

CONCENTRACIÓN DE IONES CLORUROS EN EL HORMIGÓN ARMADO EXPUESTO A DIFERENTES CONDICIONES Y MEDIOS DE EXPOSICIÓN EN CUBA

CHLORIDE ION CONCENTRATION IN REINFORCED CONCRETE EXPOSED TO DIFFERENT MEDIUMS AND EXPOSURE CONDITIONS IN CUBA

Abel Castañeda Valdés^a
Alberto Hernández Oroza^{b,*}

^aCentro Nacional de Investigaciones Científicas CNIC, Avenida 25, Esquina 21-A, No. 15202, Cubanacán, Playa, La Habana, Cuba. Código Postal 11608.

^b Empresa de Proyectos de Arquitectura y Urbanismo. Restaura. OSDE Centro Histórico. Departamento de Diagnóstico. Habana Vieja. Cuba

^{b,*} alberto@diagnosticos.proyectos.ohc.cu

Recibido: 23 de septiembre de 2024;

Aceptado: 12 de noviembre de 2024;

RESUMEN

Se realizó un estudio con el propósito de demostrar el comportamiento de la concentración de cloruros desde la superficie hasta diferentes profundidades, en elementos estructurales de tres estructuras y en probetas de hormigón armado expuestos a diferentes condiciones y medios de exposición en la Habana, Cuba. A partir de una comparación entre las concentraciones de iones cloruro solubles y enlazados se demostró, que el hormigón armado usado en los elementos estructurales en dos estructuras, pudo ser elaborado usando arena y/o agua de mar como de amasado. Condición necesaria y suficiente, para que no ocurriera un comportamiento difusivo aparente de cloruros, teniendo en cuenta la condición y el medio natural de exposición. Los fenómenos de la eflorescencia y la carbonatación a ciertos espesores de recubrimiento y en la superficie, influyeron también en la no ocurrencia de un comportamiento difusivo aparente en toda la masa de hormigón expuesto a la condición de exposición al interior bajo el efecto de abrigo ventilado. Se confirmó, que un hormigón armado de moderada calidad, elaborado con arena y/o agua de mar, puede ser usado en la construcción de pilotes que sostienen la loza armada en una bahía, siempre y cuando esté expuesto a la condición de exposición de inmersión total en el agua de mar, y sin zonas de marea y salpicaduras significativas. Se demostró, confirmado con la observación visual, que concentraciones elevadas de iones cloruro, resultaron en una condición necesaria pero no suficiente en el origen y desarrollo del fenómeno de la corrosión en los aceros de refuerzo, siempre y cuando el hormigón armado este expuesto a la condición de exposición de inmersión total en el agua de mar. En caso de que el hormigón no fuera elaborado con arena y/o agua de mar, un comportamiento difusivo aparente fue demostrado en un elemento estructural de otra de las estructuras seleccionadas, así como en probetas de hormigón armado, causando un deterioro muy anticipado en el tiempo, debido a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, ante categorías muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera simuladas o no, confirmado con la observación visual de las probetas.

Palabras claves: cloruro, estructuras, hormigón armado, elementos estructurales, corrosión.

ABSTRACT

In order to demonstrated the behavior of the chloride concentration from the surface to different depths, in building elements of the three structures and in reinforced concrete probes, exposed to different condition and means of exposure in Havana City, Cuba, a study was carried out. From a comparison between the concentration of soluble and bound chloride ions, it was demonstrated that the concrete used in the building elements in two structures could be casted with sand and seawater as a mixture. Necessary and sufficient condition, so that no apparent diffusive behavior of chloride occurs, taking into account the condition and the natural environment of exposure. The phenomena of efflorescence and carbonation at certain coating thicknesses and on the surface also influenced the non-occurrence of apparent diffusion behavior in the entire concrete mass of concrete exposed to the interior exposure condition under the ventilated shelter effect. It was confirmed that a moderate quality reinforced concrete, casted with sand and seawater, can be used in the building of piles that support the reinforced earthenware in a bay, as long as it is exposed to the immersion exposure condition total in seawater, and without significant tidal zones and splashed. It was demonstrated, confirmed with visual observation, that high concentration of chloride ions resulted in a necessary but no sufficient condition in the origin and development of the corrosion phenomenon in reinforcement steel, as long as, the concrete is exposed to the immersion exposure condition total of seawater. In case the concrete was not casted with sand and seawater, an apparent diffusive behavior was demonstrated in a structural element of another of the selected structures, as well as in reinforced concrete probes, causing a very early deterioration over time, due to atmospheric corrosion of reinforcement steel, in the presence of very high corrosivity categories of the atmospheres, simulated or not, confirmed with visual observation on the probes.

Keywords: chloride, structures, reinforced concrete, building elements, corrosion.

INTRODUCCIÓN

El número de ensayos a realizar a la hora de ejecutar los estudios de diagnóstico en las estructuras, así como en probetas de hormigón armado son 10. Siete se le realizan al hormigón y los otros tres a los aceros de refuerzo. En el hormigón se evalúan: resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico, esclerometría, resistividad eléctrica, carbonatación, porcentaje de porosidad capilar efectivo y concentración de iones cloruro. En los aceros de refuerzo se evalúan: potencial estacionario de corrosión, intensidad de corriente de corrosión como un indicador de la corrosión atmosférica y resistencia mecánica. Este último, a partir de ensayos de tracción para conocer generalmente la disminución de los límites de fluencia y rotura (Troconis, *et al*, 1997). La tendencia actual en Cuba y a nivel mundial es no contar con el personal, la tecnología, así como los insumos necesarios y suficientes para la ejecución de los 10 ensayos en los importantes estudios de diagnóstico, fundamentalmente a pie de obra en las estructuras (Hernández, 2023; Guerra, 2023). Se hace muy necesario como un primer objetivo de este estudio, demostrar la importancia en cuanto a la ejecución del ensayo, de determinación de la concentración de iones cloruro para valorar sus cambios en largos tiempos de exposición a diferentes profundidades en el hormigón. Por otra parte, en el momento de ejecutar un estudio de diagnóstico para proceder posteriormente con los trabajos de mantenimiento y desgraciadamente los de reparación, el personal encargado debe ubicarse bien en el ambiente natural de exposición y dentro de este, en la condición típica de exposición. Se trata de una herramienta ingenieril muy útil que, en ocasiones, no se tiene en cuenta a la hora de interpretar y analizar los resultados obtenidos, sobre todo en el comportamiento de la concentración de iones cloruro en el hormigón armado a diferentes profundidades, siempre con el propósito de tomar decisiones certeras muy relacionadas con el futuro de la estructura, sin caer en las labores de demolición que, para nada, son ingenieriles. Se entiende por medio de exposición, al medio natural al cual están expuestas las estructuras. Entre los medios naturales se encuentran: la atmósfera, el agua de mar, el agua de río, de lagos, las aguas subterráneas y el suelo (Viña, *et al*, 2021). La atmósfera por su gran extensión, es el medio natural de exposición al cual se encuentran expuestas la mayoría de las estructuras. Por otra parte, los pilotes que sostienen las losas armadas en puentes emplazados hacia el interior del mar, bahías y puertos, están expuestos a dos medios naturales de exposición, la atmósfera y el agua de mar. La condición de exposición, no es más que la condición típica a que está sometido un material, elemento estructural o la estructura en el medio natural de exposición. En la atmósfera, se tiene la condición de exposición al exterior, al interior a espacio cerrado, al interior bajo el efecto de abrigo ventilado, al interior bajo el efecto estufa y puede considerarse la soterrada, siempre y cuando sea un refugio o fortificaciones (Corvo, *et al*, 2007, 2008a, 2008b). En el caso del agua de mar, se deben considerar las condiciones de exposición de inmersión total, las de marea y salpicaduras, siendo las dos últimas las más agresivas, principalmente para los pilotes y vigas que sostienen las losas armadas en los puentes emplazados a mar abierto (Haque, *et al*, 2007).

Entre los ensayos a realizar en el hormigón se destaca la evaluación de la concentración de los iones cloruro a diferentes profundidades. Más, en hormigones sometidos a tiempos elevados de exposición frente a cualquier condición y medio agresivo en zonas costeras de elevado potencial constructivo. Como bien se conoce, los iones cloruro constituyen uno de los agentes agresivos más peligrosos que tienden a catalizar el fenómeno de la corrosión en el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado, siempre y cuando exista una concentración crítica, necesaria y suficiente de oxígeno en dependencia del contenido de agua en los poros capilares (Angst, *et al*, 2011). Los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior, es decir, desde el medio de exposición por los poros capilares del hormigón a través de varios mecanismos (Castro, 1998). Todo depende de la calidad del hormigón y de la condición de exposición al cual se encuentre expuesto el elemento constructivo ensayado, teniendo en cuenta el medio natural corrosivo o de exposición. El fenómeno de la corrosión del acero de refuerzo se cataliza debido a una mayor concentración de oxígeno y hasta un cierto nivel de agua en los poros del hormigón (Bertolini, *et al*, 2003; Hussain, 2011). Esto sucede, en hormigones de porcentajes de porosidad capilar efectivo muy elevado, es decir, muy permeables expuestos de forma directa a la atmósfera en zonas costeras, así como en las zonas de marea y salpicaduras. La fuente principal de los iones cloruro es precisamente el mar. En la atmósfera, estos iones en forma de disolución salina, son transportados hacia el interior de la tierra impactando en las estructuras a través del origen y formación del aerosol marino, ya sea en el interior del océano, en la zona del rompiente de las olas, teniendo el viento como un factor muy influyente (Meira, *et al*, 2007, 2008 y 2010).

