



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
"Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En Opción al Título de

Ingeniero Mecánico

Factores del Deterioro por Corrosión del Refuerzo del
Hormigón Armado en el Ambiente Urbano del Instituto
Superior Minero Metalúrgico de Moa.

Diplomante: Maikel Olivero Montero.

Tutores: Dr.C. Alberto Velázquez del Rosario.
Dr.C. Tomás Fernández Columbié.

Moa/2012
"Año 54 de la Revolución"



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD:

Yo: **Maikel Olivero Montero**, autor del presente trabajo de diploma y los tutores Dr. C. Alberto Velázquez del Rosario, Dr.C. Tomás Fernández Columbié declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

Maikel Olivero Montero

Dr.C. Alberto Velázquez del Rosario

Dr.C. Tomás Fernández Columbié

...“ Sí no existe organización, no existe racionalidad, las ideas después del primer impulso, van perdiendo eficacia, van cayendo en la rutina, en el conformismo y acaban por ser simplemente un recuerdo”...

Ernesto Ché Guevara



DEDICATORIA

Cuando al culminar una meta deseada impone momentos de alegría, cuando se quiere resumir a velocidad inimaginable se deben tener presentes aquellas personas que con su constancia y dedicación contribuyeron a la realidad que representa llegar hasta el final, obviando de manera impredecible los obstáculos que la vida misma impone.

En virtud del modesto esfuerzo que esas personas realizan en aras del bienestar de uno mismo y en total conformidad con mis sentimientos dedico este logro personal:

A mis tutores: Dr.C Alberto Velázquez del Rosario y Dr.C Tomas Fernández Columbié por su absoluta dedicación durante el desarrollo de este trabajo, por sus muestras de confianza, admiración, respeto e interés para con mi persona.

A: Margarita Montero Reyes (mi madre) por su constante lucha ante la dificultades que a veces me hacían dudar en la posibilidad del triunfo, a ella que además de mi existencia le debo lo que soy y lo que pueda ser mientras viva .

A: mi hermana (Yuliet Olivero Montero) por su fuentes de constante inspiración en mi quehacer personal y por apoyarme siempre en los momentos decisivos de mi carrera.

A: Policarpo Olivero Córdova (mi Papá) que de cierta forma siempre me brindó su apoyo incondicional.

A: Ángel Luis Columbié (mi padrastro) por su orientación en todo momento, por su apoyo. A él que siempre estuvo presente en los tiempos de dificultad.

A todos los profesores que dedicaron parte de su apreciado tiempo a mi educación y que verdaderamente ven en mí el fruto de su arduo trabajo.

A mis amistades y colegas que me apoyaron en cualquiera de las formas posibles y a todos aquellos que de manera muy sencilla me ayudaron.

A todos "les dedico este éxito"

El autor

AGRADECIMIENTOS

Por la especial significación que tiene la culminación de este trabajo y de mis estudios, quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a su realización; pero se debe destacar la colaboración de las siguientes personas:

A mis tutores: Dr. Alberto Velázquez del Rosario y Dr. Tomas Fernández por su absoluta dedicación durante el desarrollo de este trabajo.

A mi madre: por la confianza que siempre depositó en mí, por sus esfuerzos realizados en todas las esferas de la vida para que pudiera terminar este sueño que hoy es una hermosa realidad.

A todos mis amigos y amigas porque gracias a ellos obtuve la fe para terminar este trabajo.

A la Revolución Cubana por haberme dado la oportunidad de formarme como profesional.

A todos "Muchas Gracias"

El autor

Resumen

Se presentan los resultados del estudio de los factores de corrosión a considerar para el tratamiento del refuerzo de acero en hormigón armado bajo condiciones ambientales del territorio de Moa, particularizado al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Se realizaron mediciones del recubrimiento de concreto tomadas en las cuales, se puede observar que no se cumple con la norma establecida en la mayoría de los casos. Se llevó a cabo el análisis químico del concreto y los materiales del refuerzo para conocer la naturaleza de los componentes. Se estudió la posible influencia de los gases atmosféricos en la corrosión del refuerzo del concreto a través de la determinación de la profundidad de carbonatación, la presencia de iones cloruros y sulfatos. Se investigó la calidad del hormigón a través del análisis de permeabilidad y el espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero. Se investigó la influencia del ambiente marino en Moa en la corrosión del refuerzo del concreto y se analizan algunas Normas para la protección y diseño de armaduras sometidas al ataque de cloruros. Se concluye que los principales factores que determinan el deterioro de las estructuras de hormigón armado del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, son la corrosión electroquímica del refuerzo bajo los efectos combinados de la presencia de iones en la atmósfera, la poca uniformidad en el tipo de acero, insuficiente espesor del concreto que recubre las armaduras, en contraposición a lo establecido por las normas, elevados valores de humedad relativa y los prolongados tiempos de humectación por los efectos de las lluvias y las filtraciones.

Palabras Clave: factores de corrosión, hormigón armado, iones cloruro, corrosión electroquímica

ABSTRACT

Results about the study of corrosion factors to be considered in the treatment of concrete reinforcement under the environment conditions of Moa City, particularized to Moa's Mining Metallurgical Superior Institute. Concrete coverage measurements were done and it was stated that standards are not carried out. The chemical analysis of concrete and reinforcement steels was also carried done in order to know the components nature. The influence of atmosphere gases in the corrosion behavior of the concrete reinforcement was studied also by means of carburization deep and the possible presence of chlorides and sulfides ions. The quality of the concrete was researched by means of permeability and the deep of steel reinforcement oxide layer. The influence of the marine environment in Moa on the corrosion of the steel reinforcement considering some standards for protection and design of frameworks for chloride environments was investigated also. It is concluded that the main factors affecting the damage of concrete frameworks at Moa's Mining Metallurgical Superior Institute are: electrochemical corrosion of the reinforcement under the combined effects of the presence of atmosphere ions, the non-uniformity of the steel, inadequate concrete layer thickness of the steel, high relative atmosphere humidity and the prolonged humectation times of the concrete under the effects of rains and filtrations due to water losses.

Key words: corrosion factors, reinforced concrete, chloride ions, electrochemical corrosion

INDICE

	Pág.
RESUMEN	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. ESTADO DEL ARTE	
1.1 Introducción	4
1.2 Trabajos precedentes	5
1.2.1 Corrosión del concreto	7
1.2.2 Concreto reforzado	7
1.2.3. Naturaleza del origen de la corrosión en el concreto	8
1.2.4 Factores de corrosión del acero de refuerzo	9
1.2.4.1 Corrosión iniciada por penetración de iones cloruro	9
1.2.4.2 Corrosión iniciada por carbonatación	12
1.2.4.3 Otros factores que influyen en la corrosión de las armaduras	14
1.2.5 Diseño de mezclas	14
1.2.5.1 Cemento	15
1.2.6 Agregados pétreos: arena y grava	16
1.2.6.1 Reacción álcali-agregado	16
1.2.7 Agua	16
1.2.8 Aditivo	17
1.2.9 Acero	19
1.3 Agentes agresivos del hormigón	20
1.4 Conclusiones del capítulo I	21
CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	
2.1. Introducción	22
2.2. Toma de muestras de hormigón y refuerzos	23
2.3. Análisis químico del hormigón	24
2.4. Análisis químico de los materiales del refuerzo	24
2.5. Medición del recubrimiento de concreto	24
2.6. Determinación de la profundidad de carbonatación en el concreto	25
2.7. Resistividad eléctrica	25
2.8. Determinación de la concentración de cloruros en el concreto	26
2.9. Determinación de la concentración de sulfatos en el concreto	26
2.10. Determinación de la permeabilidad del hormigón	27
2.11. Determinación del espesor de la capa carbonatada en el concreto	28
2.12. Determinación del espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero	28
2.13 Conclusiones del Capítulo II	30

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1	Introducción	31
3.2	Análisis químico del hormigón	31
3.3	Análisis químico de los materiales del refuerzo	33
3.4	Medición del recubrimiento del concreto	33
3.5	Determinación de la profundidad de carbonatación	34
3.6	Resistividad eléctrica del concreto	36
3.7	Presencia e influencia de cloruros en el concreto	36
3.8	Presencia e influencia de sulfatos en el concreto	40
3.9	Permeabilidad del hormigón	40
3.10	Determinación del espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero	41
3.11	El ambiente marino en Moa y su influencia en la corrosión del refuerzo del concreto	41
3.12	Normas para la protección y diseño de armaduras	44
3.13	Protección y reparación de estructuras de concreto sometidos al ataque de cloruros	45
3.14	Impacto Económico	46
3.15	Impacto Social y Ambiental	47
3.16	Conclusiones del Capítulo III	48
	Conclusiones Generales	49
	Recomendaciones	50
	Referencias Bibliográficas	51
	Anexos.	

INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo en el hormigón es una de las causas responsables del deterioro de la infraestructura de concreto que conduce a elevados gastos de rehabilitación y mantenimiento, aparición de riesgos de accidentes o inhabilitación de obras civiles. Los problemas de deterioro por corrosión de estas estructuras de hormigón armado dependen, en gran medida, de las características del medio ambiente a que se encuentran expuestas.

Muchas construcciones civiles como edificaciones, puentes, ductos de alcantarillado, tanques y otros presentan un serio estado de deterioro de paredes, techos o cubiertas que en muchos casos ponen en riesgo su vida útil. En muchos casos en la etapa de proyecto no se ha tenido un correcto diagnóstico de las condiciones ambientales que afectarán a la estructura a lo largo de su periodo de explotación, por lo que se hace necesario analizar detalladamente el comportamiento de las mismas, de manera que se genere un estado de conocimiento que ayude a establecer estrategias de pronóstico y/o conservación para el diseño de nuevas estructuras.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La consideración de agentes que determinan los tiempos en que se puede alcanzar el riesgo de falla, de decidir el momento óptimo para iniciar su rehabilitación o el tipo de mantenimiento que se debe aplicar a una infraestructura de hormigón, resulta un aspecto necesario a considerar para el desarrollo de construcciones de mayor fiabilidad.

De esta manera, la obtención y el tratamiento de datos que revelen la influencia de la concentración de iones cloruro, iones sulfuro o carbonatos presentes en la atmósfera, el conocimiento de las profundidades de difusión de capas oxidadas y su tendencia, la influencia de la humedad relativa, la temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, niveles de radiación solar, tiempo de humectación y tiempo de insolación que determinan el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión de los refuerzos en el hormigón armado constituye un atractivo tema de investigación en la rama de la Ingeniería de los Materiales.

En tal sentido, se establece como **situación problemática** la siguiente:

Los aspectos de Ingeniería de Proyecto que se consideran actualmente en el diseño de estructuras de hormigón armado, no tienen en cuenta estudios de Ingeniería de la Corrosión que revelen en profundidad las características ambientales de los territorios donde se ubicarán las construcciones para definir las particularidades ingenieriles de las construcciones.

