol. 17, No.2, 2013.
- Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R.; Study of atmospheric corrosion of reinforcement steel in Havana, Cuba. CHILEAN CONSTRUCTION JOURNAL. Volume 143. No.1, pp. 32-40. 2014.
- Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R.; Study of the aggressivity corrosion of the atmosphere for reinforcement steel embedded in reinforced concrete in Havana. LATIN AMERICAN JOURNAL OF METALLURGY AND MATERIALS. Volume 35. no.2, pp. 173-188. 2014.
- Castañeda, A; Corvo, F; Howland, J, J; Marrero, R.; Concrete quality assessment before building structures submitting to environmental exposure conditions. REVISTA DE LA CONSTRUCCIÓN DE CHILE. Volumen 16. No.3, pp. 374-387. Año. 2017.
- Cubana N. NC-120. Hormigón hidráulico. Especificaciones Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2018.
- Montgomery, D,C.; Diseño y análisis de experimentos. México, Editorial: D.F, 1991. 564 p.
- Cubana N. NC 695 Hormigón armado. Determinación de la corrosión del acero de refuerzo por métodos electroquímicos galvanostáticos a probetas previamente elaboradas. Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2009. p. 8.



- Construcción Rdl. RC-9002 Especificaciones para la realización de estudios complementarios para la estimación de la resistencia a compresión de los hormigones en las construcciones Cuba: Ministerio de la Construcción; 2000.
- Cubana N. NC 231. Determinación, interpretación y aplicación de la velocidad del pulso ultrasónico en el hormigón. Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2007.
- 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.
- Cubana N. NC-244. Hormigón endurecido-Determinación de la resistencia a la compresión en probetas cilíndricas Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2005.
- Cubana N. NC 192. Hormigón hidráulico-Cálculo de la resistencia característica real a la compresión. Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2007
- Cubana N. NC-355. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2004.
- Cubana N. NC 345:2011. Hormigón endurecido- Determinación de la absorción de agua por capilaridad Cuba: Oficina Nacional de Normalización; 2011.
- EHE. EHE-08. Instrucción del hormigón estructural. España: Suplemento del Boletín Oficial del Estado N° 203; 2008.
- Howland, J, J; Castañeda, A.; 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.
- 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, 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.
- 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
- 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.
- Corvo, F; Torrens A. D, Betancourt, N; Pérez, J; González, E.; Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosión. Corrosion Science 49 (2007) 418–435
- Corvo, F., Pérez, T., Dzib, L, R., Martín, Y., Castañeda, A., González, E., Pérez, J., Outdoor-Indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. Revista Corrosion Science. 50, (2008), pp. 220 – 230.
- Corvo, F., Torrens, A, D., Martín, Y., González, E., Pérez, J., Valdés, C., Castañeda, A., Portilla, C., Corrosión atmosférica del acero en interiores. Sus particularidades en el clima tropical de Cuba. Revista de Metalurgia, (44), 2. Marzo-abril, 2008, pp.1-9.
- Castañeda, A; Corvo, F; Pech, I; Valdés, C; Marrero, R; Del Angel-Meraz, E.; Atmospheric Corrosion in an Oil Refinery Located on a Tropical Island under New Pollutant Situation. Revista Journal Material Engineering and Perfomance. Vol. 30, pages 4529–4542 (2021).
- 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.
- CONTRIBUCIÓN AUTORAL



Reneilder Martínez Domínguez: Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las construcciones. Curación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición).

Abel Castañeda Valdés: Autor para la correspondencia. Conceptualización, curación de datos, análisis estadístico. Redacción del artículo (revisión y edición).

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Reneilder Martínez Domínguez: Autor principal. Responsable de la ejecución de las mediciones en las construcciones. Curación de datos, análisis formal, Redacción del artículo (revisión y edición).

Abel Castañeda Valdés: Autor para la correspondencia. Conceptualización, curación de datos, análisis estadístico. Redacción del artículo (revisión y edición).

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