Por otra parte, los iones cloruro pueden estar presente en los áridos finos usados en la elaboración del hormigón, como es el caso de la arena de mar, material de construcción muy utilizado en la construcción de las estructuras en La Habana en las primeras tres décadas del siglo XX. Otra tendencia en aquella época fue el uso del agua de mar como de amasado para la elaboración de las mezclas de hormigones; por lo que para nada resultaría asombroso encontrarse en dicha ciudad elementos estructurales en las obras expuestos a diferentes medios y condiciones de exposición, donde los hormigones fueron elaborados usando arena y/o agua de mar (Hernández, *et al*, 2023).

El ensayo de determinación de la concentración de iones cloruro totales, solubles y enlazados a diferentes profundidades en los elementos estructurales de hormigón armado sometidos a largos tiempos de exposición permitió como segundo objetivo; demostrar si el hormigón usado en la construcción de las tres estructuras tenidas en cuenta en este estudio, fue elaborado usando arena y/o agua de mar. Por otra parte, el tercer objetivo se basó en, comparar el mecanismo de penetración de iones cloruro y su influencia en la corrosión del acero de refuerzo entre los elementos estructurales de las tres estructuras seleccionadas y en probetas de hormigón armado, expuesto a diferentes condiciones y medios naturales de exposición en Cuba. El resultado permite establecer pronósticos certeros en cuanto a la adecuada selección de los sistemas primarios y secundarios de protección en el momento de ejecutar los trabajos de mantenimiento o reparación a las estructuras, con el fin de devolverle sus condiciones iniciales de vida útil de proyecto, como son estética, funcionalidad y seguridad (Helene, *et al*, 1997).

La concentración de iones cloruro totales (Cl_t^-) responden a la suma de la concentración de iones cloruro solubles (Cl_s^-) o libres más la concentración de iones cloruro enlazados (Cl_e^-) (1):

$$Cl_t^- = Cl_s^- + Cl_e^- \quad (1)$$

Al llegar a una concentración crítica a los aceros de refuerzo, en un tiempo determinado dependiendo de la condición de exposición en el medio corrosivo, así como de la concentración de oxígeno y del agua en los poros capilares, a un espesor de recubrimiento de hormigón, los cloruros solubles son los que precisamente se solubilizan en la disolución acuosa de reserva alcalina ($Ca(OH)_2$) presente en los poros del hormigón. Estos representan un riesgo elevado para el desarrollo del fenómeno de la corrosión en los aceros de refuerzo (Troconis, *et al*, 1997). Los iones cloruros enlazados, son los combinados con diferentes compuestos químicos de la pasta de cemento como los cloroaluminatotrícálcico (A_3C) y el cloroaluminatobicálcico (A_2C).

Las tres estructuras construidas con hormigón armado seleccionadas en este estudio, ejecutado en la Habana, Cuba, fueron: La Terminal de Cruceros de la Bahía de la Habana, el edificio Teatro Campoamor y un edificio residencial. Las dos primeras emplazadas en el centro histórico de la Habana Vieja y la otra en la lúcida avenida del malecón habanero. Los resultados obtenidos en cuanto al comportamiento de la concentración de iones cloruro totales, solubles y enlazados, fueron demostrados ya sea en los elementos estructurales entre las tres estructuras y en probetas de hormigón armado, siempre en función de las diferentes condiciones y medios de exposición.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Terminal de Cruceros de la Bahía de la Habana

Extracción de las probetas de hormigón

La Terminal de Cruceros es una edificación inaugurada en el año 1914. Siete probetas cilíndricas de hormigón simple, es decir, sin aceros de refuerzo, de 80 mm de diámetro y 300 mm de altura fueron extraídas de siete pilotes que sostienen las losas armadas. Las probetas se tomaron en la zona donde los pilotes estuvieron expuestos a la condición de exposición de inmersión total en el agua de mar como medio natural de exposición (Fig. 1 a) y c). Una máquina de extracción de testigos de marca WE de fabricación china, fue utilizada. Se demostró un espesor de recubrimiento de hormigón muy elevado, alrededor de los 100 mm, usado en los pilotes durante la construcción de la bahía (Fig. 2 a). Posteriormente, las probetas fueron cortadas con una sierra de tungsteno de marca CUSHION CUT, de fabricación estadounidense, quedando con una dimensión de 80 mm diámetro por 160 mm de altura (Fig. 1 b). Las siete probetas fueron sometidas a un proceso de secado al sol bajo condiciones de intemperie durante siete días.

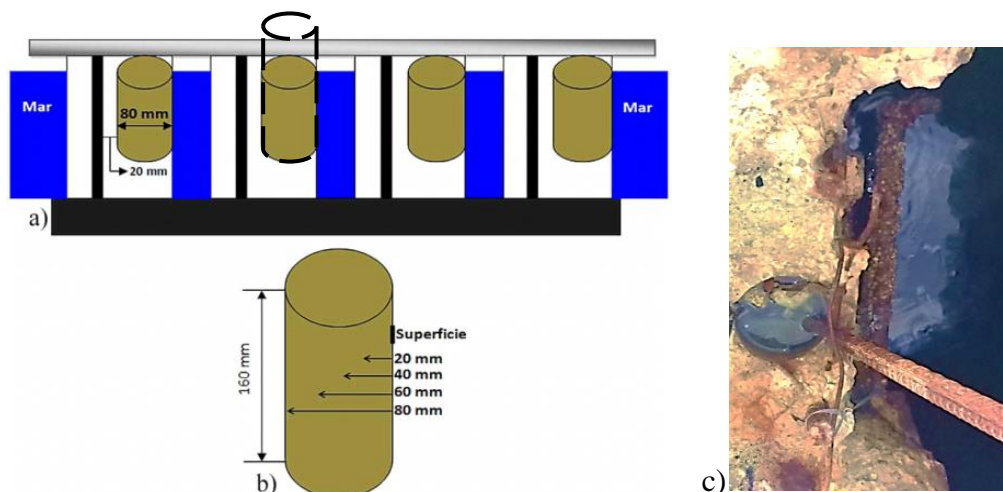


Fig. 1. Esquemas y figura que muestran cómo fue realizada la toma de las probetas cilíndricas en la terminal, a) y c), así como sus dimensiones, b).

Determinación de la concentración de iones cloruro totales, solubles y enlazados a diferentes profundidades

La determinación de la concentración de iones cloruro, se realizó a partir de la toma de muestras de polvo en las siete probetas cilíndricas desde la superficie lateral en intervalos de profundidades de 20, 40, 60 y 80 mm (Figura 2 b). Se extrajeron para cada caso 40 g de muestras de polvo de las cuales, dos muestras de 10 gramos (20 g) fueron usados para la determinación de los dos valores de concentración de iones cloruro totales (Cl_t^-), y las otras dos muestras de 10 gramos para la determinación de los dos valores de concentración de iones cloruro solubles (Cl_s^-). Esto permitió el cálculo de la concentración de iones cloruro enlazados (Cl_e^-) haciendo uso de la ecuación (1). Los dos valores de concentración de iones cloruro totales (Cl_t^-), solubles (Cl_s^-) y enlazados (Cl_e^-) en por ciento en masa de hormigón (% mh), fueron graficados en función de la profundidad, con el propósito de demostrar el comportamiento de la concentración de iones cloruro en las siete probetas extraídas.

La extracción de las muestras de polvo se realizó usando un taladro de banco de fabricación inglesa de marca ROCWELL DELTA, con una escala para la medición de la profundidad de extracción. Primeramente, la extracción de las muestras de polvo en la superficie, fue ejecutada con una espátula muy fina hasta una profundidad no superior a 5 mm. Para las diferentes profundidades se empleó una barrera de tungsteno con un diámetro de 12 mm. De esta forma, se cumplió con la condición necesaria y suficiente a la hora de extraer las muestras de polvo para estos estudios. Esta condición se basa en, que el diámetro de la barrena sea inferior al tamaño nominal del árido grueso para extraer una mayor cantidad de polvo de la pasta de hormigón endurecida (ASTM C-1218/M: 2008). De acuerdo con la información obtenida por la compañía que centró la ejecución de los trabajos diagnóstico, patología y de reparación, el hormigón usado en la construcción de los pilotes, presentó un tamaño nominal de árido grueso de 19 mm. La extracción fue ejecutada siempre en la parte central de cada probeta. Las muestras de polvo fueron almacenadas en bolsitas de nylon debidamente identificadas. Antes de ejecutar la penetración en cada muestra y profundidad, siempre fue realizada una limpieza de la barrena con un cepillo dental, con el fin de evitar la obtención de valores cruzados y obtener una mayor confiabilidad de los resultados obtenidos en cuanto a las determinaciones.

La determinación de la concentración de iones cloruro totales y solubles fue realizada 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).

Edificio teatro Campoamor

El Campoamor fue inaugurado un 20 de octubre de 1921. Se localiza en la concurrida esquina habanera de Industria y San José, a un costado del Capitolio Nacional y a espaldas del Gran Teatro "Alicia Alonso", siendo una zona de elevado tráfico vehicular. Esto ha conllevado a un ennegrecimiento significativo de sus elementos de fachada, así como desprendimiento de hormigón por corrosión en los aceros de refuerzos, formación de costras negras, plantas superiores y erosión.

Determinación de la concentración de iones cloruro totales, solubles y enlazados a diferentes profundidades

Se seleccionaron, en el interior de la estructura, cuatro columnas y una viga de contención de hormigón armado para la toma de muestras de polvo. Los elementos estructurales expuestos a la atmósfera sometidos a la condición de exposición interior bajo el efecto de abrigo ventilado se describen de la siguiente manera:

- Columna 1: Columna de la izquierda a la entrada del lobby.
- Columna 2: Columna del primer piso al costado izquierdo.
- Columna 3: Columna del segundo piso al costado izquierdo.
- Viga 1: Viga en el segundo piso en el interior del teatro.
- Columna 4: Columna del segundo piso al costado derecho.

Se determinaron dos valores de cada concentración (Cl_t^- , Cl_s^- , Cl_e^-) en los elementos. Los valores fueron graficados desde la superficie hasta 10, 20, 30 y 40 mm de profundidad, para un total de diez. De manera general, 50 valores para cada concentración. La extracción de las muestras de 20 g polvo, diez para cada determinación, fue ejecutada usando un taladro de eléctrico. La metodología analítica para el almacenamiento de las muestras de polvo, preparación de las soluciones en las determinaciones analíticas de las concentraciones de iones cloruro fue la misma que se usó para la Terminal de Cruceros (ASTM C-1218/M: 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento y comparación de la concentración de iones cloruro en las siete probetas extraídas en los pilotes de la Terminal de Cruceros

De acuerdo con los resultados de cada probeta (Fig. 2 a), b), c), d), e) f) y g); es de notar la presencia de un comportamiento difusivo aparente solamente en la probeta 5, a partir de 20 mm hasta 60 mm de profundidad para los Cl_t^- (rojo y negro) y Cl_s^- (verde y azul) (Fig. 2e). Este pilote se encuentra ubicado en particular próximo al muelle de atraque; por lo que está sometido durante breves periodos de tiempo a la exposición de marea durante la aproximación y paso del transporte marítimo (buques, cruceros, yates, lanchas y otros) durante la actividad naval de la bahía. Se demuestra, al menos de forma parcial que, para originarse el fenómeno de la difusividad aparente en el interior del hormigón a partir de una cierta profundidad, es necesaria la existencia de ciclos de humectación y secado influenciado por variaciones de la temperatura y la humedad que originan la cristalización de las sales a espesores bajos de recubrimiento de hormigón. Este fenómeno de cristalización de las sales en el pilote correspondiente a la probeta 5, ocurrió hasta una profundidad de 20 mm, debido posiblemente a la influencia de procesos cíclicos variables de temperatura y el agua en los poros capilares característico en las condiciones de marea (Figura 2 e). Esta influencia, es comúnmente más visible en los elementos (vigas y columnas) de las estructuras y en probetas de hormigón armado sometidos a la atmósfera bajo la condición de exposición al exterior, frente al impacto del ambiente agresivo en zonas costeras caracterizadas por una variación considerable de la temperatura y la humedad con deposiciones elevadas de sales de iones cloruro, en atmósferas clasificadas como elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX) (Corvo, et al 2008a; Meira, et al 2010). Ha ocurrido también, en pilotes que sostienen la loza armada de puentes expuestos al mar abierto como medio natural de exposición en zonas de intenso rompiente de las olas, donde se originan las condiciones de exposición de salpicaduras y de marea (Castro, 1998). Se demostró en todos los casos una corrosión muy acelerada e intensa en los aceros de refuerzo provocando la formación de fisuras y grietas en el hormigón, facilitando una mayor penetración de los agentes agresivos. El hormigón usado no fue elaborado con arena y/o agua de mar.

Las concentraciones de iones cloruro en el resto de las probetas, presentaron un comportamiento muy variable. Los resultados obtenidos en ningún momento demostraron un comportamiento difusivo aparente de los iones cloruro desde la superficie, o partir de 20 mm hasta 80 mm de profundidad de penetración en el hormigón armado (Fig. 2 a), b), c), d), e) y g). Sin embargo, el perfil difusivo aparente de penetración de iones cloruro desde la misma superficie, ha sido característico en pilotes y en probetas de hormigón armado sumergidos totalmente en agua de mar (Costa, et al, 2002; Trocónis, et al, 2004; Guimarães, et al, 2011).

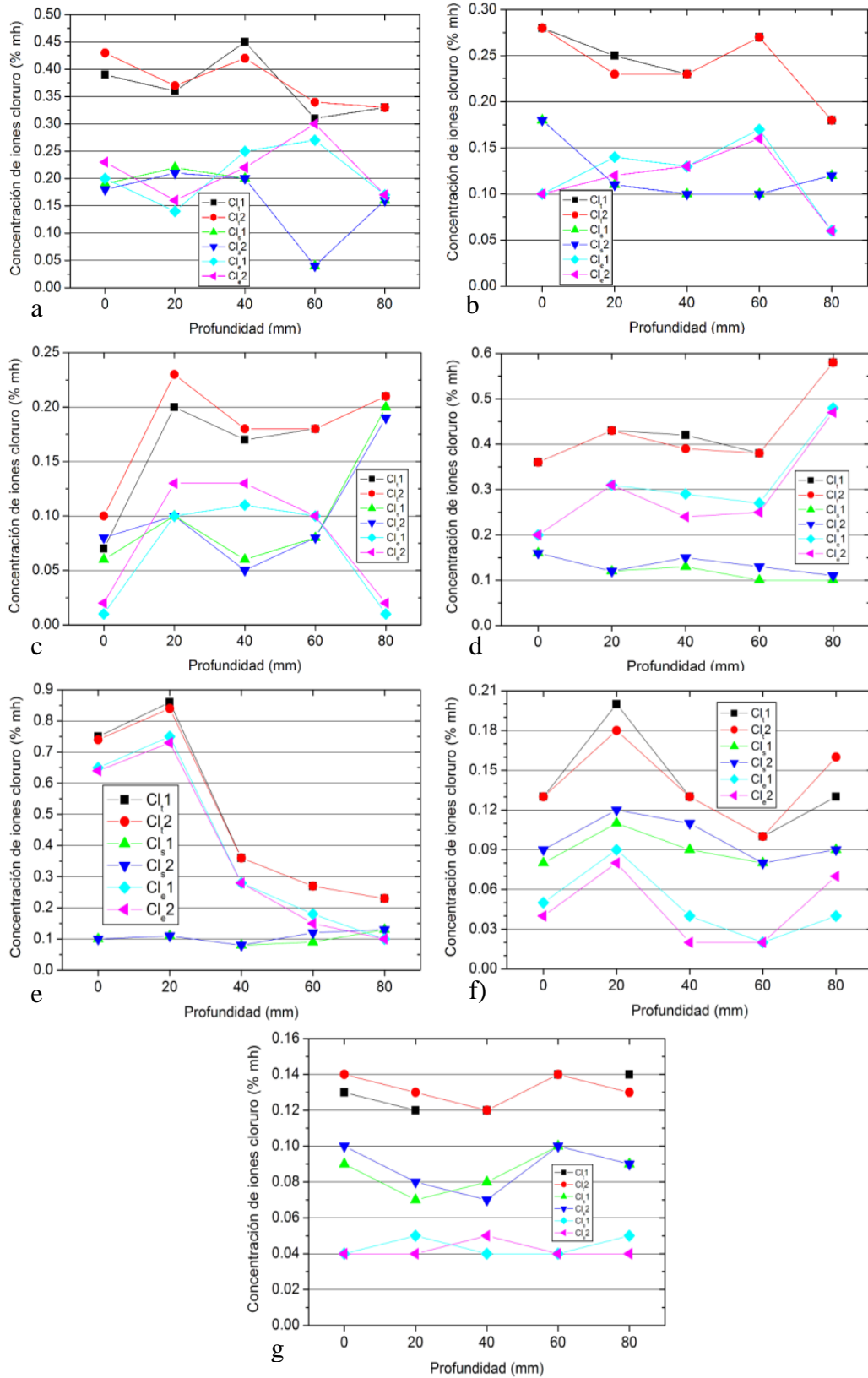


Fig. 2. Comportamiento de la concentración de iones cloruro a diferentes profundidades en las siete probetas de hormigón extraída de los pilotes

Este comportamiento se debió a la permanencia constante del agua en los poros capilares del hormigón armado sin condiciones de marea y salpicaduras. Se trata de un factor imprescindible para que se origine el fenómeno de la difusión de los iones cloruro en toda la masa del hormigón, pero sin ser elaborado con arena y/o agua de mar como de amasado.

Por otra parte, es de observar como en las probetas desde la 1 hasta la 5 (Fig. 2 a), b), c), d) y e), la Cl_g^- resultó mayor que la Cl_s^- desde la superficie hasta las diferentes profundidades. Esto pudiera deberse a varios factores. Primero a la solubilidad baja de los gases en el agua de mar, en este caso del dióxido de carbono (CO_2). Esto limita en gran medida la penetración de este gas hacia el interior del hormigón mediante mecanismos de transporte a través de la red de poros capilares. De esta manera, se ve reducida la transformación química del Cl_g^- a Cl_s^- como resultado de la baja concentración del CO_2 en la masa de hormigón, siendo incapaz originar la ruptura de los enlaces iónicos de los cloroaluminatos (A_3C y A_2C) presentes. Esto disminuye significativamente el riesgo de corrosión en los aceros de refuerzos embebidos en los pilotes de hormigón armado. En la probeta 5 (Fig. 2 e), se aprecia como la Cl_g^- (colores Cyan y Magenta) presentó un comportamiento similar a la Cl_s^- . Este comportamiento ha resultado inusual a la hora de estudiar la concentración de iones cloruro en el hormigón armado sometido principalmente a la condición de inmersión total en agua de mar, o en soluciones salinas bajo condiciones de laboratorio. El hecho de que la Cl_g^- sea mayor que Cl_s^- , pudiera deberse también como segundo factor, al largo tiempo exposición al que han estado expuestos los pilotes en el agua de mar. Esto contribuye a la formación de los cloroaluminatos (A_3C y A_2C). Como un tercer factor, es posible que el hormigón usado en la construcción de los pilotes haya sido elaborado usando arena de mar sin ser sometida a un proceso de lavado, y quizás con agua de mar también. Este último factor pudiera justificar la no aparición de un comportamiento difusivo aparente en los otros seis pilotes que no estuvieron expuestos a la condición de exposición de marea (Fig. 2 a), b), c), d) y f).

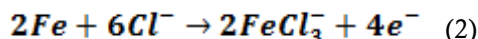
Los pilotes existentes en la terminal, no mostraron signos de fisuración y agrietamiento alguno, como un indicador muy confiable en la corrosión insignificante en los aceros de refuerzo debido a dos cuestiones fundamentales. Primero, a la baja solubilidad de los gases (O_2 , CO_2) en el agua de mar como medio natural de exposición. Esto hace, que no llegue una concentración crítica de oxígeno a la superficie de los aceros de refuerzo capaz de desarrollar el fenómeno de la corrosión electroquímica, a pesar de que la concentración de iones cloruro sobre todo los solubles haya resultado muy elevada (Hussain, 2010). De igual forma, como fue explicado previamente, la baja concentración de CO_2 limita también la liberación de iones cloruro, es decir, la ruptura del enlace iónico en los cloroaluminatos hidratados presentes en la solución de los poros capilares, limitando alcanzar un umbral crítico de iniciación de la corrosión. De ahí, a que los elementos de hormigón armado sometidos a la condición de exposición inmersión total en agua de mar sean durables y continúen garantizando plazos elevados de vida útil a la estructura. Se confirma que, concentraciones elevadas de iones cloruro pudiera ser una condición necesaria pero no suficiente en el origen de la corrosión en el acero de refuerzo, siempre y cuando el hormigón armado esté expuesto a la condición de exposición de inmersión total en el medio natural de exposición del agua de mar, no siendo así en el medio natural de exposición a la atmósfera y en las condiciones de marea y salpicadura en el mar como medio natural de exposición donde existe una variación mayor de la temperatura, humedad relativa ambiental y el contenido de agua en los poros capilares respectivamente. Para este caso, una mayor penetración y concentración de oxígeno es garantizada.

La observación visual de algunos de aceros de refuerzo extraídos de los siete pilotes, permite confirmar la casi no ocurrencia del fenómeno de la corrosión. Es de notar, que estos aceros de refuerzo presentaron diferentes conformaciones (Fig. 3).

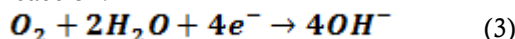


Fig. 3. Observación visual de los aceros de refuerzos.

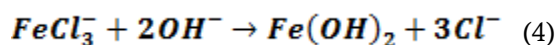
Las costras observadas de color carmelita y de espesores muy bajos, obedecen a la formación de sales de cloruro de hierro, sobre todo la sal $FeCl_3$ debido la reacción anódica del mecanismo de corrosión electroquímica en los aceros de refuerzo:



Esta sal, que es originada por la ruptura de la capa pasiva en el proceso electroquímico del fenómeno de la corrosión, producto a la influencia de los iones cloruro, es la que tiende a reaccionar con el ion oxidrilo (OH^-), originado de la reacción de reducción catódica del oxígeno en los aceros de refuerzo en medios acuosos neutros como el agua de mar y alcalinos, como la disolución de reserva alcalina existentes en los poros capilares en el hormigón a partir de la conocida reacción:



Al no existir una reducción catódica considerable del oxígeno debido a su solubilidad muy baja en el agua de mar, no se garantiza una concentración crítica del ion oxidrilo (OH^-), capaz de reaccionar con la sal de $FeCl_3$, para de esta manera originarse los óxidos expansivos de los productos de corrosión en la interfaz acero de refuerzo/pasta de cemento endurecida. En este caso los óxidos, oxihidróxidos y los oxihidroxiclورو de hierro correspondientes que originan la fisuración y agrietamiento del recubrimiento de hormigón (Troconis et al, 1997):



De acuerdo con otros datos aportados por la compañía que ejecutó los trabajos de reparación, el hormigón usado en la construcción de los pilotes de la Terminal de Cruceros presentó una resistencia a la compresión promedio alrededor de 20 MPa, y un porcentaje de porosidad capilar efectivo entre 15-20%. Se trató de un hormigón de moderada resistencia mecánica y porosidad muy elevada para los requisitos actuales de durabilidad. Sin embargo, para el año de construcción de la obra (1921), los requisitos de resistencia a la compresión exigidos oscilaban entre 10-14 MPa (ACI 562M-16). Se demuestra, que los criterios técnicos empleados para la construcción de la obra fueron superiores a los que se consideraban durables en ese entonces, esencialmente en los pilotes que sostienen actualmente las losas armadas, sometidos a la condición de exposición de inmersión total en el agua de mar como medio natural de exposición. Como bien se conoce, las aguas de las bahías se caracterizan por ser tranquilas, es decir, sin la presencia de las olas intensas. Las olas al impactar en los pilotes, incluso hasta en la loza armada de los puentes emplazados hacia el interior del mar abierto, originan las condiciones típicas de exposición de marea y salpicadura. Estos tipos de hormigones expuestos a dichas condiciones, no deben garantizar una vida útil de proyecto elevada a los puentes.

Comportamiento y comparación de la concentración de iones cloruro en los elementos estructurales del teatro Campoamor

Es de notar, como en las columnas 1 y 4 (Fig 4 a) y e)) a 30 mm y 20 mm de profundidad respectivamente, así como en la columna 2 (Fig. 4 b), la Cl_g^- fue mayor que la Cl_s^- . Tampoco, un comportamiento difusivo

aparente fue demostrado de manera general como sucedió en los pilotes de la Terminal de Cruceros. Se demuestra, la posible incorporación de los iones cloruro a la masa de hormigón haciendo uso de la arena de mar y/o del agua de mar como de amasado durante la elaboración del hormigón. Sin embargo, en el resto de los elementos ocurrió todo lo contrario ($Cl_g^- < Cl_s^-$ Fig. 4 c), d) y e). Los elementos estructurales ensayados en

la estructura, expuestos a la condición de exposición al interior bajo el efecto de abrigo ventilado, se encuentran muy afectados por el fenómeno de la eflorescencia en el hormigón.

Este fenómeno origina la formación de sales, principalmente la de carbonato de calcio ($CaCO_3$) de coloración blanca en las superficies en contacto con la condición de exposición al interior (Fig. 5 a) y b) (Broken y Nijland, 2004). La aparición de eflorescencias responde también a la presencia de una concentración mayor de CO_2 y SO_x en la masa de hormigón, producto de las emisiones de fuentes móviles, así como en el medio circundante que provocan la transformación de los álcalis del cemento a carbonatos y rompiendo los enlaces iónicos de cloroaluminatos los cuales precipitan en la superficie del elemento estructural en forma de sales blanquecinas

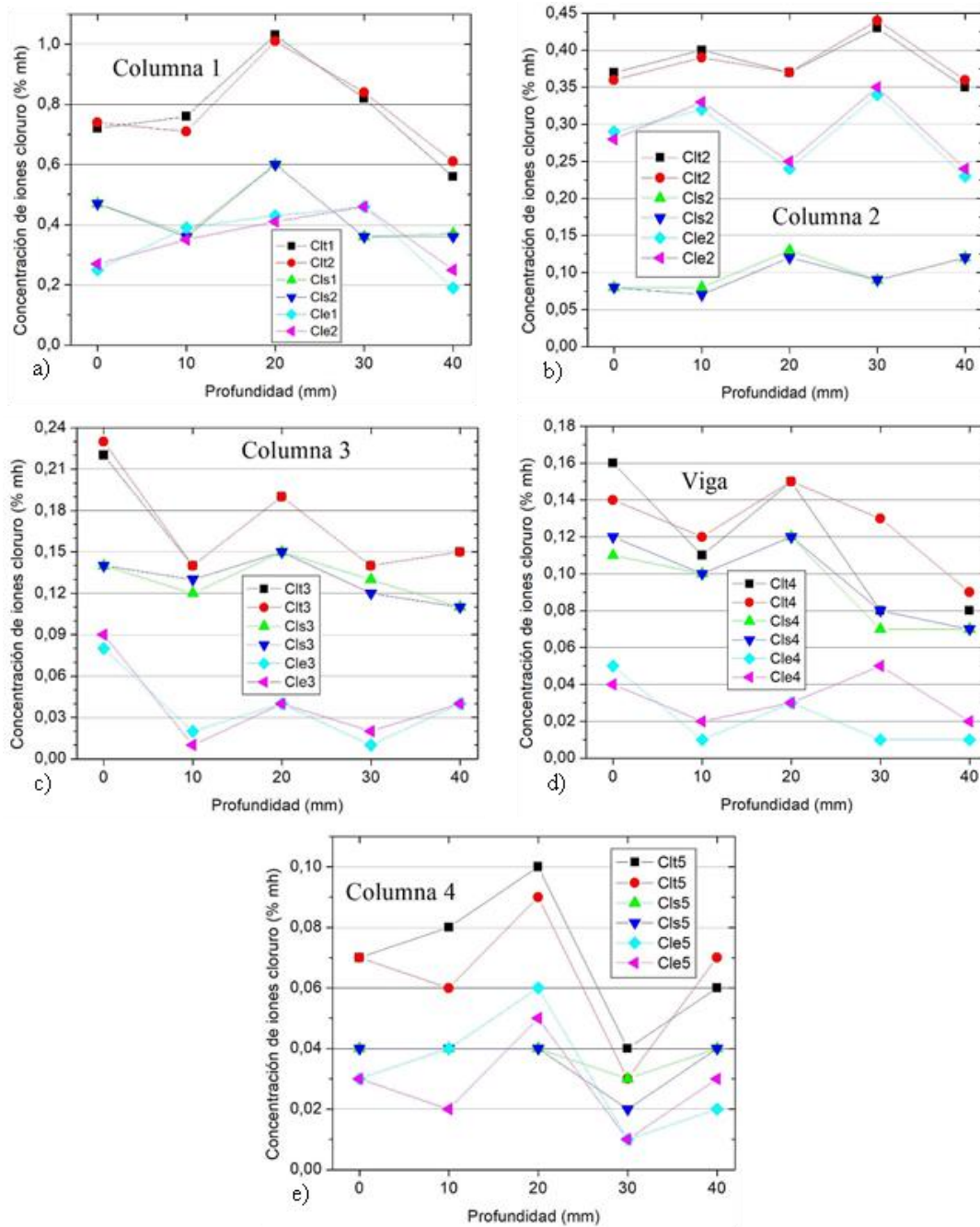


Fig. 4. Comportamiento del valor medio de las concentraciones desde la superficie (0) hasta las diferentes profundidades de penetración. Elementos a) columna 1, b) columna 2, c) columna 3, d) viga y d) columna 4

Esto conlleva a que generalmente la Cl_s^- resulte menor que la Cl_s^- . Caso contrario a los pilotes de la Terminal de Cruceros. No obstante, la Cl_s^- puede considerarse como de muy elevada en los cinco elementos estructurales ensayados (Fig. 4 a), b), c), d) y e); por lo que se confirma el uso de la arena y/o agua de mar en la elaboración del hormigón usado en la construcción de la estructura.

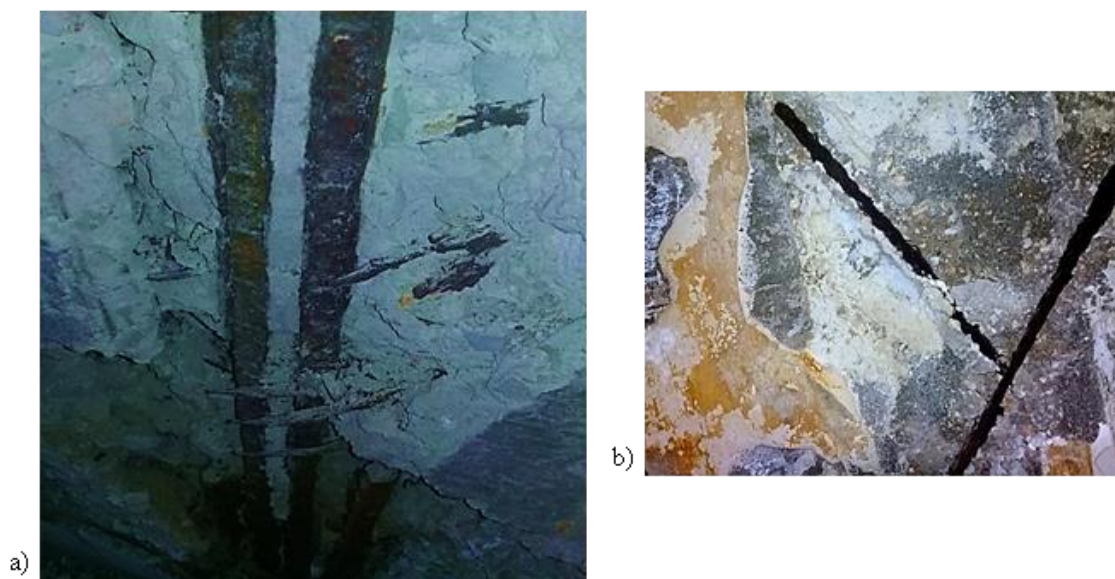


Fig. 5. Corrosión electroquímica generalizada en los aceros de refuerzo (a). Es de notar además la coloración blanca que confirma la presencia de la sal CaCO_3 (b)

La formación de la sal (CaCO_3) en las superficies exteriores de los elementos estructurales se debe a las etapas que obedece el desarrollo del fenómeno de la eflorescencia (Gonçalves, *et al*, 2009; Ismail, *et al*, 2010). Primero, ocurre la infiltración del agua generalmente de lluvia, por los poros capilares del hormigón. Posteriormente ocurre la percolación, es decir, el agua se infiltra a una velocidad de fluido muy baja. Esto hace que la propia agua y más si es semidestilada como la de lluvia, lixivie como tercera etapa la reserva alcalina del hormigón (Ca(OH)_2) hacia la superficie exterior en contacto con la condición de exposición. De ahí, la formación de la sal (CaCO_3) al reaccionar la reserva alcalina del hormigón con el CO_2 , y más si los elementos estructurales de la estructura están sometidos a la condición interior de exposición bajo el efecto de abrigo ventilado, donde generalmente se garantizan elevadas concentraciones de CO_2 . Este compuesto químico gaseoso posee una capacidad elevada de penetración desde la condición de exposición exterior hacia la interior, más en atmósferas urbanas e industriales, como la existente donde se encuentra emplazada la estructura, por lo que tampoco debe descartarse la ocurrencia del fenómeno de la carbonatación en los elementos estructurales de hormigón armado. Esto origina de conjunto con la ocurrencia del fenómeno de la eflorescencia, que la corrosión electroquímica en los aceros de refuerzo presente una morfología generalizada como bien se muestra en las zonas de bajo espesores de recubrimiento del hormigón (Fig. 5 a) y b). Por otra parte, el agua lixivía además los cloruros enlazados combinados con las diferentes fases o compuestos químicos de la pasta de cemento, donde los principales son los cloroaluminato tricálcico (A_3C) y el cloroaluminato bicálcico (A_2C). De ahí a que la Cl_g^- pudiera resultar menor que la Cl_s^- . La ocurrencia del fenómeno de la corrosión electroquímica de manera generalizada en los aceros de refuerzo (Fig.5 a) y b)) es un factor clave para la rehabilitación futura de la estructura. En caso de que en los aceros de refuerzo la corrosión electroquímica hubiese ocurrido de manera localizada; entonces sí es casi imposible proceder con los trabajos de rehabilitación. Este mecanismo de corrosión localizada con zonas anódicas y catódicas bien definidas, pero de extensión apreciable, tiende a ocurrir en las estructuras de hormigón armado emplazadas en zonas costeras de elevado potencial constructivo caracterizadas por una elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX) agresividad corrosiva de la atmósfera (Castañeda y Corvo, 2008). En caso de que el hormigón no haya sido elaborado con arena y/o agua de mar y el mismo presente un porcentaje de porosidad capilar efectivo bastante elevado, como casi siempre sucede, el mecanismo localizado de la corrosión electroquímica atmosférica se verá también muy intensificado.

Comportamiento y comparación de la concentración de iones cloruro en probetas de hormigón armado y un edificio residencial

Todo lo contrario, resultó en hormigones expuestos a la atmósfera bajo la condición de exposición al exterior ante categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera, donde existe una mayor penetración del oxígeno y agua en estado de condensación sobre todo en hormigones muy porosos (Corvo, *et al* 2008; Meira, *et al* 2010). De esta manera, llega a los aceros de refuerzo una concentración mayor de oxígeno, donde la corrosión atmosférica según el mecanismo planteado en las reacciones (2), (3) y (4) se inicia a partir de la ruptura de la capa pasiva originada por los iones cloruro, principalmente los solubles.

Probetas de hormigón armado (200 x 200 x 200 mm) para tres relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 con espesores de recubrimiento de 20 y 40 mm, fueron expuestas durante tres años a la atmósfera sometidas a la condición de exposición al exterior, en un sitio a 20 m de distancia desde la línea costera o zona del rompiente de las olas en el litoral norte de La Habana. Las características de las tres proporciones de las mezclas de hormigón usadas en la elaboración de las probetas son mostradas (Tabla 1). Las probetas fueron elaboradas a partir del método de dosificación del porcentaje mínimo de vacío. Los ajustes correspondientes para cada dosificación de materiales fueron realizados para 1 m³ de volumen neto de hormigón. Cuando las tres mezclas de hormigón fueron diseñadas, el agregado fino (arena de río, finura 3 mm) y el árido grueso calizo (tamaño nominal 19 mm) fueron pesados hasta peso constante. Por tanto, cada dosificación fue diferente al variar la relación agua/cemento (a/c). El tiempo de curado en las probetas fue de 28 días a inmersión total en agua a una temperatura de 25 °C.

Durante el primer año de estudio, la deposición promedio anual de sales de iones cloruro fue de 770 mg/m²d determinada por el captador del paño seco y de 1848 mg/m²d estimada por el captador de la vela húmeda. En los meses más invernales de Cuba (noviembre-marzo), la deposición mensual, determinada en el sitio por el captador del paño seco, resultó mayor que 1000 mg/m²d. Para estas condiciones se garantiza una agresividad corrosiva mayor que extrema (>CX). Se trata de una de las zonas más agresivas a nivel mundial (Castañeda, *et al* 2023 y 2024).

Tabla. 1. Proporciones de mezclas de los hormigones usados en el estudio

a/c	Cemento OPC (kg/m ³)	Agua potable (m ³)	Aditivo superplastificante (m ³)	Asentamiento (cm)
0,4		148	1,7	15
0,5	365	186	1,5	17
0,6		222	1,0	18

Es de notar, como la penetración de los iones cloruro totales (Cl_t^-) (Fig. 6 a) y solubles (Cl_s^-) (Fig. 6 b), sí presentaron un comportamiento aparentemente difusivo.

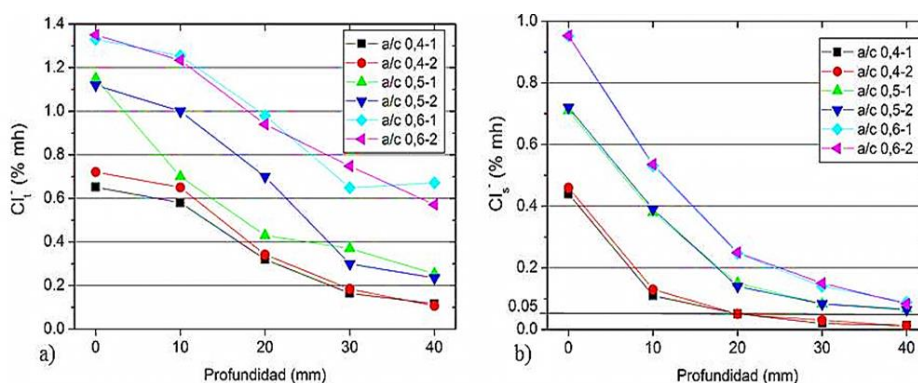


Fig.6. Comportamiento de la penetración de iones cloruro en el sitio costero de La Habana

El comportamiento aparentemente difusivo permite demostrar y confirmar, que los hormigones de las probetas nos fueron elaborados usando arena y agua de mar para su amasado, es decir, los iones cloruro provienen desde el exterior. La fuente de procedencia de los iones cloruro es el mar, transportados en el aerosol marino. La Cl_s^- fue menor que la Cl_s^- como sucedió en la mayoría de los elementos estructurales del Teatro Campoamor. Caso contrario al hormigón usado en los pilotes de la Terminal de Cruceros, donde los iones cloruro además de proceder del mar, pudieran estar presentes en el interior del hormigón principalmente en el árido fino usado (arena de mar). Por otra parte, los valores promedios anuales de temperatura humedad relativa resultaron muy elevados ($> 80\%$ y $T = 25\text{ }^\circ\text{C}$) debido al fuerte impacto permanente del aerosol marino en el sitio de exposición durante los tres años de estudio. Esto conlleva, a la posible presencia de agua casi permanente en los poros del hormigón, principalmente desde la superficie hasta 10 mm de espesor de recubrimiento, como condición necesaria para que se origine el comportamiento difusivo aparente como mecanismo de penetración de los iones cloruro (Fig. 6 a) y b). Como bien se conoce, el hormigón gana el agua más rápido de lo que la pierde y más expuestos a climas tropicales costeros de elevada agresividad corrosiva de la atmósfera (Howland, 2017). Solo en el primer año de exposición de las probetas en el sitio costero, penetraron en la Habana desde la dirección norte 17 frentes fríos durante la estación de invernal. En la estación de verano (mayo-septiembre) a pesar de la no ocurrencia de la entrada de los frentes, la deposición mensual de sales de iones cloruro estuvo entre 250-500 $\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$ (Castañeda, *et al* 2018). De ahí, el impacto permanente del aerosol marino depositándose los iones cloruro sobre las probetas de hormigón armado en forma de disolución salina durante los tres años de estudio, lo cual influye en el comportamiento difusivo aparente de la concentración de iones cloruro para las tres relaciones agua/cemento. De acuerdo con la observación visual de las probetas, es de notar a simple vista la formación de grietas longitudinales paralelas a los aceros de refuerzo debido a la fuerza de expansión que ejercen los productos de corrosión (óxidos metálicos) de forma perpendicular a la superficie, siendo más significativo para un espesor de recubrimiento de 20 mm (Fig. 7 a) y b).

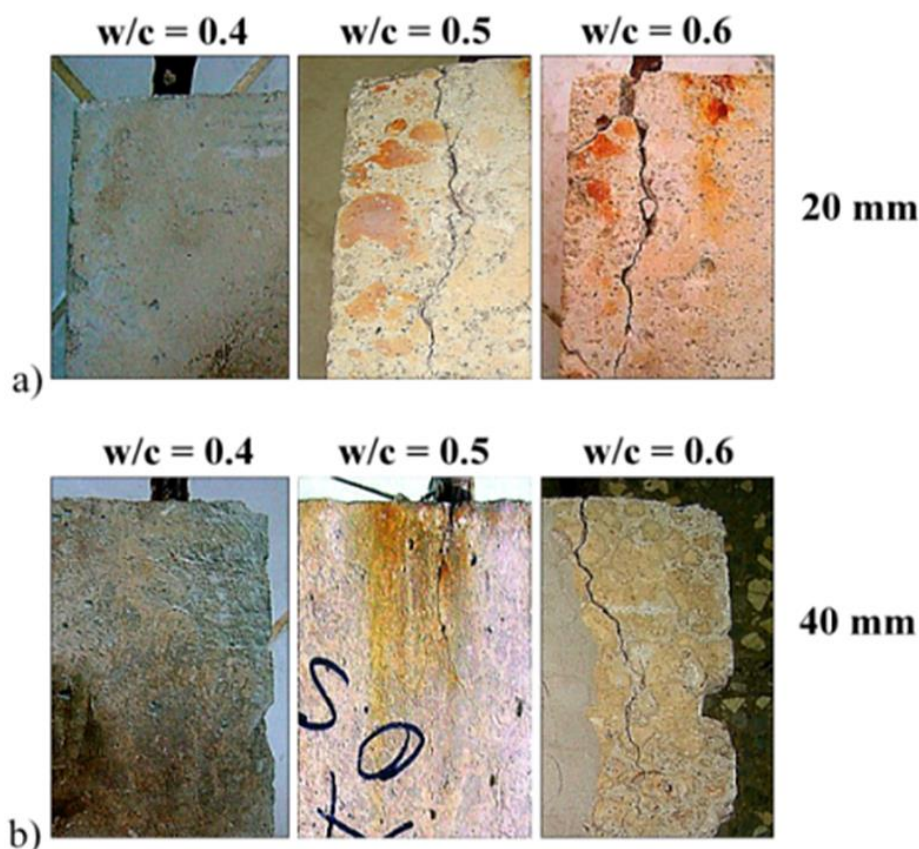


Fig. 7. Observación visual de las probetas para ambos espesores de recubrimiento de hormigón, 20 mm a) y 40 mm b)

Se trata de las condiciones de diseño más usadas en la elaboración del hormigón en Cuba con una resistencia a la compresión promedio de 36, 30 y 25 MPa y porcentaje de porosidad capilar de 8, 14 y 20 % para las relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 respectivamente. Se confirma, que la fuerza de expansión (MPa) de los productos de corrosión formados en la zona de contacto entre los aceros de refuerzo y la pasta endurecida de

hormigón, una vez desarrollado el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo, es muy superior a la resistencia a la compresión de las probetas (Zhao, *et al*, 2011 y 2012; Castañeda, *et al*, 2024), condición necesaria y suficiente para la formación de fisuras y grietas debido a la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo. Esto origina una mayor penetración de los agentes agresivos principalmente las sales de iones cloruro en forma de disolución salina acelerando de manera considerable el fenómeno de la corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo.

Por otra parte, un comportamiento difusivo aparente de la penetración de iones cloruro totales (% en masa de hormigón) desde la superficie hasta una profundidad de 40 mm de espesor de recubrimiento de hormigón, fue demostrado también en los tímpanos en forma de pantalones que sostienen un edificio residencial de hormigón armado terminado de construir a finales del año 1973 (Carvajal, *et al* 2011). La estructura emplazada en el litoral norte del malecón de La Habana, Cuba, a 20 m desde la línea costera, se encuentra expuesta directamente a la atmósfera sometida a una agresividad corrosiva extrema (CX) producto al impacto permanente del aerosol marino. Las mayores concentraciones fueron obtenidas en la zona menos impactada por la lluvia (Fig. 8).

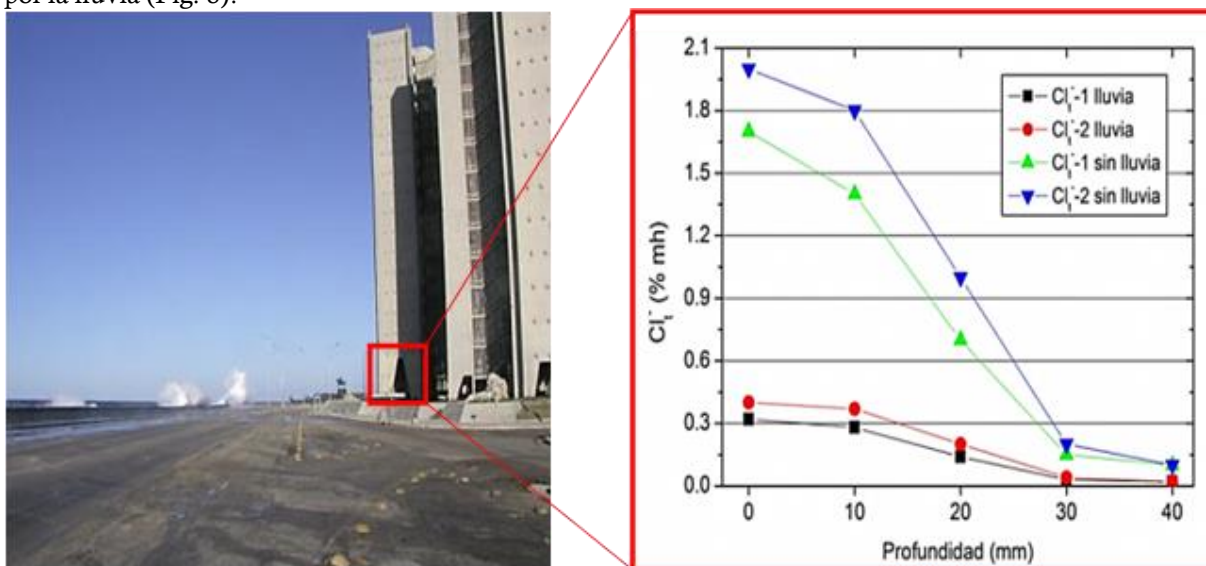


Fig. 8. Comportamiento de la penetración de iones cloruro en uno de los pilotes del edificio ubicado en el litoral norte costero de la Habana, Cuba

Los ensayos de determinación de las concentraciones de iones cloruro fueron ejecutados a los 30 años de construida la obra. Las muestras de polvo fueron extraídas usando también un taladro eléctrico (20g para dos muestras en 10g de cloruro totales), cumpliéndose la condición de que el diámetro de la barrena (12 mm) fue inferior al tamaño nominal del árido grueso (19 mm). Se trató de un hormigón muy denso y compacto ($a/c = 0,4$), con una resistencia a la compresión promedio alrededor de 50 MPa y un contenido de cemento de 450 kg/m^3 .

De acuerdo con la misma metodología ya descrita para la extracción de las muestras de polvo, es de notar como en hormigones elaborados con otro método de dosificación en probetas de diferentes dimensiones (315 x 80 x 80 mm, espesor de recubrimiento de hormigón = 20 mm) y sometidos a ensayos acelerados bajo condiciones reales de exposición a la atmósfera, a partir de la aplicación de un spray salino de (NaCl) al 3% diariamente en horas de la mañana por un tiempo de exposición de tres años, el comportamiento de la penetración de iones cloruro resultó diferente a los referidos anteriormente, así como también al de los pilotes sumergidos totalmente en agua de mar en la terminal y los elementos estructurales en el teatro Campoamor expuesto a la condición de exposición interior a la atmósfera bajo el efecto de abrigo ventilado (Figura 9 a). Se observa, además, la clara existencia del proceso de humectación y secado (cristalización de la sal). La aplicación del spray salino de NaCl al 3% en el tiempo referido bajo condiciones reales de exposición (tres años), representó una deposición promedio anual de iones cloruro igual a $850\text{mg}/\text{m}^2\text{d}$ determinada por el captador del paño seco. De esta forma, se está en presencia de una agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera extrema (CX) y quizás superior, típica de zonas costeras a corta distancia de la zona del rompiente de las olas (Corvo, *et al* 2005). Se observa, como la difusividad comenzó y el ciclo de humectación y secado finalizó a partir de 10 mm de espesor de recubrimiento para los Cl_t^- y Cl_s^-

en las probetas de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6. No fue así, en la probeta de relación agua/cemento 0,4 donde la difusividad se inició y el ciclo culminó a partir de 5 mm (Figura 9 a). Es evidente que el ciclo finaliza a

una mayor profundidad en los hormigones de relación agua/cemento 0,5 y 0,6 caracterizados por un porcentaje de porosidad capilar efectivo más elevado (> 10 %).

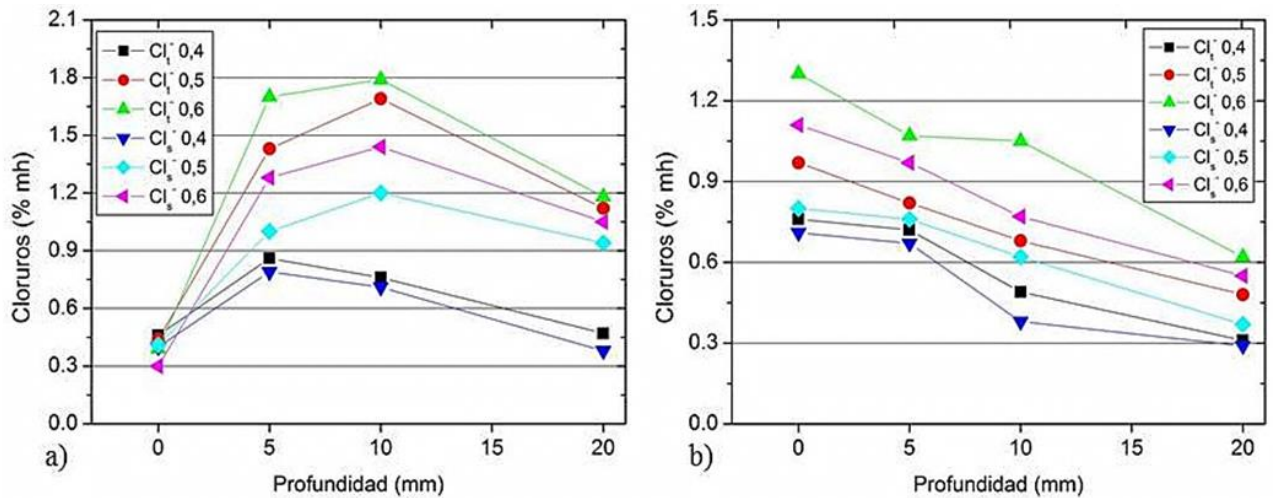


Fig. 9. Comportamiento de la penetración de iones cloruro, a) condiciones reales de exposición a la atmósfera, b) inmersión total en la disolución salina al 3%.

Para la condición de inmersión total en la misma disolución salina simulando agua de mar como medio natural de exposición, es de apreciar un comportamiento difusivo aparente en las probetas para las tres relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6 (Fig. 9 b), como sucedió en las probetas anteriores y en los tímpanos del edificio residencial, pero no en los pilotes de la terminal de cruceros y en los elementos constructivos del teatro Campoamor (Castañeda, *et al* 2005). Se confirma que, al no ser un hormigón elaborado con arena y agua de mar, es de esperar un comportamiento difusivo en cuanto a la penetración de iones cloruro, ya sea desde la superficie o partir de una cierta profundidad precedido del ciclo de humectación y secado.

La observación visual, confirma la influencia de la agresividad corrosiva de la atmósfera extrema simulada en las probetas de hormigón armado expuestas en la estación de ensayo (Fig. 9 a) y b). Es de notar también, la presencia del agrietamiento en las probetas de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6 sometidas al spray salino, así como una pequeña fisura longitudinal en la probeta de relación agua/cemento 0,6 sometida a la condición de exposición de inmersión total en la disolución salina simulando agua de mar (Fig. 10 a) y b).

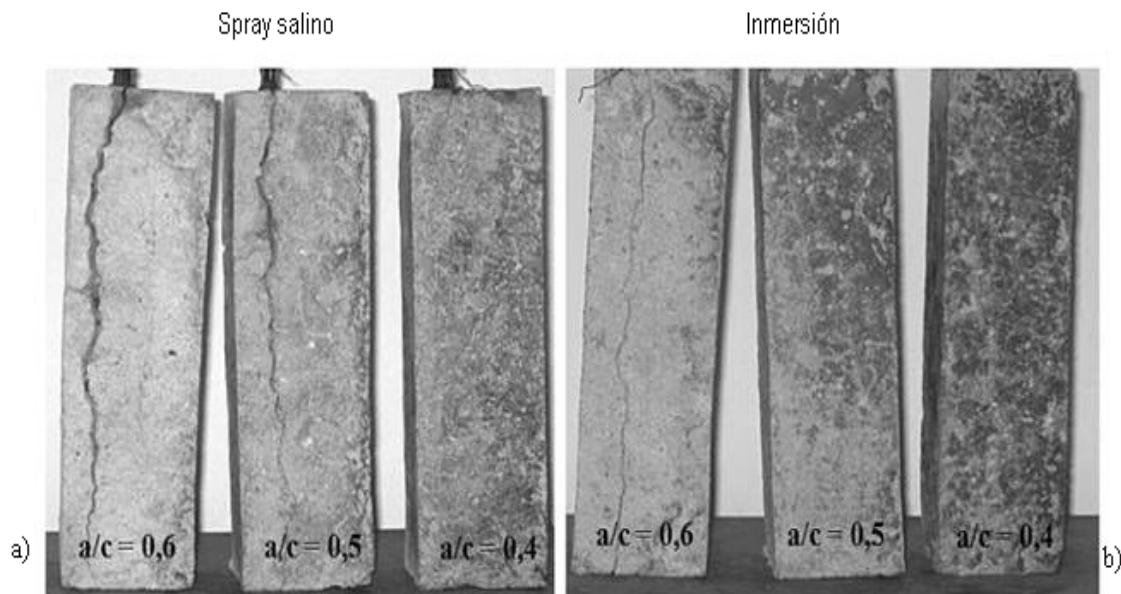


Fig. 10. Observación visual de las probetas colocadas en la estación de ensayo y a inmersión en la disolución salina de NaCl al 3%.

La diferencia en cuanto al comportamiento de la concentración de iones cloruro hacia el interior del hormigón, comparada con la condición de exposición al exterior en el sitio costero referido anteriormente y el edificio residencial, pudiera deberse a la forma de aplicación del spray salino. Al aplicarse el mismo en horas de la mañana diariamente, también a valores elevados temperatura y humedad relativa en la estación de ensayo donde fueron colocadas las probetas (~80% y $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$), era de notar una absorción por los poros capilares muy rápida de la disolución salina en las superficies principalmente en las probetas de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6, además de un secado acelerado debido a la intensidad fuerte de la radiación solar. Esta aplicación al realizarse solo en horas de la mañana, tiene un carácter menos permanente en comparación con el impacto del aerosol marino en el litoral norte de La Habana a cortas distancias desde la línea costera o zona del rompiente de las olas.

CONCLUSIONES

Los resultados descritos, además de demostrar la importancia en cuanto a la ejecución del ensayo de determinación de la concentración de iones cloruro en elementos estructurales de las tres estructuras seleccionadas, que pudieran definir los esquemas de trabajos de mantenimiento o reparación, así como la morfología de la corrosión en los aceros de refuerzo, y en probetas de hormigón armado, expuestos a diferentes condiciones y medios naturales de exposición en La Habana, Cuba, permitieron arribar a las siguientes conclusiones. A partir de una comparación entre la concentración de iones cloruro solubles (Cl_s^-) y enlazados (Cl_e^-), fue posible demostrar, que si la $\text{Cl}_s^- < \text{Cl}_e^-$, en una gran parte de la masa de hormigón, el hormigón armado usado en los elementos estructurales, pudo ser elaborado usando arena y/o agua de mar como de amasado. La condición anterior, pudiera resultar en necesaria y suficiente, para que no ocurriera un comportamiento difusivo aparente desde la superficie o a partir de ciertas profundidades o espesores de recubrimiento de hormigón, teniendo en cuenta la condición y el medio natural de exposición. Los fenómenos de la eflorescencia y la carbonatación pudieran contrariar la condición entre ambas concentraciones de iones cloruro en el hormigón armado ($\text{Cl}_s^- > \text{Cl}_e^-$) a ciertos espesores de recubrimiento y en la superficie influyendo también en la ocurrencia de un comportamiento no difusivo aparente en toda la masa de hormigón sometido a la condición de exposición al interior bajo el efecto de abrigo ventilado donde se garantizan infiltraciones de agua, principalmente de lluvia, así como elevadas concentraciones de CO_2 . Se confirmó, que un hormigón armado de moderada calidad, elaborado con arena y/o agua de mar, puede ser usado en la construcción de pilotes que sostienen la loza armada en una bahía, siempre y cuando estén expuestos a la condición de exposición de inmersión total en el agua de mar, y sin zonas de marea y salpicaduras significativas. Se demostró, que concentraciones elevadas de iones cloruro, resultaron en una condición necesaria pero no suficiente en el origen y desarrollo del fenómeno de la corrosión en los aceros de refuerzo. Este resultado, fue confirmado con la observación visual de los aceros de refuerzo embebidos en los pilotes de la Terminal de Cruceros, y permitió prácticamente la no ejecución de los trabajos costosos de reparación, siendo un resultado muy factible económicamente. En caso contrario, es decir, que el hormigón no fuera elaborado con arena y/o agua de mar donde resultó que la $\text{Cl}_s^- > \text{Cl}_e^-$, un comportamiento difusivo aparente fue demostrado, causando un deterioro muy anticipado en el tiempo en el hormigón armado, debido a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, principalmente bajo condiciones de exposición al exterior, ante categorías muy elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera simuladas o no, confirmado con la observación visual de las probetas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 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.
- Hernández, A.; Impact of environmental pollution in the historical buildings of Havana, Cuba. Effect of future climate change. REVISTA INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN. Vol.33, No.3, pp. 2019-2028. Chile, 2018.
- Guerra, Mera, J. C., Puig, Martínez, R., Castañeda, Valdés, A., Baque, Campozano, B. P.; Estado del arte sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado en perfiles costeros. REVISTA CIENTÍFICA INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Innovación. Vol.6, No. 11. Edición Enero-Junio, 2023.
- Viña, Rodríguez, J; Castañeda, Valdés, Abel., Valdés, Clemente, Cecilia., Corvo, Pérez, Francisco., Corrosión atmosférica. conceptos básicos y experiencias obtenidas en el clima tropical costero de Cuba. REVISTA CENIC, CIENCIAS QUÍMICAS, Vol. 52 (2), pp. 138-165. Año 2021.

- Corvo, F., Torrens, A. D., Betancourt, N., Pérez, J., González, E., Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosion. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 49, pp. 418–435, 2007.
- 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, ELSEVIER*, Vol 50, No.1, pp. 220 – 230, 2008a.
- 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 METALURGIA, CSIC, VOL. 44-2*, pp. 1 - 9. MADRID. ESPAÑA. 2008b.
- Haque, M. N., Al-Khaiat, H., John, B., Climatic zones. A prelude to designing durable concrete structures in the Arabian Gulf. *REVISTA BUILDING AND ENVIRONMENT*. Vol. 42, pp. 2410–2416, 2007.
- Angst, U. M., Elsener, B., Larsen, C. K., Vennesland, Ø., Chloride induced reinforcement corrosion: Electrochemical monitoring of initiation stage and chloride threshold values. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 53, pp. 1451–1464, 2011.
- Castro, P., Corrosión en Estructuras de Concreto Armado. Teoría, Inspección, Diagnóstico, Vida Útil y Reparaciones. Editorial. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Mérida 1998.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Polder, B., Corrosion of Steel in Concrete Prevention, Diagnosis, Repair. Edition Hardcover, Zurich, 2003.
- Hussain, R., Effect of moisture variation of oxygen consumption rate of corroding steel in chloride contaminated concrete. *REVISTA CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*. Vol.33, pp. 154–161, 2011).
- Meira, G. R., *et al.*, Chloride penetrations into concrete structure in the marine atmosphere zone. Relationship between deposition of chloride on the wet candle and chloride accumulated into concrete. *REVISTA CEMENT AND CONCRETE COMPOSITE*. Vol. 29, pp. 667-676, (2007).
- Meira, G. R., *et al.*, Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone - A tool for corrosion studies. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 50, pp. 2724–2731, 2008.
- Meira, G. R., *y col.*, Durability of concrete structure in marine atmosphere zone. The use of chloride deposition rate on wet candle as an environment indicator. *REVISTA CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*. Vol. 32, pp. 427–435, (2010).
- Hernández, Oroza, Alberto., Castañeda, Valdés, Abel., Marrero, Oliva, Marisol., Edificio Bacardí: historia arquitectónica y estado de conservación de un ícono habanero del siglo XX”. *YACHANA REVISTA CIENTÍFICA*. Vol. 12, No. 2, 2023.
- 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.
- Norma ASTM C-1218/M: 2008. Standard Test Method for Water-Soluble Chloride in Mortar and Concrete.
- Costa, A., Appleton, J., Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. *REVISTA CEMENT AND CONCRETE COMPOSITES*. Vol. 24, No. 4, pp. 169–179, 2002.
- Troconis de Rincon, O., Castro, P., Moreno, E. I., Torres-Acosta, A. A., Morón de Bravo, O., Arrieta, I., García, C., García, D., Martínez-Madrid, M., Chloride profiles in two marine structures—meaning and some predictions. *REVISTA Building and Environment*. Vol. 39, pp. 1065–1070, (2004).
- Guimarães, A. T. C., Climent, M. A., G. de Vera, F. J., Rodríguez, Vicente, F. T., Andrade, C., Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure. *REVISTA CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. Vol. 25, pp. 785-790, 2011.
- Norma ACI 562M-16. Code Requirements for Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete Structures and Commentary (metric) pp. 37.
- Brocken, H., Nijland, T. G., White efflorescence on brick masonry and concrete masonry blocks, with special emphasis on sulfate efflorescence on concrete blocks. *REVISTA CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. Vol.18, pp.315–323, 2004.
- Diaz, Gonçalves, T., Pel, L., Delgado, Rodríguez, J., Influence of paints on drying and salt distribution processes in porous building materials. *REVISTA CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. Vol.23, pp. 1751–1759, 2009.
- Ismail, M., Muhammad, B., Gelany, E., Compressive strength loss and reinforcement degradations of reinforced concrete structure due to long-term exposure. *REVISTA CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS*. Vol. 24, pp. 898–902, 2010).
- Castañeda, A., Corvo, F., Caracterización y comparación de los valores de velocidad de corrosión del acero de refuerzo determinados por ruido electroquímico y por diferencia de espesor bajo la influencia de cloruros. *REVISTA CENIC, CIENCIAS QUÍMICAS*, Vol. 39, No. 2, pp. 86 – 93. 2008.

- Castañeda, Valdés, A., Corvo, Pérez, F., Marrero, Águila, R., Fernández, Domínguez, A., Del Angel-Meraz, E., The service life of reinforced concrete structures in an extremely aggressive coastal city. Influence in concrete quality. *REVISTA MATERIALS AND STRUCTURES*. Vol. 56, No.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. *REVISTA BUILDINGS*. Vol. 14, No. 2494.2024.
- Howland, J, J., Tecnología del hormigón para ingenieros y arquitectos. Editorial Félix Varela, La Habana, 2013.
- Castañeda, A., Corvo, F., Howland, J, J., Marrero, R., Penetration of marine aerosol in a tropical coastal City: Havana. *REVISTA ATMÓSFERA-UNAM*. Vol.31, No. 1, pp. 87-104, 2018.
- Zhao, Y., Jiang, Y., Weiliang, J., Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 53, pp. 3388-3397, 2011.
- Zhao, Y., Jiang, Y., Yingyao, W., Weiliang, J., Critical thickness of rust layer at inner and out surface cracking of concrete cover in reinforced concrete structures. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 59, pp. 316-323, 2012.
- Carvajal, A, M., Vera, R., Corvo, F., and 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., Minotas, J., Delgado, J., Arroyave, C., Changes in atmospheric corrosion rate caused by chloride ions depending on rain regime. *REVISTA CORROSION SCIENCE*. Vol. 47, pp. 883–892, 2005.
- Castañeda, Valdés, A., Día, Brito, N., González, Mellor, E., Martínez, Hernández, M., Corvo, Pérez, F., Influencia de la penetración de iones cloruros en el hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento y condiciones de exposición. *REVISTA CENIC, CIENCIAS QUÍMICAS*, Vol. 36, No. ESPECIAL, 2005.

CONTRIBUCIÓN AUTORAL

Abel Castañeda Valdés: Autor principal. Responsable de la ejecución de los ensayos de determinación de cloruro en dos de las tres estructuras y en las probetas de hormigón armado. Elaboración de tablas y gráficos. Interpretación de los resultados. Redacción del artículo.

Alberto Hernández Oroza: Autor. Responsable de la ejecución de los ensayos de determinación de cloruro en una de las tres estructuras de hormigón armado. Interpretación de los resultados. Redacción del artículo.

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