Problemas de deterioro de estructuras de hormigón armado acunían que la base de los mismos radica en el desconocimiento de la influencia de las variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura, precipitación pluvial, velocidad del viento, niveles de radiación solar, tiempo de humectación y tiempo de insolación), la composición de la atmósfera (concentración de iones), las características del refuerzo (diferentes tipos de aceros y uniones soldadas y por tanto diferentes valores de actividad electroquímica en el refuerzo) y el concreto. Las soluciones a estos problemas se circunscriben al sobredimensionamiento de las estructuras, sin proponerse una investigación exhaustiva que involucre los factores de corrosión a considerar en el diseño e inevitablemente las estructuras se deterioran por la corrosión del refuerzo y las labores de rehabilitación y mantenimiento y los riesgos de accidentes persisten.

El **problema de investigación** lo constituye:

Desconocimiento de las particularidades de los factores ambientales que determinan el deterioro por corrosión del refuerzo del hormigón armado bajo condiciones ambientales de la región de Moa, particularizados al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM).

Como **objeto de investigación** se identifica:

Factores de corrosión a considerar para el tratamiento del refuerzo de acero en hormigón armado bajo condiciones ambientales del ISMMM.

Y como **campo de acción** se establece:

Ingeniería de la corrosión

El **objetivo** del trabajo lo constituye:

Caracterizar los principales factores de corrosión que ocasionan el deterioro del refuerzo del hormigón armado bajo condiciones ambientales del ISMMM.

Hipótesis:

El deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado del ISMMM, está provocado por la corrosión electroquímica del refuerzo bajo los efectos combinados de la presencia de iones en la atmósfera, la poca uniformidad en el tipo de acero, heterogeneidades en el medio químico o físico que rodea al acero, la humedad relativa y el tiempo de humectación.

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto y verificar la hipótesis planteada, se establecen las **tareas de trabajo** siguientes:

1. Revisión de los elementos de Ingeniería de Proyecto que se aplican en el diseño de estructuras de hormigón armado para el ISMMM.
2. Análisis del comportamiento histórico de las variables meteorológicas en la ciudad de Moa, con el objetivo de determinar el deterioro prematuro de las estructuras de hormigón armado del ISMMM
3. Análisis de la composición de la atmósfera predominante en la zona donde se encuentra situado el ISMMM.
4. Caracterización del refuerzo (tipos de aceros y uniones soldadas empleadas) y el concreto,
5. Determinación de los principales factores que influyen en la corrosión del refuerzo del hormigón armado bajo condiciones del ambiente urbano donde se encuentra el ISMMM.

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

El hormigón es un material que, cuando se comenzó a utilizar, se pensó que podría dar unas prestaciones mecánicas y de durabilidad similares a las de la piedra. La utilización de acero para crear estructuras conocidas con el nombre de hormigón armado ofreció una gran mejora con respecto a las anteriormente utilizadas. Se comprobó que el acero embebido permanecía protegido al formarse una capa pasivante inducida por el medio fuertemente alcalino de la fase acuosa del hormigón, lo que hacía del hormigón armado un material sin mantenimiento.

La corrosión del acero de refuerzo en el hormigón es una de las causas responsables del deterioro de la infraestructura de concreto que conduce a elevados gastos de rehabilitación y mantenimiento, aparición de riesgos de accidentes o inhabilitación de obras civiles. Los problemas de deterioro por corrosión de estas estructuras de hormigón armado dependen, en gran medida, de las características del medio ambiente a que se encuentran expuestas.

La realidad ha demostrado en cambio que la condición de durabilidad no es suficiente, dado a que el hormigón es vulnerable frente a los agentes externos que habitualmente se encuentran en la biosfera. Así, el acero de las armaduras se puede corroer cuando la alcalinidad del hormigón se neutraliza o cuando iones cloruro penetran hasta ellas.

A pesar de que la corrosión de su armadura es la causa principal del deterioro de las estructuras, el hormigón es el material de construcción más empleado. Resulta pues de gran importancia poder garantizar los periodos de vida útil de las construcciones en las cuales las estructuras de hormigón armado van a permanecer sin daños en un determinado ambiente.

Desde el punto de vista técnico se estudia la vida útil de una estructura considerando dos períodos: iniciación y propagación. Durante el primero, los agresivos penetran hacia la armadura, mientras que en el segundo la corrosión ya se ha iniciado. Este

proyecto es el inicio de una investigación para definir los factores del deterioro por corrosión de concretos reforzados expuestos a condiciones ambientales predominantes en la ciudad de Moa, basándose en la exposición de muestras de concreto con acero y sin acero de refuerzo en ambientes diversos. Las pruebas están centradas principalmente en la caracterización de la porosidad y los procesos de carbonatación y penetración de cloruros en el concreto que, en presencia de humedad, aceleran velocidad de la corrosión, potencial de corrosión y en la determinación del contenido crítico de cloruros de inicio de corrosión, así como la medida de parámetros electroquímicos que permiten evaluar la cinética de corrosión de las estructuras.

En el presente capítulo se establece como **objetivo**:

Realizar un análisis de la bibliografía existente en el estado del arte de la temática abordada.

1.2 Trabajos precedentes

La preocupación generada por el fenómeno de la corrosión, así como los grandes costos por mantenimiento o reemplazo que éste genera, motivó a diversos organismos a nivel mundial, a realizar estudios que los llevaron a determinar las causas, consecuencias, y alternativas de solución para combatir la corrosión en la infraestructura de concreto.

Es importante resaltar que la calidad y la duración de las estructuras de concreto reforzado dependen de la correcta evaluación y de un diagnóstico del problema basados en procedimientos adecuados de inspección. Numerosos organismos a nivel mundial como la Portland Cement Association (PCA); Strategic Highway Research Program (SHRP); American Concrete Institute (ACI); American Society for Testing and Materials (ASTM); The National Asociativo of Corrosión Engineers (NACE International); Reunión Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Constructions et Ouvrages' (RILEM); Comité Electrotechnique Belge (CEB); y The National Materials Advisory Board (NMAB), han venido trabajando consistentemente para documentar el tema. Sin embargo, al no existir un consenso sobre evaluaciones, las inspecciones se realizan de forma diferente causando en algunas ocasiones, inadecuadas reparaciones que generan excesivos costos en la rehabilitación de las estructuras (Troconis, 2000).

Solís (2007) plantea que el fenómeno de la corrosión de metales en contacto con medios acuosos se realiza por mecanismos electroquímicos, donde el metal actúa como un electrodo mixto en el que se producen, de forma acoplada, las reacciones anódica y catódica.

Se ha definido la durabilidad como la propiedad que presenta un material o estructura para resistir la acción del tiempo, ataque químico, abrasión o cualquier otro proceso de deterioro, manteniendo su forma, calidad y condiciones de servicio originales al exponerse a su medio ambiente (Hernández, 2006).

La realidad ha demostrado, en cambio, que la condición de durabilidad no es suficiente, dado a que el hormigón es vulnerable frente a los agentes externos que habitualmente se encuentran en la biosfera. Las condiciones de exposición que acarrear los daños más comunes en el concreto provienen de los líquidos y de los gases que lo penetran, tales como dióxido de carbono, agua, oxígeno, cloruros, sulfatos, etc.; estos elementos o compuestos originan diversas reacciones químicas, cuyo efecto más crítico suele ser la corrosión del acero de refuerzo (Lamond, 1997). Así, el acero de las armaduras se puede corroer cuando la alcalinidad del hormigón se neutraliza o cuando iones carbonatos o cloruro penetran hasta ellas.

Sin embargo, el hormigón armado es el material de construcción más empleado teniendo, a pesar de que la corrosión de su armadura es la causa principal del deterioro de las estructuras.

De la Rive fue el primer científico que, en 1830, atribuyó el fenómeno de la corrosión a un mecanismo electroquímico. Este investigador comprobó diferencias en la velocidad de disolución del cinc en ácido sulfúrico, de las pilas galvánicas, según la pureza de este metal y observó que sólo se desprendía hidrógeno en puntos localizados.

Años más tarde (1834-1840), Faraday dio la relación cuantitativa entre corriente eléctrica y acción química; esto es, que 96493 culombios (1 Faraday) transforman 1 equivalente-gramo de sustancia.

Posteriormente, las primeras ideas electroquímicas de la corrosión quedaron olvidadas durante algún tiempo desarrollándose teorías diversas, hasta que en 1926, el profesor

Evans publicó los resultados de sus investigaciones con gotas salinas depositadas sobre placas horizontales de hierro recién lijado.

Sin embargo, el estudio de la durabilidad del hormigón se remonta a comienzos del siglo XIX, con los estudios de Vicat, en 1837, que relataba la importancia de la mano de obra en la calidad del hormigón, cuando este material era todavía un producto de laboratorio (Sanjuán, 1992).

En 1959, se aplican por primera vez técnicas electroquímicas para medir la corrosión de armaduras embebidas en hormigón aportaron considerablemente los trabajos de (Kaesche, 1959; Baumel y Engelí, 1959). Andrade, con el mismo fin, comenzó el empleo de la técnica de resistencia de polarización en 1970 (Andrade, 1973; Feliú y Andrade, 1989).

1.2.1 Corrosión del concreto

La corrosión en el concreto reforzado se puede definir como la oxidación destructiva de materiales metálicos en un medio específico. La corrosión ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica, la cual consiste en cuatro elementos principales (López et. al. 2006):

- Un ánodo, donde ocurre la oxidación
- Un cátodo, donde ocurre la reducción
- Un conductor metálico, donde la corriente eléctrica es el flujo de electrones
- Un electrolito; en este caso el concreto, donde la corriente eléctrica es generada por el flujo de iones en un medio acuoso

1.2.2 Concreto reforzado

Se define al concreto reforzado como la unión entre concreto y acero; el concreto está compuesto básicamente por el agregado (arena y grava), cemento, agua y en algunos casos, aditivos; el acero que se utiliza depende en gran medida de las especificaciones de la estructura a construir; puede ser acero galvanizado, acero inoxidable o lo que se utiliza comúnmente: acero al carbón o de refuerzo. En la figura 1.1. se muestra el esquema de la celda de corrosión del hormigón armado.

La relación existente entre el concreto y el acero de refuerzo, se basa en que el concreto provee de una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido en la superficie del acero impidiendo que el acero continúe corroyéndose (Trocónis, 2000). El concreto también funciona como una capa física protectora en contra de los agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que puedan despasivar al acero e iniciar su corrosión.

Sin embargo, en un ambiente agresivo, agentes químicos como los cloruros o sulfatos del agua de mar, o el dióxido de carbono de un ambiente urbano, se pueden acumular en la superficie del concreto y lentamente se transporta a través del recubrimiento de concreto hasta llegar al acero (Torres, 2004).

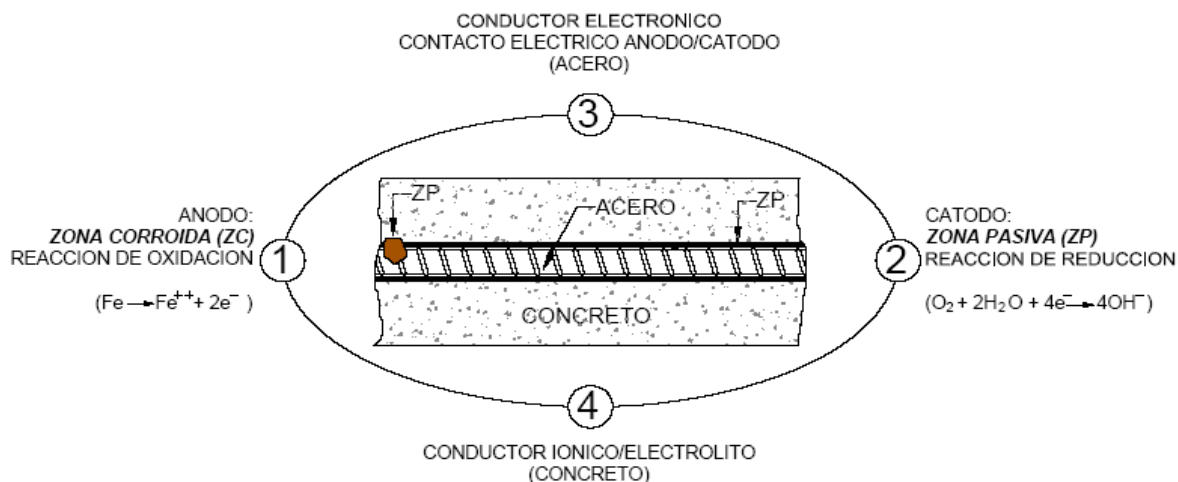


Figura 1.1. Elementos constituyentes de la celda de corrosión

1.2.3 Naturaleza del origen de la corrosión en el concreto

Por lo general, el concreto proporciona a los materiales embebidos en él una protección adecuada contra la corrosión. Sin embargo, es un hecho aceptado que la corrosión del acero es un fenómeno electroquímico y para que esto ocurra debe haber presencia de oxígeno conjuntamente con soluciones acuosas de sales, bases o ácidos.

El acero de refuerzo no se oxida en el concreto debido a la alta alcalinidad de la pasta de cemento ($pH=12.5$) y a su resistividad eléctrica que es relativamente alta

en condiciones de exposición atmosférica. Pero si por alguna razón se reduce la alcalinidad aproximadamente a $\text{pH} = 10$, es muy probable que ocurra la corrosión.

1.2.4 Factores de corrosión del acero de refuerzo

Según Vico et.al. 1995, la corrosión en el hormigón armado es un problema que no solo afecta la integridad estructural de edificios, dado que causa agrietamientos en el hormigón y reducción de espesor en las armaduras, sino que también compromete la seguridad de las personas que lo habitan y de terceros. Así mismo, la evidencia de problemas de corrosión (manchas de óxido, agrietamientos y desprendimiento de material) provoca la desvalorización del inmueble debido a su deterioro estético y funcional. El grado de compromiso estructural o de seguridad alcanzado en estos casos, se establece efectuando un diagnóstico en profundidad de la estructura.

En condiciones normales, el hormigón provee de un ambiente protector al acero de refuerzo ya que su elevada alcalinidad ($\text{pH} > 12.5$) hace que el acero se encuentre en un estado denominado *pasivo*, siendo su velocidad de corrosión despreciable. Sin embargo la presencia de agentes agresivos (cloruros, sulfatos y dióxido de carbono) en la superficie de las armaduras puede causar la pérdida de pasividad del acero y crear condiciones propicias para el inicio de la corrosión de las armaduras.

Para poder caracterizar el tipo de deterioro que sufre una estructura de hormigón armado afectada por la corrosión del acero de refuerzo y establecer la agresividad de este ataque es necesario identificar el factor desencadenante de la corrosión. Esencialmente son dos las causas que pueden dar lugar a la destrucción de la película pasivante del acero e iniciar la corrosión de las armaduras. Estas son la presencia de iones cloruro y la carbonatación.

1.2.4.1 Corrosión iniciada por penetración de iones cloruro

Otro agente que propicia la destrucción de la capa pasivante del acero son los iones cloruros. La existencia de cloruros acelera el proceso de corrosión cualquiera que sea la causa que provocó éste. En concentraciones por encima del 0,2-0,4 % rompen la

capa pasivante de óxido. Los cloruros pueden provenir de un ambiente marino. El ambiente marino contiene diversas sales las cuales se encuentran disueltas en el agua de mar. Más del 55 % de los solutos sólidos del agua de mar son iones cloruro (Cl^-), principalmente cloruro sódico, y en menores cantidades cloruro magnésico, cloruro potásico y cloruro cálcico. También, suelen introducirse al concreto, cloruros contenidos en algunos de sus componentes, como son el cemento y los aditivos acelerantes; o bien por la contaminación involuntaria, y por lo general ignorada, del agua y los agregados.

La velocidad del ataque por cloruros varía según la región geográfica de acuerdo a la salinidad o a la concentración de las sales contenidas en el agua de mar. Ésta depende principalmente de tres factores: la evaporación, la precipitación pluvial y la proximidad a las descargas de los ríos. El rango de salinidad en los diferentes mares en el mundo va aproximadamente de 30-40 g de sal por litro de solución (Lewis, 1980). Según esta fuente, la salinidad en la costa norte de Cuba se encuentra en el rango entre 35,5 g/l y 36,5 g/l.

Por otra parte, los sulfatos han sido identificados como compuestos que generan deterioro directamente al concreto. Las principales fuentes de sulfatos que pueden atacar al concreto son: los suelos que contienen yeso mineral (sulfato cálcico), las aguas que contienen residuos industriales y, principalmente el agua de mar que contiene una concentración de aproximadamente 0,004 de sulfato de sodio.

Cuando el concreto ha endurecido, los iones sulfato que ingresan del ambiente externo reaccionan con los monosulfoaluminatos formando la sal llamada etringita. Esta sal provoca un aumento en volumen del orden del 250 %, lo cual produce grandes tensiones que desencadenan fisuras y desprendimientos superficiales del material (Sanjuán y Castro, 2001).

Hansson, 1995, expone en detalles las características de de la corrosión por penetración de iones cloruro. Según este autor, esta es causada por la presencia en la superficie del acero de una concentración de iones cloruro superior a la *concentración crítica*. Los iones cloruro son los principales causantes de la corrosión de las

armaduras en estructuras expuestas al ambiente marino y en estructuras construidas con hormigones contaminados.

En el primer caso los iones cloruro pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón. En el segundo, se incorporan al hormigón como contaminante de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.).

Según Hansson, 1995, la penetración de cloruros se produce cuando se dan diferencias de concentración entre dos puntos, lo que resulta ser el mecanismo de difusión en estructuras completamente sumergidas o en contacto permanente con agua de mar. En cambio, en zonas aéreas o sometidas a la acción de las mareas o salpicaduras se producen ciclos de humedad y secado, que dan lugar a mecanismos más rápidos de penetración de cloruros, ya que además de la difusión aparecen fenómenos de absorción capilar que conducen a difusividades más elevadas.

La porosidad del concreto es sin duda un factor crucial en todos estos fenómenos, ya que la penetración será más rápida cuando la porosidad del recubrimiento resulte ser mayor. Así, a bajas relaciones a/c y relativamente altos contenidos en cemento, dan una cierta garantía de lentas velocidades de penetración de los cloruros. El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es otro de los parámetros relevantes del proceso (Borges, 2001).

De los escasos estudios realizados se origina una gran dispersión, incluso ante condiciones aparentemente idénticas (Castro, 2001). Sin embargo, de acuerdo con Francois et. al. (1994) se han logrado identificar varios factores que pueden afectar a la no existencia de un valor único de umbral de cloruros para producir la despasivación de la armadura. Entre ellos, se pueden mencionar:

- Tipo y contenido en cemento
- Estado superficial del acero
- Porosidad del concreto
- Temperatura

- Potencial electroquímico que presenta la estructura
- Velocidad de penetración de Cl^- (adicionados, penetración)
- Características y espesor de la capa pasivante
- Condiciones meteorológicas predominante en el área de entorno

Algunos de estos factores son difícilmente controlables en forma aislada, lo que finalmente conduce a que el estudio deba llevarse a través de tratamientos estadísticos que permitan definir los rangos de variación, según alguno de los factores descritos.

La resistencia a los cloruros está normalmente considerada en términos de la cantidad de iones cloruro que entra de la superficie del concreto. Ocasionalmente, sin embargo, el cloruro puede ser introducido en el concreto al tiempo del mezclado por fuentes comunes a los agregados de origen marino pobremente limpiados. De modo que resulta de interés la habilidad que posee el concreto para limitar la acción de los cloruros y su habilidad para evitar la penetración de los cloruros, sean estos provenientes del agua de mar o de la niebla marina (salitre).

Las estructuras cercanas o dentro del mar las que presentan la corrosión del acero de refuerzo, los casos más conocidos de corrosión se han dado en pilares de puertos y edificaciones aledañas a la costa marítima, el Perú posee una gran extensión de su litoral y el uso del concreto en edificaciones ya sea difundido, por lo cual también el riesgo de presentarse problemas de deterioro por acción del ambiente marítimo, en el siguiente punto se describe las características de nuestro litoral.

1.2.4.2 Corrosión iniciada por carbonatación

Se conoce como carbonatación a la pérdida de alcalinidad del concreto. Entre los agentes de medio ambiente que inducen la corrosión del acero de refuerzo, el dióxido de carbono (CO_2) es el compuesto que con mayor frecuencia entra en contacto con las construcciones, ya que es un componente natural de la atmósfera. Este es un fenómeno que actualmente afecta a muchas estructuras y ocurre cuando el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera reacciona con la humedad dentro de los poros del

concreto y convierte al hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio CaCO_3 que tiene un pH menos alcalino. El hidróxido de calcio y los iones de sodio (Na) y potasio (K) por su alta alcalinidad, forman en el acero de refuerzo embebido en el concreto una capa pasiva de hidróxido de hierro Fe(OH)_2 , que lo cubre y protege de la corrosión. La permanencia de esta capa depende de que el concreto conserve dicha alcalinidad, la que al descender ante la presencia de dióxido de carbono en el concreto, el acero pierde su capa pasiva, se considera un pH menor a 11 para que se inicie este efecto.

La concentración promedio de CO_2 en la atmósfera es de aproximadamente un 0,03 %, sin embargo, esta pequeña concentración reacciona lentamente con los hidróxidos de la pasta de cemento que se encuentran diluidos en la solución del poro del concreto, primero con los hidróxidos de sodio y potasio; y posteriormente, los carbonatos que estas reacciones han generado reaccionan con el hidróxido de calcio, dando lugar como producto de esta reacción a la formación de carbonato de calcio que precipita en la superficie del poro. Se dice entonces que esa porción del concreto se ha carbonatado.

Los factores que afectan durante la carbonatación son: el contenido de humedad; el contenido de CO_2 y SO_2 en el ambiente atmosférico; y la permeabilidad del concreto. El contenido de humedad relativa ambiental es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50 - 70% aproximadamente; a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas, los poros se bloquean y evitan el ingreso del dióxido de carbono (Rick, 2000).

El contenido de CO_2 en la atmósfera, depende en gran medida de la actividad económico-industrial que se desarrolle en el lugar ya que existen grandes diferencias en una zona urbana a una zona rural, siendo mayores en la primera; aunque para que se inicie el fenómeno de carbonatación del concreto, se requiere una pequeña cantidad de concentración de CO_2 , que normalmente se encuentra en la atmósfera, que está en el rango de 0.03% (ASTM C 150.- Standard Specification for Portland.- American Society for Testing and Materials, 1999).

La permeabilidad del concreto es otro factor que se debe de controlar, ya que un concreto muy permeable se carbonatará rápidamente, por tener poca resistencia a la penetración de los fluidos. Para obtener un concreto poco permeable son necesarios agregados de buena calidad, una pasta de cemento con relación agua/cemento baja, y la inclusión de puzolanas (ASTM C 1017 / C 1017M.- Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete.- American Society for Testing and Materials, 1998).

Como se indicó anteriormente, ambos problemas tienen una relación directa con los parámetros metereoquímicos del ambiente al cual se encuentran expuestas las estructuras.

En Moa existe una diversidad de climas y microclimas que permitirán, con esta investigación definir acertadamente los niveles que causan la corrosión en la estructura, comenzando por las estructuras del ISMMM. Esto en conjunto con los resultados de las evaluaciones físico-químicas y electroquímicas de las diferentes muestras de concreto expuestos, permitirán definir diseños adecuados para obras de concreto durables, así como reparar las ya existentes y que presentan este problema.

1.2.4.3 Otros factores que influyen en la corrosión de las armaduras

La humedad del hormigón juega un papel importante en la corrosión de las armaduras ya que favorece la penetración y disolución de los agentes agresivos y proporciona el vehículo para que la corrosión avance. Por otro lado, el recubrimiento de hormigón sobre la armadura provee una barrera física contra la penetración de agentes agresivos desde el medio ambiente exterior. Su eficiencia depende fundamentalmente de dos factores:

- El espesor del recubrimiento (ER): La Norma ASTM C 1017/C 1017M recomienda que para ambientes marinos, se debe emplear un espesor de recubrimiento mínimo de 25 mm y para locaciones costeras a distancias de hasta 2,5 km, el espesor mínimo de recubrimiento es de 15 mm.
- El diseño de mezcla: Bajas relaciones agua-cemento y altos contenidos de cemento garantizan un hormigón de buena calidad.

1.2.5 Diseño de mezclas

El diseño de la mezcla es el proceso de seleccionar los ingredientes adecuados para el concreto y determinar las cantidades relativas, con objeto de producir una mezcla tan durable y económica como sea posible. Los elementos que intervienen en la elaboración de una mezcla son:

- Cemento
- Agua
- Arena
- Grava
- Aditivo (en algunos casos)

1.2.5.1 Cemento

El cemento hidráulico se define como un material inorgánico finamente pulverizado, que al agregarle agua tiene la propiedad de fraguar y endurecer en virtud de reacciones químicas durante la hidratación, y que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad. (Trocónis, 2005). La producción internacional contempla la fabricación de seis clases de cementos hidráulicos con cuatro características y cinco clases de resistencias, que se rige por la ASTM C 150.

Tabla 1.1. Clasificación del cemento por sus adiciones

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
CPO	Cemento Portland ordinario
CPP	Cemento Portland puzolánico
CPEG	Cemento Portland con escoria granulada de alto horno
CPC	Cemento Portland compuesto
CPS	Cemento Portland con humo de sílice
CEG	Cemento con escoria granulada de alto horno

Tabla 1.2. Clasificación por características especiales

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
RS	Resistente a los sulfatos
BRA	Baja reactividad álcali - agregado
BCH	Bajo calor de hidratación
B	Blanco

Tabla 1.3. Clasificación por su clase resistente

Resistencia N/mm ²	Mínimo a 3 días	Mínimo a 28 días	Máximo a 28 días
20	-	20	40
30	-	30	50
30 R *	20	30	50
40	-	40	-
40 R *	30	40	-

* La letra R indica que un cemento es de resistencia inicial alta

1.2.6 Agregados pétreos: arena y grava

En el hormigón los áridos, una mezcla íntima de grava y arena de diversos tamaños, se encuentran unidos por la pasta de cemento. Una adecuada granulometría de los áridos resulta esencial para conseguir un hormigón de adecuada compacidad. Parámetros tales como el coeficiente de forma y la distribución del tamaño de partículas influyen directamente en la resistencia, compacidad y docilidad del hormigón, y por tanto, en su durabilidad.

Las características y propiedades de los agregados son factores que influyen considerablemente al momento de diseñar una mezcla de concreto, ya que ocupan aproximadamente del 60 al 75 % del volumen del concreto; y del 70 al 85% de su peso, determinando el proporcionamiento de la mezcla e influyendo de manera notable en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

En el aspecto físico, los agregados influyen en la durabilidad del concreto en la medida que afectan sus propiedades y su capacidad para resistir los efectos deteriorantes de los medios de contacto, las condiciones ambientales, y las de servicio. En el aspecto químico es importante su composición petrográfica y mineralógica debido a que hay ciertas rocas y minerales que pueden reaccionar adversamente con los álcalis en el concreto (Mena, 2005).

Según se conoce, los áridos para la fabricación de las estructuras de hormigón de las obras civiles de lo que es hoy la ciudad industrial de Moa, provienen de las canteras del Río Nibujón, Río Cayo Guam y Río Sagua, fundamentalmente. Queda por demostrar la veracidad de esta información para determinar, con precisión, la

procedencia de estos áridos y estudiar la posible utilización o no de arena de mar y la influencia de cloruros presentes en la misma en la corrosión del refuerzo.

1.2.6.1 Reacción álcali-agregado

El carácter reactivo con los álcalis en los agregados es una condición contingente cuya probabilidad de presentarse depende mucho de su ubicación geográfica. De acuerdo con ello, en las regiones con alta probabilidad de ocurrencia debe ser un requisito indispensable verificar esta característica de los agregados.

El proceso para verificar la reactividad de los agregados con los álcalis; en primer término, debe efectuarse el examen petrográfico como lo indica ASTM C 295, con objeto de discernir si los agregados son inocuos o contienen rocas y minerales identificados como potencialmente reactivos con los álcalis.

1.2.7 Agua

La calidad del agua que se utiliza para elaborar la mezcla representa un aspecto importante, ya que influye de manera significativa en el comportamiento y propiedades del concreto; el agua que se utiliza debe estar libre de impurezas, como son: grasas, aceites, azucares, ácidos y materia vegetal, ya que estos impiden o retardan la hidratación.

Las normas establecen los requisitos de cantidades máximas de impurezas que son tolerables para el agua que se utiliza en la elaboración de mezclas de concreto.

La hidratación completa del cemento portland necesita alrededor del 40% de su peso de agua. Un 23% del agua se combina químicamente para dar productos de hidratación y el resto se absorbe en la superficie del gel (Sanjuán M, 1992).

1.2.8 Aditivo

Los aditivos son sustancias inorgánicas u orgánicas que se añaden en estado sólido o líquido a los componentes habituales de la mezcla de hormigón, en proporción inferior al 5 % en peso de cemento. La finalidad de estos compuestos es la de modificar una o varias de las propiedades del hormigón por vía física, química o quimicofsica.

Junto con el efecto principal esperado, existen efectos secundarios que se deben controlar igualmente, para lo cual es preciso conocer la sensibilidad del efecto producido frente a las variaciones de la cantidad de aditivo.

Los aditivos, al influir sobre determinadas propiedades del hormigón pueden modificar sustancialmente su porosidad y su fase acuosa, afectando, por lo tanto, significativamente a su durabilidad (Paillére et al, 1992).

Los aditivos, según los estándares de la ASTM C 494 y la ASTM C 1017, se mezclan con el concreto para cambiar o mejorar sus propiedades, como pueden ser:

- Incrementar la trabajabilidad sin aumentar el contenido de agua o disminuir el contenido de agua a la misma trabajabilidad
- Retardar o acelerar el tiempo de fraguado inicial
- Modifican la rapidez o la capacidad de sangrado
- Reducen la segregación
- Mejoran la bombeabilidad
- Reducen la proporción de la pérdida de revenimiento
- Modifican las propiedades del concreto endurecido, para:
 - ~ Retardar o reducir la evolución de calor
 - ~ Acelerar la rapidez de desarrollo de la resistencia
 - ~ Disminuir la permeabilidad del concreto
 - ~ Incrementar la adherencia entre concreto viejo y nuevo.

En la tabla 1.4 se recoge una clasificación de los aditivos más empleados en el hormigón.

Aditivo	Compuestos Químicos	Efectos Primarios
Plastificantes	Lignosulfonatos ácidos Hidrocarboxílicos carbohidratos	Manteniendo la misma trabajabilidad permiten reducir el contenido de agua: un 6,5% (Europa) un 10% (Japón)
Superplastificantes	Compuestos de Melamina y	Manteniendo la misma

	fomaldehído compuestos de Naftaleno sulfonado , Lignosulfonatos modificados copolímeros ,acrílicos	trabajabilidad permiten reducir el contenido de agua: un 12% (Europa) un 16% (Japón)
Retardador de fraguado	Azúcares, Ácidos, hidrocarboxílicos, Lignosulfonatos	Modifican la velocidad de fraguado. Su acción depende de la cantidad de aditivo, de).tipo de cemento y de la temperatura.
Aceleradores de fraguado	Nitrito de cálcico, Nitratos, Tiosulfatos	
Aceleradores de resistencias	Trietanolamina	
Agentes aireantes	Ácidos y sales de resma de madera sales orgánicas hidrocarburos sulfonados	Forman burbujas de aire por reacciones de adsorción en la interfase aire-agua.

1.2.9 Acero

La Norma ACI-318-2005 especifica los requisitos para la fabricación del concreto estructural y dentro de estos, establece que el acero para barras de refuerzo de hormigón armado debe ser un acero eutectoide con un contenido medio de carbono del 0.8%.

El acero empleado como armadura en el hormigón cumple la función de absorber las tensiones a tracción de la estructura. Según se haya sometido a la armadura a un tratamiento de tensión o no, el hormigón será pretensado, postensado o simplemente armado. Las armaduras activas de acero para uso en hormigón pretensado se homologan según el marco reglamentario establecido específicamente por la norma ACI-318-2005.

En esta se hace referencia expresa a los diferentes tipos de alambres, barras, torzales, cordones y cables para el hormigón. El acero empleado en las armaduras de hormigón es el llamado genéricamente de “construcción” y proviene de la fundición de chatarra. Su contenido medio en carbono se sitúa entre el 0.55 y el 0.8 %, como se muestra en la Tabla 1.5. Las mallas electrosoldadas están compuestas por alambres trefilados lisos o corrugados.

Tabla 1.5

Elementos	(%) Mínimo	(%) Máximo
Carbono	0.58	0.88
Manganeso	0.50	0.90
Silicio	0.15	0.40
Fósforo	-	0.04
Azufre	-	0.04

1.3 Agentes agresivos del hormigón

Particularizando para el caso de la durabilidad del hormigón en masa hay que recordar que puede experimentar alteraciones como consecuencia de la acción de agentes agresivos internos o externos, los cuales se caracterizan por producir efectos nocivos que se manifiestan en forma de erosiones, fisuras y expansiones, entre otras.

La actuación de los agentes agresivos externos depende del entorno en donde se encuentran y de la velocidad de penetración, según sea su mecanismo de transporte y las condiciones en las que se realice. Estos agentes agresivos se pueden encontrar en estado gaseoso, líquido o formando parte de suelos adyacentes al hormigón.

El aire contiene entre un 0,03% y un 0,04% de CO₂, pudiendo ser aún mayor en ambientes urbanos e industriales. Los gases procedentes de combustiones y procesos industriales pueden contener vapores ácidos (H₂SO₄, HCl, HNO₃, SO₂, CO₂, SH₂) que con la humedad de la atmósfera o del hormigón forman, cuando se alcanza el punto de rocío, disoluciones más o menos ácidas que neutralizan la alcalinidad del hormigón.

Los suelos son perjudiciales sólo si contienen compuestos que pueden formar disoluciones agresivas. En general en relación al hormigón se pueden diferenciar tres grupos importantes de suelos: suelos con sulfatos solubles, suelos pantanosos (pueden tener CO₂, K₂SO₄, SO₄, sustancias orgánicas, etc...) y escombreras y basureros (con elevado contenido de acidez y sulfuros)

Las principales disoluciones, en cuanto a su agresividad para el hormigón, son: aguas (puras, carbonatadas, marinas, residuales, industriales, etc...) disoluciones ácidas, básicas o sales, alcoholes y azúcares (Sanjuán, 1992).

1.4. Conclusiones del capítulo I

- El desarrollo del marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el estudio de procesos de corrosión en el hormigón armado con el objetivo de disminuir las fallas en las estructuras.
- El estudio bibliográfico consultado puso de manifiesto que sobre el tema de la corrosión en el hormigón armado se han llevado a cabo algunos estudios desde el punto de vista teórico, observándose la necesidad de realizar un trabajo profundo de investigación en la rama de la Ingeniería de los Materiales que conlleve a la realización de análisis y una evaluación integral de estas estructuras para las diferentes regiones en particular.
- Hasta el momento, en la bibliografía consultada no se han reportado trabajos relacionados con el estudio de los factores que determinan el deterioro por corrosión del refuerzo del hormigón armado en el ambiente urbano de la región de Moa, particularizado al ISMMM.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La realización de ensayos y experimentos en la Ingeniería de los Materiales es una potente herramienta para el tratamiento, verificación de hipótesis y la solución a los problemas de caracterización de fenómenos destructivos en elementos y equipamientos industriales.

En la caracterización de materiales no es posible realizar investigaciones con resultados fiables cuando no se cuenta con el equipamiento requerido, información que propicien las especificaciones de las normas así como la composición, estructura y propiedades de los materiales analizados.

El estudio y previsión de fallas en estructuras de hormigón constituye uno de los principales focos de atención para los investigadores por las incalculables pérdidas económicas y efectos sociales que implican para la humanidad. Es necesario, por tanto, hacer énfasis en el conocimiento de las regularidades que definen el comportamiento de hormigón armado en las condiciones analizadas para emitir resultados con criterios científicos que conduzcan a evaluaciones técnico-económicas juiciosas.

En este capítulo se plantea como **objetivo**:

1. Fundamentar las propiedades a investigar y explicar los métodos, procedimientos y condiciones experimentales para la solución del problema.

La metodología experimental de la investigación utilizada se resume de la manera siguiente:

1. Toma de muestras de hormigón y refuerzos
2. Análisis químico del hormigón
3. Análisis químico de los materiales del refuerzo
4. Medición del recubrimiento del concreto
5. Determinación de la profundidad de carbonatación
6. Medición de los potenciales electroquímicos del acero de refuerzo

7. Determinación de la concentración de cloruros en el concreto
8. Determinación de la concentración de sulfatos en el concreto
9. Determinación de la permeabilidad del hormigón
10. Determinación del espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero

2.2. Toma de muestras de hormigón y refuerzos

Se tomaron muestras de hormigón de zonas diferentes con estructuras donde las afectaciones del concreto por la corrosión del refuerzo eran evidentes. La procedencia de las muestras se expone en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Zonas de toma de las muestras de hormigón

N/O	Área de procedencia	Zona de ubicación
1	Residencia Estudiantil	Pasillo de enfermería
		Techo de la escalinata de la cafetería
		Pared trasera del edificio 4
2	Pasillo Central	Techo de entrada principal del ISMMM
		Techo del pasillo central
3	Cocina Comedor	Área interior del techo de la cocina
		Área exterior del techo de cocina y almacenes
		Área exterior del techo del pasillo del comedor obrero
4	Docente No. 1	Techo de escalera del docente No. 1
		Pasillo de la Plaza 2 de Diciembre
5	Docente No. 2	Pasillo de la planta baja, frente al Taller de Maquinado
6	Docente No. 3	Pasillos delantero y trasero del Lab de C. de los Mater.

En los casos posibles, se tomaron, además, muestras de refuerzo de acero de las zonas afectadas (sin comprometer la resistencia de la estructura) para investigar el comportamiento de la estructura metalográfica de las capas oxidadas y la posible influencia de su composición química en la corrosión. La procedencia de las muestras se expone en la tabla 2.2

Tabla 2.2. Zonas de toma de las muestras de acero de refuerzo

N/O	Zona de ubicación	Diámetro de la barra (mm)
1	Área exterior del techo del pasillo del comedor obrero	25
2	Área exterior del techo de cocina y almacenes	12,5
3	Pasillo de enfermería	12,5
4	Pasillos delantero y trasero del Lab de C. de los Mater.	25

2.3. Análisis químico del hormigón

Para precisar la procedencia de los áridos (arenas de río o de mar) y determinar su posible influencia en la corrosión del refuerzo, se realizó el análisis químico a dos muestras de hormigón según la norma ASTM C 295-2008. La caracterización química de las muestras de concreto se realizó en el Laboratorio de Metalurgia y Materiales del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio”, de Caracas, Venezuela mediante análisis de difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro Philips, utilizando radiación CuK α .

La composición química de las fases minerales presentes en los áridos componentes del hormigón, se determinó utilizando una microsonda electrónica tipo Cameca SX 100. El quimismo general de las muestras se obtuvo por análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), previo al cual las muestras fueron trituradas y secadas en un horno a 250 C. Se empleó el software Analyze para el tratamiento computarizado de los resultados del análisis de difracción.

2.4. Análisis químico de los materiales del refuerzo

Las muestras de acero del refuerzo se caracterizaron mediante el método de Espectrofotometría por Absorción Atómica (EAA), con un equipo de absorción atómica PERKIN modelo ANALYST 700 disponible en el Laboratorio de Metalurgia y Materiales del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio”, de Caracas, Venezuela.

2.5. Medición del recubrimiento de concreto

Se realizaron mediciones “in situ” del espesor del concreto que envuelve al acero de refuerzo para comprobar el cumplimiento de las normas ACI-222-2001 y ACI-318-2005 que especifican los espesores mínimo de concreto para las diferentes aplicaciones. De esta manera, se puede analizar la posible influencia del espesor del recubrimiento en protección, tanto física como química del acero de refuerzo. El espesor del recubrimiento del acero de refuerzo es un factor importante en el control del transporte de los agentes agresivos; cuanto más grueso e impermeable es el recubrimiento tanto

más largo es el intervalo antes de que los gases y líquidos alcancen la posición del acero.

2.6. Determinación de la profundidad de carbonatación en el concreto

Se utilizó el método de colorimetría amparado en la norma UNE 112-011-94 y la metodología expuesta por RILEM CPC-18-98, para establecer la profundidad del frente de carbonatación. Este consiste en el tratamiento de la superficie de concreto acabado de romper, con una solución al 1 % de fenolftaleína en alcohol etílico.

La coloración del material es un indicador del valor de su potencial de hidrógeno (pH), desde el color púrpura para los valores originales de la alcalinidad del concreto ($> 9,5$) hasta transparencia para valores de alcalinidad bajos ($< 8,0$).

2.7. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el (ohm-mm u ohm-m).

La resistividad eléctrica del hormigón depende en gran medida del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

Debido a que la conductividad eléctrica es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, el método supone que la resistencia eléctrica es una medida de la impermeabilidad del concreto. Este parámetro está en función de variables como: tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, y la porosidad de las estructuras, entre otras. En la tabla 2.3 se muestran los criterios de evaluación de la resistividad eléctrica del material analizado y la ecuación (3) el procedimiento para el cculo.

Tabla 2.3. Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica.

Resistividad del concreto (ρ) k Ω .mm	Pronóstico de Corrosión
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho < 10$	Alto riesgo

[illegible]

Dónde:

A = área transversal del espécimen (mm²).

L = longitud del espécimen (mm).

Re = resistencia eléctrica de la muestra (omh)

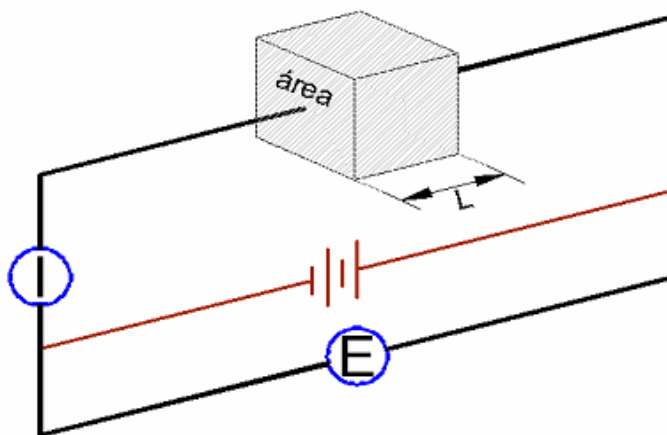


Figura 2.1. Esquema del circuito para el ensayo de resistividad eléctrica del concreto

La resistencia eléctrica se midió en un área transversal de 30 x 30 mm² y 100 mm de longitud utilizando un equipo Nilsson modelo 400. Las resistividades se calcularon bajo los procedimientos establecidos en la norma ASTM G-57.

2.8. Determinación de la concentración de cloruros en el concreto

Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Civil, División Hormigón Armado, del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio”, de Caracas, Venezuela, de acuerdo con la norma ASTM C-1218, 1999. Para ello, se disolvió una muestra de polvo de concreto en un medio acuoso. Se determinó la concentración por el método del ión selectivo de cloruros con la utilización de un electrodo de referencia de plata/cloruro de plata.

2.9. Determinación de la concentración de sulfatos en el concreto

Se realizó en el Laboratorio de Ingeniería Civil, División Hormigón Armado, del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio”, de Caracas,

Venezuela de acuerdo con la norma ASTM C-114, 2007. Para ello, se disolvió una muestra de polvo de concreto en ácido clorhídrico, seguido de una reacción con cloruro de bario. Como resultado se obtiene la cantidad de sulfatos como el residuo producto de la desintegración del reactivo después de la calcinación.

2.10. Determinación de la permeabilidad del hormigón

Para medir la permeabilidad del concreto, se realizó el ensayo de permeabilidad en un permeabilímetro del tipo TORRENS según las normas UNE 83-309-90 y UNE 83-306-85 en el Laboratorio de Ingeniería Civil, División Hormigón Armado, del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio”, de Caracas, Venezuela. Este método se basa en crear vacío dentro de una celda colocada sobre la superficie a investigar y posteriormente medir la velocidad con que la presión retorna al valor atmosférico.

Aspectos característicos del método son: una celda con doble cámara y un regulador que equilibra la presión en la cámara central (de medición) y en la cámara exterior (anillo de guarda). Esto asegura un flujo unidireccional de aire hacia la cámara central, eliminando todo flujo no deseado transversal. Los datos de la medición son procesados por un microprocesador que indica el valor del coeficiente de permeabilidad kt al finalizar el ensayo, que dura de 2 a 12 minutos. La figura 2.2 muestra la instalación para el ensayo de permeabilidad y la figura 2.3 la ventana del microprocesador con la información de salida.

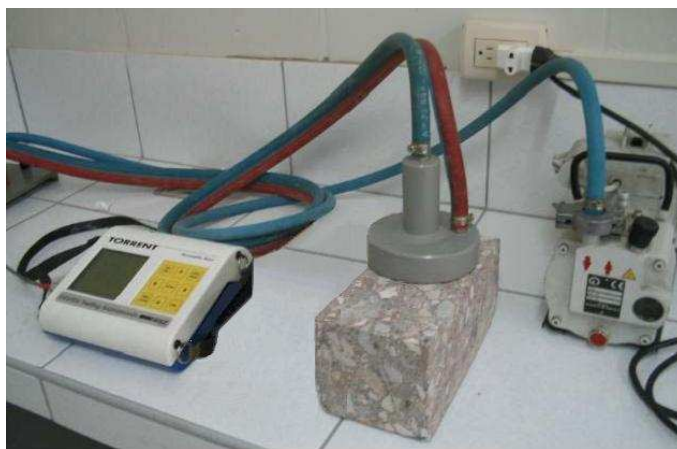


Figura 2.2. Instalación para el ensayo de permeabilidad



Figura 2.3. Información de salida del microprocesador en el ensayo Torrens

2.11. Determinación del espesor de la capa carbonatada en el concreto

La profundidad del frente carbonatado en el concreto fue medida en superficies pulidas de las muestras. El revelado de la capa carbonatada se efectuó mediante la pulverización de una solución indicadora de pH sobre la superficie del hormigón recientemente expuesta. El indicador de pH empleado fue una solución de fenolftaleína 1% p/v en alcohol etílico. Esta solución se caracteriza por colorear ligeramente el hormigón que se encuentra carbonatado (pH menor que 9.5, resultante de la acidificación producida por el CO₂ ambiental) y dejar sin colorear la parte no afectada por la carbonatación.

2.12. Determinación del espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero

La preparación de las muestras metalográficas y la caracterización de las capas de óxido se realizó según los procedimientos establecidos en la norma ASTM E3-95 en el Laboratorio de Metalurgia y Materiales del Instituto Universitario de Tecnologías “Dr. Federico Rivero Palacio” (IUT), de Caracas, Venezuela. Se realizaron operaciones de preparación en el taller de máquinas herramientas perteneciente al Departamento de Mecánica del IUT RC “Dr. Federico Rivero Palacio” y actividades de pulido en el laboratorio de Metalurgia y Materiales del Departamento de Tecnología de los Materiales del IUT RC “Dr. Federico Rivero Palacio”, para lo que se siguió la secuencia siguiente:

- **Fresado convencional:** las secciones de corte se maquinaron en una fresadora universal marca *ELGOBIAR*, modelo *F2UE*, con el empleo de líquido refrigerante,

- **Pulido:** se utilizó una pulidora metalográfica con papeles abrasivos de diferente granulometría (350; 500; 600 y 800), paños de fieltro y solución de pasta abrasiva de óxido de cromo con granulometría de 3 μm . El pulido final se realizó con pasta de diamante de 1 μm . Para garantizar un correcto pulido de la superficie sin redondeo en los bordes, las muestras se montaron sobre resina epoxídica.
- **Limpieza:** las muestras se sumergieron en acetona para eliminar restos no deseados. Finalmente se introdujeron en un recipiente con etanol absoluto, lo que elimina impurezas y humedad.
- **Secado:** se secaron con aire caliente sin humedad y a presión para eliminar cualquier vestigio de humedad.

El ataque químico se realizó por inmersión de las muestras en Nital al 3 % (100 mL Alcohol Etílico 96 % + 3 mL Ácido Nítrico), según lo establecido por la norma ASTM E 407-93.

La caracterización metalográfica de las muestras oxidadas se realizó en un Microscopio electrónico de Barrido Phillips XL 30 en el Laboratorio de Metalurgia y Materiales del Departamento de Tecnología de los Materiales del IUT RC "Dr. Federico Rivero Palacio".

2.13 Conclusiones del Capítulo II

- Se han fundamentado las propiedades a investigar a partir de la necesidad de la descripción y caracterización de las principales factores que pudieran influir en el deterioro por corrosión del acero de refuerzo del hormigón armado estudiado.
- Se aplican métodos y técnicas experimentales de investigación estructurados metodológicamente con un enfoque dialéctico, sistémico y controlado que posibilitan la ejecución ordenada del proceso investigativo.
- Los métodos de investigación utilizados se complementan con el empleo de una actualizada base experimental, tecnologías y equipamiento novedosos que garantizan precisión y confiabilidad a los resultados.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Introducción

Para establecer los criterios y resultados, que fundamentan el cumplimiento de los objetivos generales y específicos, así como la veracidad de la hipótesis científica planteada, se hace necesario analizar y discutir los resultados obtenidos de la experimentación.

El **objetivo** del presente capítulo es presentar, discutir y valorar los resultados obtenidos para explicar los fundamentos científicos e interpretar las regularidades observadas que conducen a la solución del problema identificado.

3.2. Análisis químico del hormigón

Los reportes de análisis químico de las muestras de hormigón aparecen en las figuras 3.1. y 3.2. Del análisis de las mismas se deduce que el hormigón analizado está constituido por compuestos donde predominan los silicatos de Fe, Al, Ca y Mg.

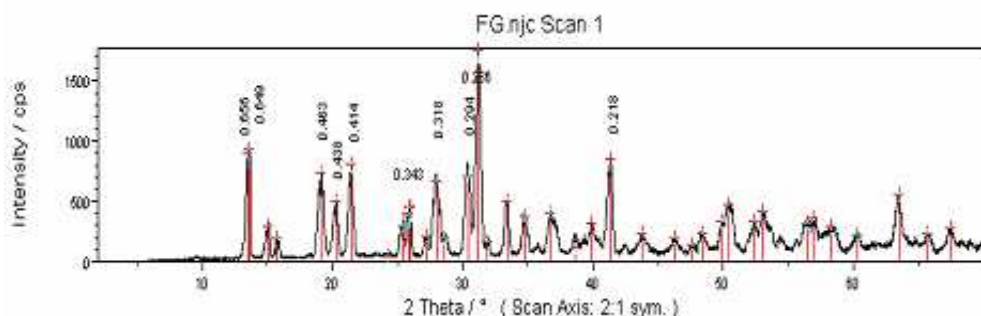


Figura 3.1. Difractograma de una de las muestras de hormigón. El pico principal tiene un valor de $d = 0,286$ nm, correspondiente al mineral cuarzo. Radiación CuK α .

Según estudios petrográficos de rocas de la zona nororiental de Cuba (García, 1976; Marrero, 1983; Ríos y Cobiella, 1983; Pinell, 1987; García, 1990 y Batista, 2009), en la región existe un predominio de rocas ultramáficas como harzburgitas, dunitas plagioclásicas y la serpentinita y máficas como la troctolita con piroxeno, gabros pegmatitas, troctolita, gabro normal y gabros olivínicos.

En el difractograma de una de las muestras de hormigón de la figura 3.1, el pico principal se corresponde al mineral cuarzo, componente principal de las arcillas del hormigón; mientras que en el reporte de las fases de la figura 3.2, la fase principal es

el olivino, un neosilicato de Fe y Mg, componente, conjuntamente con la hiperstena, de la dunita.

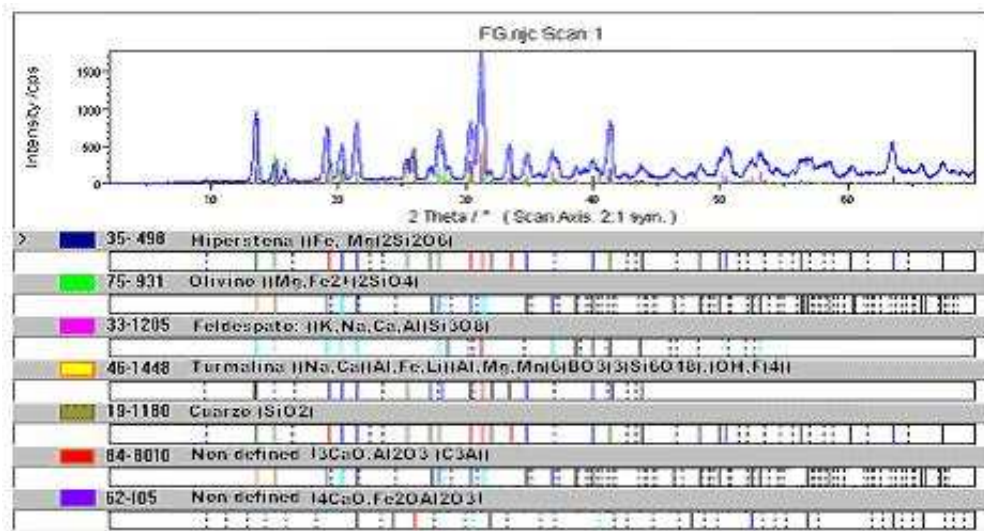


Figura 3.2. Resultados del procesamiento automático de los datos reducidos por DRX con el empleo del software Analyze. La fase principal es el olivino.

La presencia de minerales como la dunita (hiperstena + olivino), feldespato, turmalina y cuarzo reportados en el DRX, confirma la utilización de rocas del tipo gabros pegmatitas procedentes, presumiblemente, de las canteras Cayo Guam, Nibujn y Sagua de Tánamo en el sentido de la correspondencia de estos componentes con los de algunos de los minerales graníticos reportados por García (1976), Marrero (1983), Ríos y Cobiella (1983), Pinell (1987), García (1990) y Batista (2009). De esta manera, se confirma la utilización de áridos (grava y arena de río lavada) en la fabricación de los elementos, a la vez que se desecha la posibilidad de utilización de arena de mar en la fabricación de, al menos, las estructuras analizadas y por tanto, la influencia de los iones cloruro provenientes del agua de mar en la corrosión del acero de refuerzo del hormigón analizado el presente trabajo.

El DRX reporta, además, la presencia de dos componentes no identificados que en este caso se corresponden con el aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) y el ferroluminato tetra cálcico $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_4FA), componentes del cemento portland (ASTM C 150).

3.3. Análisis químico de los materiales del refuerzo

La tabla 3.1 muestra los resultados de los análisis químicos de las muestras de refuerzo.

Tabla 3.1. Composición química (% peso) del acero de refuerzo de las muestras analizadas

N/O	C	Mn	P	Si	S	Otros	Fe
1	0,76	0,87	0,033	0,37	0,035	< 0,002 Cu, Ti, Cr y V	Bal.
2	0,43	0,94	0,036	0,42	0,033		Bal.
3	0,26	0,77	0,037	0,39	0,038		Bal.
4	0,78	0,78	0,033	0,45	0,031		Bal.

Como se observa, el hormigón perteneciente a las diferentes áreas de análisis posee refuerzos de barras de acero corrugadas que difieren en su composición y, por ende, pertenecen a materiales diferentes. Las barras de acero de 12,5 mm de diámetro, pertenecientes a las muestras 2 y 3 poseen contenidos de carbono propios de aceros de medio (0,43 %) y bajo (0,26 %) contenido de carbono; mientras que las barras de 25 mm de diámetro, pertenecientes a las muestras 1 y 4, poseen contenidos de carbono (0,76 % y 0,78 % respectivamente) propios de aceros eutectoides.

Este contraste en la composición pudiera originar una diferencia en la resistencia a la corrosión del refuerzo, toda vez que el contenido de carbono es un elemento influyente en la resistencia a la corrosión del acero. A juzgar por lo planteado por las normas ACI-222-2001 y ACI-318-2005, en el caso del hormigón reforzado con la muestra N° 3, se incumple con lo estipulado por las mismas, toda vez que el contenido de carbono es inferior al establecido.

3.4. Medición del recubrimiento del concreto

Las comprobaciones del espesor del recubrimiento del concreto arrojaron los valores reportados en la tabla 3.2. Como se observa, existen violaciones de lo estipulado por la norma ASTM C 1017/C 1017M en el sentido de que, considerando las condiciones atmosféricas y el clima costero de la ciudad e Moa, en la mayoría de los casos, el espesor del recubrimiento se encuentra por debajo o en los límites de lo establecido.

Tabla 3.2. Espesores de los recubrimientos del concreto de las diferentes áreas de análisis

N/O	Zona de ubicación	Espesor mínimo (mm)
1	Pasillo de enfermería	12
2	Techo de la escalinata de la cafetería	13,5
3	Pared trasera del edificio 4	7
4	Techo de entrada principal del ISMMM	16
5	Techo del pasillo central	15
6	Área interior del techo de la cocina	14,3
7	Área exterior del techo de cocina y almacenes	16
8	Área exterior del techo del pasillo del comedor obrero	15,3
9	Techo de escalera del docente No. 1	16
10	Pasillo de la Plaza 2 de Diciembre	16
11	Pasillo de la planta baja, frente al Taller de Maquinado	17
12	Pasillos delantero y trasero del Lab de C. de los Mater.	14

En la figura 3.3 se muestran zonas donde el refuerzo se encuentra casi en la superficie, con un mínimo de capa de concreto de apenas 5 mm de espesor. En los Anexos se pueden encontrar más ilustraciones de estas situaciones.



a)



b)

Figura 3.3. Recubrimiento de armaduras insuficiente con la consiguiente aparición de fisuras, manchas y desconchado.

- a) Pared trasera del Edificio 4,
b) Pasillo de enfermería.

3.5. Determinación de la profundidad de carbonatación

Como se observa en la figura 3.4., las profundidades de carbonatación son muy bajas, en el orden de los 5-15 mm. Debido a los prolongados tiempos de exposición de las estructuras al ambiente de la ciudad (35 años), se esperaban profundidades de carbonatación más altas que las obtenidas por existir en Moa un clima tropical, cálido y húmedo durante gran parte del año y un considerable desarrollo industrial, siendo

estos dos factores importantes para que el proceso de carbonatación se genere. Se observó que el frente de carbonatación no ha alcanzado al acero de refuerzo, por lo que al parecer la acción del CO_2 no ha sido un factor que haya provocado la corrosión del acero.



Figura 3.4. Profundidad de carbonatación revelada con solución de fenolftaleína al 1 %

Sin embargo, los bajos valores de profundidades de carbonatación se atribuyen a que la humedad relativa durante todo el año es superior al 70%, lo que ocasiona que los poros del concreto se encuentren saturados de agua todo el tiempo, impidiendo que el CO_2 penetre, disminuyendo los efectos de la carbonatación.

No obstante a que la carbonatación no se pueda considerar como una de las causas influyentes en la corrosión del refuerzo del concreto del ISMMM, a continuación se exponen los fundamentos del deterioro del acero por los efectos de esta en aquellas zonas donde los espesores de capa de recubrimiento del hormigón sean inferiores a los indicados por las normas.

En este caso, el dióxido de Carbono (CO_2) de la atmósfera reacciona con el Hidróxido de Calcio libre del hormigón según la reacción siguiente:



Estas reacciones dan como resultado la reducción del pH de la solución del poro de concreto a un valor tal que la capa de óxidos que protege el acero pierde su estabilidad.

Al destruirse esta capa, la corrosión puede desarrollarse con el concurso de oxígeno y humedad.

3.6. Resistividad eléctrica del concreto

Los resultados de las mediciones de la resistencia de las muestras y los valores calculados de resistividad del concreto se reportan en la tabla 3.3. Con los resultados obtenidos se procedió a clasificar el concreto según los ensayos de Corrosividad obtenidos según los parámetros que aparecen registrados en la tabla 2.3.

Tabla 3.3. Resultados de las mediciones de la resistencia de las muestras y los valores calculados de resistividad

N/O	Resistencia (omh)	Resistividad (Ω .mm)
1	23,3	209,7
2	21,7	195,3
3	25,2	226,8
4	24,6	221,4

De acuerdo con la tabla 3.3. , el pronóstico de corrosión para el hormigón estudiado es de “poco riesgo” para las muestras 1, 3 y 4; mientras que para la muestra 2, se pronostica como “riesgo moderado”, aunque considerando que el valor de resistividad obtenido se encuentra en el límite superior, se pudiera aceptar una salvedad en este sentido y aceptarlo como muy próximo al poco riesgo. Como se acotó anteriormente, debido a que la conductividad eléctrica es uno de los factores que controlan la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, estos elevados valores de resistividad eléctrica son una medida de la impermeabilidad del concreto.

3.7. Presencia e influencia de cloruros en el concreto

La tabla 3.4., muestra los resultados de las mediciones de los iones cloruro en las muestras de concreto analizadas.

Tabla 3.4. Concentraciones de iones cloruro

N/O	iones Cl^- (%)
1	0,52
2	0,43
3	0,47
4	0,49

En todos los casos, las concentraciones de iones cloruro exceden el 0,4 %, lo que evidencia una fuerte influencia del ambiente marino en la absorción de iones cloruro por parte del hormigón.

En la región de Moa, debido al régimen especial de precipitaciones y los valores de humedad relativa, se presenta el riesgo de ciclos alternados de humedecimiento y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del medio, que pueden afectar severamente el concreto.

En el ISMMM las estructuras de concreto no estn en contacto con el agua de mar, pero reciben las sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina. Bajo los efectos de los vientos y la brisa marina dominantes, estas se trasladan varios kilómetros al interior de la costa. Las construcciones de concreto ubicadas en el ISMMM son propensas a la corrosión por cloro en suspensión en la atmósfera, en forma de microscópicas gotas de agua de mar.

En la niebla o aerosol la concentración salina de cloruros y sulfatos eventualmente puede ser mayor que en el agua de mar, debido a la gran dispersión de las gotas y la evaporación parcial de agua, en especial cuando la temperatura es alta y la humedad relativa es baja. En presencia de humedad, se produce el ingreso del ion cloruro por difusión y en el secado se elimina el agua en exceso, pero el concreto retiene el cloro. Al repetirse el ciclo sucesivamente, el porcentaje ion cloruro resulta muy elevado.

La difusión del ion cloruro en el concreto se reduce por la capacidad del cemento para combinarlo química o físicamente, en cuanto reacciona con los productos de hidratación. Los componentes del cemento que reaccionan son el aluminato tricálcico $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ (C_3A) que forma cloro-aluminato cálcico de composición aproximada:

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, reaccionando también el ferroluminato tetra cálcico, (C_4FA)  $4\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ con la formación del cloro ferrito cálcico, de composición: $3\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

La corrosión por cloruros, se debe al ion cloruro presente en el agua o en la niebla marina, que actúa como un catalizador para la oxidación, tomando parte activa en la reacción. En la tabla 3.4., se observa que las concentraciones de iones cloruro en el

concreto se encuentran por encima de 0,4 %, por lo que en presencia de la humedad estos reaccionan con el acero y rompen la capa pasivante de óxido para en un posterior proceso electroquímico, corroer el material según la ecuación química siguiente:



Al oxidar al acero para formar el ion complejo cloruro férrico, $(\text{FeCl}_3)^-$, la humedad arrastra este ion inestable en la solución, donde reacciona con los iones hidroxilo disponibles para formar hidróxido de fierro, $\text{Fe}(\text{OH})_2$ que libera iones cloro y consume iones hidroxilo, como se esquematiza en la reacción siguiente:



Los electrones liberados en la reacción de oxidación fluyen a través del acero hasta la superficie catódica. De este proceso resulta una concentración de ion cloruro y una reducción del pH que favorece la ruptura continua de la película de óxido pasivante.

Como se observa, el ingreso del cloruro en el concreto requiere de un sistema de poros que est, al menos, parcialmente lleno de agua, de modo que los iones puedan moverse en senderos de agua continuos.

Consecuentemente, el ingreso, la acumulación y la redistribución del cloruro estn fuertemente relacionados a las condiciones de humedad. La humedad es decisiva para la ocurrencia y la extensión de la corrosión del refuerzo.

Debido a esta situación, el contenido de cloruros en la superficie del acero depende de la humedad. Un concreto permeable con zonas profundas de evaporación incrementaría la concentración de iones de varias sustancias en la ubicación del refuerzo, lo que tendría un impacto significativo en el inicio del cloruro. La figura 3.5., muestra la situación de las estructuras de hormigón de una de las zonas con mayor exposición a la humedad por los efectos de las filtraciones.

Se observaron mayores profundidades de cloruros en las estructuras pertenecientes a la cocina comedor, donde la corrosión es casi generalizada y atribuible a los elevados valores de humedad por los efectos de las filtraciones y la a presencia de vapores de

la cocción. En la figura 3.5., se muestra una fotografía del estado actual de estas estructuras. En los Anexos se pueden encontrar más ilustraciones de estas situaciones.



Figura 3.5. Corrosión generalizada de las armaduras acelerada por cloruros bajo los efectos de las filtraciones y deterioro de las estructuras de hormigón en el pasillo trasero del Laboratorio de Ciencia de los Materiales.

De hecho, los fenómenos de corrosión de estas armaduras se pueden asociar a defectos de construcción (insuficiente espesor de recubrimiento de concreto), cambios en las condiciones de servicio de las estructuras (excesiva humedad y temperaturas) y a la acción de agentes agresivos externos (iones cloruros y régimen de lluvias intensos). Es evidente que en estas situaciones la resistencia mecánica de la estructura se ve afectada.



a)



b)

Figura 3.6. Estado actual de las estructuras de hormigón en áreas de la cocina comedor.

a) Exteriores del almacén de víveres

b) Interior de la cocina

3.8 Presencia e influencia de sulfatos en el concreto

Contrario a lo que se esperaba, los análisis químicos realizados no reportan la presencia de iones sulfato en el hormigón. Se supone que la dirección de los vientos predominantes en el rea (N-NE) impone un predominio del clima costero sobre las estructuras del ISMMM, por sobre el clima industrial. Esto es atribuible a que el ISMMM pudiera encontrarse bajo la influencia de los gases provenientes de las industrias localizadas al este de la ciudad solamente cuando el aire sopla en dirección E-SE, cosa que según las estadísticas y las características del relieve, es muy poco probable.

3.9 Permeabilidad del hormigón

La tabla 3.5 muestra los resultados de la permeabilidad de las muestras analizadas.

Tabla 3.5. Coeficientes de permeabilidad de las muestras analizadas reportados por el análisis Torrens

Muestras	Coeficiente de permeabilidad kt ($\times 10^{-16} m^2$)
1	0,0063
2	0,0054
3	0,0071
4	0,0057

Al comprar estos valores con la escala de Torrens de la tabla 3.6, se observa que todas las muestras estn poseen coeficientes de permeabilidad inferiores a $0,01 \times 10^{-16} m^2$, por lo que el hormigón clasifica como de muy buena calidad.

Tabla 3.6. Calidad del concreto según la permeabilidad kt del método Torrens

Coeficiente de permeabilidad kt ($\times 10^{-16} m^2$)	ndice	Calidad del hormigón
> 10	5	Muy mala
1 - 10	4	Mala
0,1 - 1	3	Normal
0,01 - 0,1	2	Buena
$< 0,01$	1	Muy buena

Los bajos valores de coeficientes de permeabilidad de las muestras reportados por el análisis Torrens dan fe de la baja porosidad del hormigón o que es lo mismo: la buena compactación de la matriz cerámica, con un mínimo de porosidad.

3.10 Determinación del espesor de la capa de óxido en el refuerzo de acero

Las imágenes de microscopía electrónica de barrido de las figuras 3.7a y b muestran la microestructura en el corte transversal de las probetas 1 y 2. Se observan capas de óxido producto de la corrosión del refuerzo que cubren la superficie metálica.

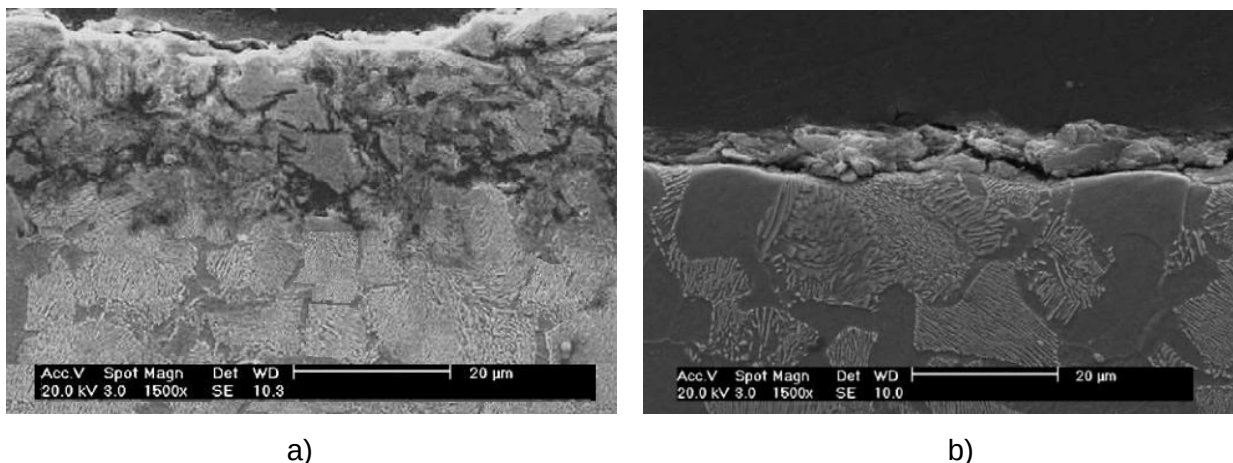


Figura 3.7. Capas de óxido producto de la corrosión del refuerzo.

a) Acero con 0,76 % C

b) Acero con 0,43 % C

El acero de la figura a), con 0,76 % de C, presenta, efectivamente, una estructura perlítica, propia de aceros eutectoides, mientras que el acero b), con 0,43 % de C posee una estructura ferrito-perlítica, propia de aceros hipoeutectoides.

A pesar de la diferencia en la composición (% de C) el acero a), con mayor contenido de C, presenta mayores profundidades de capas oxidadas ($\leq 20 \mu\text{m}$), atribuible a la mayor exposición de este acero ante las humedades del concreto. En el caso del acero b), la profundidad de capa oxidada es mínima (5-7 μm) por encontrarse el mismo en una zona que ofrece relativamente poca humedad. Sin embargo, nótese que aún cuando la humedad en el lugar de ubicación del acero pudiera ser controlada hasta niveles muy bajos, se observan los efectos de los iones cloruros en el acero.

3.11 El ambiente marino en Moa y su influencia en la corrosión del refuerzo del concreto

El agua de mar contiene sales disueltas, agresivas para el concreto. Están presentes las siguientes: cloruro sódico (NaCl), cloruro magnésico (MgCl_2), sulfato magnésico (MgSO_4), sulfato cálcico (CaSO_4), cloruro potásico (KCl) y sulfato potásico (K_2SO_4).

De acuerdo con los datos reportados por Lewis, 1980, la composición química del agua de mar en Cuba (Mar Caribe) es similar a la de otros mares, como se observa en las tablas 3.7. y 3.8.

Tabla 3.7. Composición química del agua de mar por regiones

Ion	Concentración (g por 100 cm ³)			
	O�cano �ndico	O�cano Atlántico	O�cano Pacífico	Mar Caribe
Sodio	1,220	1,110	1,090	1,080
Potasio	0,055	0,040	0,039	0,038
Calcio	0,043	0,048	0,041	0,042
Magnesio	0,111	0,121	0,130	0,127
Cloro	1,655	2,000	1,933	1,989
Sulfato	0,222	0,218	0,268	0,215

Tabla 3.8. Contenido del ion cloruro y salinidad total en el agua de mar

Mar	Contenido de ion cloruro (ppm)	Salinidad Total (ppm)
O�cano �ndico	21380	33060
O�cano Atlántico	20000	35537
O�cano Pacífico	19330	35000
Mar Caribe	19500	34400

La corrosión en el concreto, se vincula con la temperatura y humedad. Como se sabe, el incremento de temperatura potencia todas las reacciones químicas. Otro factor a considerar en la corrosión de los refuerzos son los vientos predominantes, que van de sur a norte, envolviendo las edificaciones urbanas con la brisa marina.

Según estudios realizados por la empresa CESIGMA SA¹ en el año 2004 (CESIGMA SA, 2004) y sistematizados por Retirado (2012), la región de Moa presenta un clima tropical con una distribución estacional de las precipitaciones irregular.

Las precipitaciones están determinadas por una significativa disminución de las mismas dentro del período lluvioso y una tendencia general al incremento de las lluvias al final del mismo.

¹ CESIGMA SA. Corporación Española de Sistemas de información Geográfica y Medio Ambiente.

Las precipitaciones en Moa presentan dos períodos de máximo: uno principal en octubre-noviembre y otro secundario en mayo-junio. De igual manera, presenta dos de mínimo: uno en febrero-marzo y otro en julio-agosto. La cantidad de días al año con lluvias mayor que 1 mm es superior a 100, el promedio anual de precipitaciones alcanza los 2 000 mm y la evaporación se acerca a los 1 600 mm. La combinación de la máxima evaporación con el mínimo de precipitaciones en el verano y el mínimo de evaporación con el máximo de precipitaciones en el invierno producen un resecamiento intenso en el verano y un exceso de humedad en el invierno.

La temperatura media anual es 27 °C. En verano fluctúa entre 30 y 32 °C con máximas que oscilan entre 34 y 36 °C y en invierno varía entre 14 y 26 °C con mínimas alrededor de los 12 °C. La insolación es prácticamente constante todo el año, siendo la frecuencia de días despejados en el período seco de 60 días/año y la insolación anual es mayor que 2 900 horas luz.

La radiación solar incidente sobre la superficie media anual es de 17 MJ/m² (suma diaria). La humedad relativa media anual para las 7:30 horas es de 85 a 90 % y para las 13:00 horas está entre 70 y 75 %.

El régimen eólico refleja la ocurrencia mayoritaria de los vientos alisios reforzados por las brisas marinas, y contrarrestados por el terral. Los vientos soplan sobre la zona oriental procedentes del NE en los meses de octubre-enero; del ENE, durante febrero-mayo; y del Este, en junio-septiembre. La velocidad promedio de la brisa es en general de 1,4 a 4,1 m/s y mantiene una frecuencia de 180 días al año. Se puede afirmar que el viento reinante en la zona es la combinación alisios-brisa marina con una frecuencia mayor que el 64 %. Generalmente el viento reinante es el de mayor velocidad promedio anual, que en la zona del patio de secado es de 3,9 a 4,4 m/s. La cantidad anual de días con calma es 41, como promedio.

Como se infiere de las características ante expuestas, existen ocho meses del año (diciembre-abril y julio-septiembre) donde las precipitaciones son moderadas. En el período se destacan los meses de verano donde existe una marcada disminución de las mismas, lo que conjugado con los altos regímenes de radiación solar provoca la máxima evaporación de la humedad.

De la información de los datos climatológicos expuestos anteriormente, se desprende que la corrosión de los refuerzos de las estructuras en la región de Moa se incrementa bajo los efectos de las características del clima tropical húmedo, con temperaturas elevadas.

Se estima que un aumento de la temperatura en 10°C duplica la velocidad de la reacción de corrosión y en el caso de la corrosión por carbonatación, esta se activa en el rango de 60 a 90 % de humedad relativa y en la corrosión por cloruros el efecto de la humedad es importante en especial en los niveles de 70 a 90 % de humedad relativa.

Como se observa, los factores climáticos de la región de Moa favorecen la corrosión del refuerzo del concreto de las estructuras de hormigón.

3.12 Normas para la protección y diseño de armaduras

La relación agua cemento es el factor más importante en la protección de las armaduras, gobierna el volumen de vacíos capilares y su interrelación en el interior del concreto, siendo éste el vehículo para la penetración de las sales agresivas. Se ha establecido que el mínimo de vacíos se obtiene con relaciones a/c 0,37.

El Comité del ACI 318 prescribe una relación a/c de 0.40 para los concretos expuestos al agua de mar o “spray” marino. El Comité 352 recomienda este mismo valor para la zona de salpicadura y para las construcciones aéreas, asumiendo un valor de 0,45 para los concretos sumergidos. