

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO POR DURABILIDAD DEL HORMIGÓN EN UNA ZONA DEL PERFIL COSTERO DE MANABÍ, ECUADOR

STUDY OF THE DURABILITY PERFORMANCE OF CONCRETE IN AN AREA OF THE COASTAL PROFILE OF MANABÍ, ECUADOR

6 de julio del 2023 Tesis en opción al título de Doctor en Ciencias

*Ing. Juan Carlos Guerra Mera, Docente principal tiempo completo y Magíster en Gerencia Educativa.
Universidad Técnica de Manabí. Ave Urbina y Che Guevara, Portoviejo, Manabí, Ecuador.*

Recibido: 14 de septiembre de 2023;

Aceptado: 8 de noviembre de 2023;

El deterioro anticipado de las estructuras de hormigón armado expuestas al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, debido principalmente al fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, constituye actualmente un problema social de la ciencia y la tecnología muy difícil de solucionar a nivel mundial. En el ámbito científico internacional, se carece de un consenso único dentro de las normativas que permitan en el campo de la ingeniería civil, establecer los requerimientos para el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón, y que posibiliten garantizar plazos elevados de vida útil para las estructuras de hormigón armado. Particularmente, esta limitación se manifiesta en aquellas construcciones que se encuentran expuestas al impacto del ambiente agresivo costero, en que las categorías de agresividad corrosiva o corrosividad de la atmósfera se pueden calificar entre elevada (C4), muy elevada (C5) e incluso, extrema (CX).

La tendencia en cuanto a la ejecución de los estudios del desempeño adecuado por durabilidad en el hormigón, es que sean ejecutados en una zona costera de elevado potencial constructivo característica y específica de cada país, para que los resultados sean generalizados en todo el perfil costero. Siempre y cuando se demuestre la existencia de categorías de elevada (C4), muy elevada (C5) y extrema (CX) de agresividad corrosiva de la atmósfera, es decir, el impacto del ambiente agresivo costero en el deterioro anticipado y muy visible en las estructuras de hormigón armado debido al fenómeno.

El perfil costero del Ecuador cuenta con una extensión territorial de 640 km. De estos, 350 km pertenecen a la provincia de Manabí, es decir, un 54,6% de la totalidad del perfil costero del país. Se trata de la mayor zona turística en extensión, y en gran medida industrial y residencial, con un potencial constructivo muy elevado y en vías de desarrollo.

Por ejemplo, la ciudad costera de Bahía de Caráquez, perteneciente al cantón Sucre de la provincia de Manabí, situada en la desembocadura del río Chone, posee un gran número de estructuras de hormigón armado que por su ubicación se encuentran expuestas al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera. Esta ciudad posee una reconocida infraestructura turística, residencial y social que la ubica como cabecera cantonal, construidas la mayoría mediante hormigón armado. Actualmente, una buena parte de las edificaciones están muy deterioradas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo. De ahí, a que dicha zona haya sido seleccionada para la ejecución de este estudio. Al tener acceso a los documentos de proyectos, resultó contradictorio constatar que la mayoría de las estructuras de esta región, han sido construidas con un hormigón cuya relación agua/cemento se corresponde con lo establecido en las normativas para ambientes agresivos en el Ecuador. Pero el deterioro anticipado en las estructuras debido a la corrosión atmosférica del acero de refuerzo persiste. Esto permitió llegar a una conclusión preliminar: la relación agua/cemento en el hormigón sin dudas es un parámetro necesario que hay que evaluar en dependencia de las condiciones de agresividad del medio ambiental, pero no es suficiente en la ingeniería civil a la hora de construir estructuras durables que garanticen plazos elevados de vida útil en zonas costeras. Es necesario, además, evaluar otros requerimientos y dominar los parámetros que caracterizan la agresividad corrosiva de la atmósfera para actuar en base a ellos.

En Ecuador está vigente una normativa para la construcción de edificaciones en zonas costeras. Sin embargo, en la normativa no se tienen en cuenta algunos requerimientos en cuanto al desempeño por durabilidad del hormigón evaluando las condiciones agresividad corrosiva de la atmósfera. Por otra parte, en el país no existían investigaciones profundas que permitan caracterizar los parámetros propios del ambiente agresivo costero de la atmósfera, y que sirvan de base para definir criterios en el desempeño por durabilidad, que garanticen plazos elevados de vida útil en las estructuras de hormigón armado.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, surgió el problema de investigación, consistente en el deterioro manifiesto de las estructuras de hormigón armado del perfil costero de Manabí debido al fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, al desconocimiento por proyectistas y ejecutores de los parámetros que caracterizan el ambiente agresivo en esta región y la falta de interacción entre éstos y las propiedades que debe cumplir un hormigón durable. Definido el problema de investigación, se concibió como objeto de la misma, las estructuras de hormigón armado deterioradas por el fenómeno de la corrosión atmosférica expuestas al ambiente agresivo costero y como campo de investigación, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

