

RESEÑA

## **Estudio de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en la habana**

**MSc. Abel Castañeda Valdés, Investigador Auxiliar, Profesor Asistente y Maestro en ciencias químicas.**

Departamento de Protección de Materiales. Dirección de Medio Ambiente. Centro Nacional de Investigaciones Científicas, Avenida 25 y 158, Apartado Postal 6414, La Habana. Cuba.

22 de enero de 2014

Tesis en opción al título de doctor en ciencias técnicas

---

El deterioro en las estructuras de hormigón armado en ciudades costeras, provocado por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, es identificado como uno de los problemas más complejos a solucionar por la ciencia y la tecnología a nivel mundial en los últimos 20 años. Los costos en los trabajos de mantenimiento y reparación de las estructuras a nivel mundial han sido económicamente muy significativos, sobre todo en países del primer mundo. En el litoral norte de La Habana específicamente en zonas muy próximas a la mar no caracterizada por el apantallamiento artificial y natural, existen disímiles estructuras de hormigón armado muy deterioradas debido al fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo lo cual ha venido afectando significativamente el bienestar social de la población que vive en ellas.

El hecho de que aún no se haya encontrado solución se debe a que tanto en Cuba como a nivel mundial, el fenómeno ha sido muy investigado bajo condiciones aceleradas de exposición, en estudio de diagnóstico a pie de obra pero no muy estudiado bajo condiciones reales de exposición. De manera general, los resultados obtenidos no conducen a la obtención de una herramienta o metodología que permita prevenir el fenómeno, basada en establecer los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido a diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento en La Habana, como objetivo general del estudio y solución eficaz del problema.

Se identificó una zona de elevado potencial constructivo en la capital donde fueron seleccionados siete sitios de exposición a diferentes distancias desde el mar. En cada sitio se colocaron captadores de contaminantes atmosféricos y probetas de hormigón armado a diferentes relaciones agua/cemento (0,4; 0,5 y 0,6) y espesores de recubrimiento de hormigón 20 y 40 mm. La elaboración de las mezclas de hormigón y la confección de las probetas se realizaron teniendo en cuenta las condiciones de diseño más usadas en la construcción de las estructuras de hormigón armado en Cuba.

Todo fue realizado con el propósito de identificar los factores que influyen en el comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro a diferentes distancias desde el mar como principal agente agresivo. Evaluar la calidad del hormigón armado antes de someterlo a condiciones reales de exposición. Determinar el comportamiento de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en el tiempo y a diferentes distancias desde el mar en función de la calidad del hormigón armado y el espesor de recubrimiento, así como demostrar la influencia de la concentración de iones cloruro en el interior del hormigón armado sobre el fenómeno. Por último, valorar la factibilidad económica a partir de una comparación entre los costos alcanzados en el estudio con los invertidos en los trabajos de reparación en estructuras de hormigón armado afectadas por el fenómeno.

El comportamiento de la deposición de las sales de iones cloruro en función del incremento de la distancia desde el mar ha sido estudiado en diversas zonas costeras del mundo no caracterizadas por el apantallamiento artificial de las estructuras y el natural debido a la vegetación de gran altura. Estas investigaciones tampoco se ejecutaron con el propósito de establecer los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en

diferentes calidades de hormigón armado y espesores de recubrimiento. El factor climático que más influye en la deposición de dichas sales tampoco fue valorado.

Se demostró que para una zona costera caracterizada por el apantallamiento, la distancia hasta la cual finalizó la considerable disminución de la deposición de las sales de iones cloruro fue alrededor de 40 m. Esta distancia resultó menor en comparación con dos zonas costeras de Cuba no caracterizadas por el apantallamiento. Es válido destacar que a partir de un valor de velocidad promedio del flujo de viento de 3 m/s en la capital, se incrementó la deposición de las sales de iones cloruro a diferentes distancias desde el mar, siendo más significativa la influencia del viento en la deposición de las sales en el sitio número uno ubicado a 20 m desde el mar, no caracterizado por el apantallamiento sobre todo el artificial. Se demostró además, que la disminución de la temperatura de la atmósfera debido a la ocurrencia de los fenómenos meteorológicos transitorios como la entrada de los sistemas frontales, fue el factor climático que más influyó en la deposición húmeda de las sales de iones cloruro en la ciudad, siendo más significativo también en el sitio más cercano al mar y en la zona del rompiente de las olas. Por lo que el efecto de apantallamiento artificial y natural en una ciudad costera como La Habana, influyó de manera positiva en cuanto a la disminución del nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera. Esto es debido a que en el sitio de exposición número uno donde no existió efecto de apantallamiento alguno, el nivel de agresividad corrosiva estimado para los principales materiales metálicos de la construcción fue de muy elevado (C5). Sin embargo, en las zonas de la ciudad donde existen las condiciones del apantallamiento, se estimó un nivel medio de corrosividad de la atmósfera (C3). Este resultado se diferencia del obtenido con relación al Mapa de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera de Cuba, al no existir en zonas cercanas al mar hasta 1 km de la costa norte, un nivel elevado de agresividad corrosiva (C4).

La calidad del hormigón armado antes de someterlo a condiciones reales de exposición fue evaluada a partir de la determinación de la resistencia a la compresión, velocidad de pulso ultrasónico y el porcentaje de porosidad capilar. Este último factor muy influyente en la calidad del hormigón armado y de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, fue obtenido a través de los ensayos del flujo de absorción capilar del agua y de presión al vacío.

De acuerdo con el comportamiento de la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso ultrasónico. Se demostró que el hormigón armado cubano dosificado en el intervalo de relaciones agua/cemento 0,4 a 0,6 presenta la calidad necesaria y suficiente para ser sometido a condiciones reales de exposición en climas costeros de elevada agresividad corrosiva de la atmósfera sin condiciones de apantallamiento. La evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico indicó que el hormigón presentó una buena compacidad y homogeneidad, es decir, una buena distribución de todos sus componentes en toda su masa. Sin embargo, los resultados correspondientes a la determinación del porcentaje de porosidad capilar determinados por ambos métodos demostraron que los poros capilares en el hormigón también se encuentran distribuidos de forma homogénea en toda la masa de cemento, siendo esto un indicador de la mala calidad que pudiera presentar el hormigón armado cubano.

No obstante los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por el ensayo del flujo de absorción capilar del agua demostraron que solo el hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 pudiera presentar la calidad requerida para resistir la penetración de los agentes agresivos. Los valores obtenidos por el método de la cámara de vacío indicaron que el hormigón armado en el entorno de las tres relaciones agua/cemento a la cual fue elaborado, no presentó la calidad adecuada para resistir las condiciones de elevada y muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera en las zonas bajo estudio. Por tanto, los ensayos de resistencia a la compresión y velocidad de pulso ultrasónico, no son suficientes para la evaluación de la calidad del hormigón armado cubano antes de someterlo a condiciones reales de exposición en zonas costeras de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera.

Como un indicador más profundo en la evaluación de la calidad del hormigón; se destacó la obtención del valor crítico de porcentaje de porosidad capilar el cual permitió incrementar el flujo de absorción capilar del agua en la masa del hormigón a través de los poros en el intervalo de relación agua/cemento utilizado. Este porcentaje de porosidad capilar fue de 8 %. A partir de ese valor, ocurrió la penetración de los agentes agresivos como son las sales de iones cloruro procedentes del aerosol marino de la atmósfera.

La corrosión atmosférica en los aceros de refuerzo colocados bajo 20 mm de espesor de recubrimiento de hormigón se incrementó ligeramente en el tiempo de exposición para la probeta de relación agua/cemento 0,4 y de una manera mucho más significativa para 0,5 y 0,6 en el sitio de exposición número uno ubicado a 20 m desde el mar. Para los aceros de refuerzo colocados a 40 mm, el incremento resultó menos significativo en estas últimas donde en la probeta de relación agua/cemento 0,4 no hubo un aumento del fenómeno en el tiempo de exposición. De manera general la corrosión atmosférica en el tiempo de exposición fue mayor en las probetas de hormigón armado para las tres relaciones agua/cemento donde los aceros de refuerzo fueron colocados a 20 mm de espesor. Por lo que se demostró bajo condiciones reales de exposición la influencia del espesor de recubrimiento en el fenómeno.

El incremento de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en el tiempo de exposición en las probetas de hormigón armado de diferentes relaciones agua/cemento, permitió establecer la vida útil de proyecto para las estructuras que se pretendían construir bajo condiciones de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera (C5) para los principales materiales metálicos más usados en la industria de la construcción. La vida útil se estableció a partir de la sumatoria de los tiempos de iniciación y propagación del fenómeno. Se demostró para estas condiciones,

que las estructuras construidas con un hormigón armado de relaciones agua/cemento 0,5 y 0,6; su vida útil de proyecto para ambos espesores de recubrimiento no excedía de cinco años. Este resultado fue confirmado con la observación visual de las probetas donde se notó el efecto del agrietamiento, siendo más significativo a un espesor de 20 mm. Sin embargo, para las construidas con un hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 se estimó de acuerdo con los modelos estadísticos, que el fin de la vida útil de la estructura a un espesor de 20 mm es de 23 años. Para 40 mm, el fenómeno de la corrosión atmosférica pudiera tener al menos un tiempo de iniciación de 50 años sin llegar a poder estimar la vida útil de proyecto. Por lo que se demostró que las estructuras de hormigón armado que se pretenden construir bajo dichas condiciones de diseño expuestas a un nivel de agresividad corrosiva de muy elevado en zonas costeras, pudieran presentar una vida útil de proyecto muy superior, siendo representativa de una gran extensión en el tiempo de los trabajos costosos de reparación. Debe tenerse en cuenta como elementos fundamentales a pie de obra la garantía de una buena colocación, compactación, vibración, proyección y curado del hormigón.

El incremento de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en función del tiempo de exposición permitió establecer la dependencia que presentó el fenómeno del porcentaje porosidad capilar determinado por los dos métodos, teniendo en cuenta la relación agua/cemento a la cual fue elaborada la mezcla. Ambos factores internos, considerados como dependientes totalmente del hormigón, influyen directamente en el inicio y propagación del fenómeno. El factor interno que más influyó en el incremento de la corrosión atmosférica fue la relación agua/cemento para ambos espesores de recubrimiento, en el sitio de exposición ubicado a 20 m desde el mar. No obstante, los valores de porcentaje de porosidad capilar determinados por el método de presión al vacío presentaron una mayor influencia en el fenómeno con relación a los obtenidos por el ensayo del flujo capilar del agua. Al no existir un incremento en el tiempo de la corrosión atmosférica en los otros seis sitios de exposición donde ya existen las condiciones de apantallamiento artificial y natural, no fue posible demostrar los factores internos que originan y desarrollan el fenómeno, así como el tipo de concentración de iones cloruro que más influyó en el mismo.

La concentración de iones cloruro en el interior del hormigón armado solamente influyó en la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en el sitio de exposición ubicado a 20 m desde el mar, con la excepción de la probeta de relación agua/cemento 0,4 para un espesor de recubrimiento de 40 mm. Esto se debió a que dicho parámetro presentó un comportamiento muy similar al de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo con relación a su incremento en el tiempo en dicho sitio de exposición. Se demostró además, que la concentración de iones cloruro totales y libres ejercen la misma influencia sobre el fenómeno bajo condiciones de muy elevada agresividad corrosiva de la atmósfera.

La deposición de las sales de iones cloruro, la concentración promedio de iones cloruro totales, así como la corrosión atmosférica del acero de refuerzo presentaron un comportamiento muy similar en cuanto a su disminución con el incremento de la distancia desde el mar. Se demostró que las sales iones cloruro procedentes desde el interior del océano al penetrar en el hormigón armado, no deben conducir a un deterioro producto de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo en las estructuras ubicadas en la ciudad a mayores distancias desde el mar. La deposición de las sales de iones cloruro en la zona del rompiente de las olas, influye directamente en el deterioro de las estructuras de hormigón armado ubicadas en zonas no apantalladas de la ciudad, con la excepción de un hormigón armado de relación agua/cemento menor o igual a 0,4 donde los aceros de refuerzo deben colocarse a partir de 40 mm de espesor de recubrimiento de hormigón. Este resultado sirvió para el establecimiento de los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo en función de la calidad del hormigón y el espesor de recubrimiento.

El nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera muy elevado (C5) en el sitio ubicado a 20 m desde el mar, puede ser considerado también para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en las probetas de relación agua/cemento 0,5 y 0,6 para ambos espesores de recubrimiento de hormigón. También este nivel debe tenerse en cuenta para la probeta de relación agua/cemento 0,4 donde los aceros de refuerzo fueron colocados a 20 mm de espesor de recubrimiento, al estimarse un tiempo de propagación de 20 años el cual traiga como resultado la aparición de las grietas en el hormigón como indicativo del fin de la vida útil de proyecto de las estructuras.

Con relación a la probeta de hormigón armado de relación agua/cemento 0,4 a un espesor de 40 mm de recubrimiento de hormigón, el nivel de agresividad corrosiva en el sitio puede considerarse bajo (C2), debido a la no existencia de un tiempo de iniciación del fenómeno.

En el resto de los sitios de exposición, es decir a partir de una distancia de 170 m desde el mar, se obtuvo también un nivel bajo de agresividad corrosiva de la atmósfera (C2) para ambos espesores de recubrimiento de hormigón en las tres probetas de relaciones agua/cemento 0,4; 0,5 y 0,6. Todo lo referido anteriormente permitió entonces la elaboración del Mapa Regional de la Agresividad Corrosiva de la Atmósfera en La Habana para el acero de refuerzo embebido a diferentes calidades de hormigón y espesores de recubrimiento. Este mapa puede constituir una herramienta segura y eficaz que permita prevenir el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo como una mejor opción que combatirlo. Para su elaboración, solo se tuvo en cuenta el comportamiento de las sales de iones cloruro provenientes desde el mar como principal agente agresivo.

El estudio resultó menos costoso en comparación con el costo total de los trabajos de reparación en ocho estructuras muy deterioradas por el fenómeno y otras zonas del país de elevado potencial constructivo. Se estimó que la

extensión en el tiempo de los trabajos de reparación representa un incremento de los ahorros, así como una disminución en los costos de reparación.

La tesis doctoral consta de Agradecimientos, Síntesis, Índice, Introducción, Revisión Bibliográfica con sus respectivas conclusiones, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión. Este último dividido en tres acápite también con sus pertenecientes conclusiones, además de la Conclusiones Generales, Recomendaciones, Referencias Consultadas y los Anexos.

Los resultados obtenidos en el estudio son divulgados a las entidades encargadas de ejecutar los trabajos de reparación construcción de las obras de hormigón armado en zonas costeras de Cuba de elevado potencial constructivo. Se destaca que la tesis es avalada por el Departamento de Desarrollo Tecnológico del Ministerio de la Construcción y por el Consejo Científico del Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción de Cuba. Parte de los resultados de este trabajo han dado lugar también a la aceptación de cuatro publicaciones en revistas de alto factor de impacto.

El trabajo ha sido desarrollado en 171 páginas y contiene 19 tablas y 15 figuras, cuenta además con 9 anexos. En él se reportan 280 referencias bibliográficas de las cuales el 50% corresponden a los últimos cinco años y un 25% a los diez años.

Como conclusión final se pudo señalar que es posible disminuir el deterioro prematuro en las estructuras de hormigón armado, principalmente las que se pretenden construir en las zonas más cercanas al mar sin el efecto del apantallamiento artificial y natural existente en la ciudad.

La novedad y originalidad de esta investigación radica en establecer los niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera para el acero de refuerzo embebido en el hormigón armado como una herramienta segura y eficaz que permita prevenir el deterioro en las estructuras que se pretenden construir, en una ciudad costera caracterizada por el apantallamiento artificial y natural.

El impacto científico se basa en el aporte al conocimiento sobre el comportamiento de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado en la Habana, teniendo en consideración sus características ambientales, particularmente la zona de salinidad extrema.

El impacto social está relacionado con el incremento en la durabilidad y vida útil de proyecto de las estructuras de hormigón armado que se pretenden construir en La Habana en zonas muy próximas al mar, sin el efecto del apantallamiento.