Del análisis de las problemáticas evaluadas y de la propia concepción del problema de investigación expuesto, se pudo enunciar, a modo de hipótesis, que los deterioros que manifiestan las estructuras de hormigón armado en el perfil costero de Manabí, se deben a no tener en cuenta los requerimientos por durabilidad que caracterizan parámetros propios de la agresividad corrosiva de la atmósfera durante el diseño de las dosificaciones de hormigón. Validar esta hipótesis, permitió incorporar los requerimientos derivados de la investigación a las normativas existentes en el Ecuador, demostrando la dependencia de la durabilidad de los hormigones a los parámetros que caracterizan el ambiente agresivo costero.

Definida la hipótesis, se enunció como objetivo general de la investigación, establecer los requerimientos por durabilidad que garanticen plazos elevados de vida útil en las estructuras de hormigón armado expuestas en el perfil costero de Manabí y Ecuador.

En base al objetivo general anteriormente planteado, se trazaron como objetivos específicos de la investigación: Evaluar el estado del arte sobre el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón y la agresividad corrosiva de la atmósfera. Caracterizar la agresividad corrosiva de la atmósfera a que están sometidas las estructuras de hormigón armado en la zona de estudio de la provincia de Manabí. Definir los requerimientos por durabilidad del hormigón, ante las categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera que caracterizan el perfil costero de la zona estudiada.

La novedad científica de la investigación radicó en el hecho de que, por primera vez, se definieron los requerimientos para el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón ante los parámetros que caracterizan la agresividad corrosiva en el perfil costero de Manabí, dirigidos a garantizar plazos elevados de vida útil en las estructuras de hormigón armado, y que podrían extenderse a todo el país. Como impacto científico, el incremento de la vida útil de las estructuras de hormigón armado que se pretendan construir en el perfil costero de la provincia de Manabí.

La importancia del tema radicó en que los resultados obtenidos en este trabajo investigativo, pretenden aportar a la normativa ecuatoriana de la construcción, los requerimientos por durabilidad para garantizar plazos elevados de vida útil de las estructuras expuestas a categorías elevadas de agresividad corrosiva de la atmósfera, no solo en la provincia de Manabí, sino en toda la región costera del Ecuador, considerada como de elevado potencial constructivo.

Por otra parte, dicho incremento en la vida útil de las estructuras de hormigón armado, aportó una disminución en los costos de reparación. Los resultados obtenidos en este estudio investigativo, fueron entregados también al Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Manabí (MTOPM) para su aplicación y generalización. Además, fueron divulgados a otras entidades encargadas de ejecutar los trabajos de construcción de las obras de estructuras de hormigón armado en toda la zona costera del país de elevado potencial constructivo.

El aporte social y económico del estudio estuvo encaminado a construir las estructuras de hormigón armado con un desempeño adecuado por durabilidad, garantizando plazos elevados de vida útil de proyecto, sobre todo en aquellas zonas donde existe la influencia directa del impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera. Los resultados obtenidos permitirán implantar medidas encaminadas a la disminución de la importación de aditivos, métodos de protección secundarios (pinturas especiales y recubrimientos), tecnologías y productos especializados de un elevado precio en el mercado, muy utilizados en los trabajos costosos de reparación o mantenimiento de las estructuras, expuestas al impacto del ambiente agresivo costero de la atmósfera, intensamente dañadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo.

En el Capítulo I basado en la crítica al estado del arte sobre el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón y la agresividad corrosiva de la atmósfera, se pudo abordar, la razón fundamental de la falta de requerimientos para el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón, antes de colocarlo a pie de obra. Esto ha provocado un incremento acelerado en el deterioro de las estructuras de hormigón armado a partir del fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo, sobre todo en perfiles costeros, lo que puede deberse, por una parte, a problemas tecnológicos en la construcción de las estructuras, pero también por otra, a la insuficiencia de estudios previos basados en la evaluación de los ensayos químicos, físicos y mecánicos en el hormigón de conjunto con la agresividad ambiental o corrosiva de la atmósfera

en la zona de construcción. Para el perfil costero del Ecuador, es conveniente obtener los valores de porcentaje de porosidad capilar efectivo que deben normar los diseños de mezclas de hormigón usadas en las construcciones, como parámetro determinante en la resistencia a la compresión, en el desempeño adecuado por durabilidad del hormigón y en la vida útil de las estructuras, especialmente las sometidas a condiciones de elevada agresividad ambiental. Resultó conveniente demostrar, si el nivel de deterioro en las estructuras pudiera depender de la calidad del hormigón, del nivel de agresividad corrosiva de la atmósfera o de ambos factores en conjunto, empleando la técnica de resistividad.

La definición de los niveles de agresividad ambiental o corrosiva de la atmósfera fue muy importante en la zona de estudio seleccionada, con el propósito de garantizar el adecuado diseño de mezclas en las estructuras que se pretenden construir en dicho perfil costero. Los resultados obtenidos en los estudios de corrosión atmosférica, como una herramienta segura y eficaz en la ingeniería civil, deben ser incluidos en los estudios destinados al desempeño adecuado por durabilidad. De esta forma, se garantizan plazos elevados de vida útil en las estructuras de hormigón armado en zonas costeras. Se demostró, la carencia de estos estudios en los litorales costeros del Océano Pacífico donde se incluye Ecuador.

Como requerimiento por durabilidad en el perfil costero de Ecuador, resultó el umbral de velocidad promedio anual del viento a partir del cual se incrementó la deposición de las sales de iones cloruro a diferentes distancias desde el mar, demostrando además que la deposición tuvo lugar en forma de solución salina o cristales de sales, es decir seca.

El Capítulo II de Materiales y Métodos estuvo dirigido a decidir las particularidades de los procedimientos y diseños experimentales, para la obtención y procesamiento de las variables de respuesta necesarias que permitieron definir los parámetros que caracterizaron el ambiente agresivo costero de la zona de estudio. El estudio de corrosión atmosférica fue ejecutado en la zona oeste de la provincia de Manabí, entre las ciudades costeras de elevado potencial constructivo de Bahía de Caráquez (0°36'0" LS y 80°25'0" LW) y San Vicente (0°35'48" LS y 80°24',68" LW) en el cantón de Sucre. Ambas ciudades están comunicadas por un puente de hormigón armado (Puente Los Caras), con una extensión de 1,98 km por encima del estuario del Río Chone. Esto permitió la caracterización en cuanto a la efectividad de los diseños de mezcla utilizados en el hormigonado de las estructuras de hormigón en el perfil costero de Manabí, ante el ambiente agresivo costero. Todo ello con el objetivo de establecer los requerimientos por durabilidad, para garantizar plazos elevados de vida útil de las estructuras. Del análisis efectuado a lo largo de este capítulo se extrajeron como conclusiones parciales: El logro en efectuar la planificación de un diseño experimental confiable que permitió obtener a diferentes distancias desde la costa en la zona de estudio, los parámetros que caracterizaron el ambiente agresivo costero de la atmósfera, en particular, el nivel de deposición de iones cloruros sobre las estructuras y la velocidad de corrosión atmosférica en probetas de acero al carbono AISI-1020 de dimensiones estandarizadas. Definido lo anterior, se logró en el capítulo la planificación de un segundo experimento. Este, dirigido a evaluar el comportamiento del hormigón empleado originalmente en las estructuras de hormigón en el perfil costero de Manabí. Se utilizó como caso de estudio precisamente el puente Los Caras, mediante la simulación de una nueva dosificación del hormigón con la materia prima y procedimientos utilizados en aquel momento, pero enriquecido mediante la evaluación de variables de respuesta que no se tuvieron en cuenta en el control de calidad inicial. Estas fueron el porcentaje de porosidad capilar efectivo y la resistividad superficial, muy importantes en la evaluación del comportamiento del hormigón ante el ambiente agresivo costero de la atmósfera.

Con el fin de establecer los requerimientos por durabilidad para garantizar plazos elevados de vida útil de las estructuras, un segundo experimento fue complementado con dosificaciones en las que se evaluó la calidad del hormigón ante diferentes relaciones agua/cemento. Al final del capítulo, se instrumentaron los procedimientos para el procesamiento estadístico de las variables respuesta con elevado grado de confiabilidad. De esta manera resultó factible entonces pasar a la ejecución de los experimentos diseñados, cuyos resultados se analizaron en el tercer capítulo de la tesis.

El Capítulo III de Resultados y Discusión fue esencial en el cumplimiento de los objetivos de la tesis. Con el mismo se logró caracterizar los parámetros propios del ambiente agresivo de la atmósfera en el perfil costero de Manabí y su influencia en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Se pudo caracterizar el comportamiento mensual del complejo humedad relativa-temperatura-viento, el nivel de deposición de las sales de iones cloruro sobre las estructuras a diferentes distancias desde el litoral y obtener el umbral crítico de velocidad del viento, a partir del cual la deposición mensual de las sales de iones cloruro fue incrementada. Se demostró que, a pesar de que los valores promedios mensuales de velocidad del viento fueron clasificados como una brisa costera débil, existieron en la zona de estudio valores elevados de deposición de sales de iones cloruro. Esto justificó la existencia de categorías elevada (C4) y muy elevada (C5) de agresividad corrosiva de la atmósfera. Estas categorías no

se han tenido en cuenta anteriormente en las actividades de proyección y construcción de las edificaciones de hormigón armado del perfil costero, lo que es indicador del deterioro prematuro de las mismas, debiendo considerarse en el futuro. Se constató que es factible pronosticar el comportamiento de las categorías de agresividad corrosiva atmosférica para períodos de uno hasta 20 años, lo que constituye una herramienta muy importante a la hora de garantizar plazos elevados de vida útil para las estructuras que se pretende construir. La aplicación de los parámetros que caracterizaron la agresividad corrosiva de la atmósfera a un caso de estudio, permitió inferir que es incorrecto considerar sólo como requerimientos por durabilidad la relación agua/cemento y la resistencia a compresión. Hay que considerar también el porcentaje de porosidad capilar efectivo y la resistividad superficial. Entre los procedimientos de dosificación comúnmente empleados en Ecuador se demostró que, para estas condiciones de agresividad corrosiva de la atmósfera, los mejores resultados se obtuvieron efectuando los diseños por el método de vacío mínimo. Los resultados de la investigación demostraron, además, que para la construcción de las estructuras en las edificaciones de hormigón armado en el perfil costero de Manabí y en Ecuador, es de vital importancia tener en cuenta como requerimientos por durabilidad, la resistencia característica a compresión del hormigón mínima (35 MPa), la máxima relación agua/cemento (0,4), el porcentaje mínimo de porosidad capilar efectivo (<10 %) y la resistividad superficial (rango entre 25 y 200 KΩ cm). Las conclusiones generales lograron cumplir con el objetivo general y los específicos de la tesis trazados en la investigación. De esta manera, se constató la hipótesis que sustentó la investigación, ya que, a partir de la caracterización de la agresividad corrosiva de la atmósfera en la zona de estudio y su relación o influencia en las propiedades del hormigón, fue posible establecer requerimientos por durabilidad en el hormigón que se elabora en el Ecuador para garantizar plazos elevados de vida útil en las estructuras que se pretenden construir en el perfil costero de Manabí. La investigación realizada permitió clasificar el perfil costero de Manabí en las categorías de elevada y muy elevada de agresividad corrosiva atmosférica para las estructuras de hormigón armado, y no severa como recoge la normativa ecuatoriana. Esto no se ha tenido en cuenta en las etapas anteriores de proyección y construcción y se consideró una de las causas del deterioro prematuro de las edificaciones, exigiendo con más rigor los requerimientos por durabilidad. Se definieron como requerimientos por durabilidad del hormigón ante las nuevas categorías de agresividad corrosiva de la atmósfera, la resistencia mínima a compresión que debe cumplir el hormigón en el perfil costero de Manabí, la máxima relación agua/cemento, el mínimo porcentaje de porosidad capilar efectivo y el rango de resistividad superficial. Al aplicar los resultados de la investigación al caso de estudio (Puente Los Caras), se pudo constatar que los resultados obtenidos en los diseños de dosificaciones aplicando criterios de vacío mínimo, son superiores en calidad a los obtenidos con la réplica del diseño original de la dosificación del puente y con la metodología del ACI. Esto debe servir de referente para futuras dosificaciones de hormigones en estructuras a construir en este ambiente agresivo.

Como recomendaciones, se consideró importante extender los estudios efectuados a otras regiones del perfil costero de Ecuador, ratificando o no la existencia de similares niveles de agresividad corrosiva de la atmósfera y estableciendo para ellas los requerimientos por durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Proponer la inclusión en la normativa ecuatoriana de los requerimientos por durabilidad derivados de la investigación actual.

El documento de tesis fue redactado en 140 páginas. Contiene 39 tablas, 16 figuras y ocho certificados de control de la calidad de los áridos y cemento usado en la elaboración de las mezclas de hormigón. En él se reportan 121 referencias bibliográficas de las cuales el 50% corresponden a los últimos 10 años y el resto a los 20 años.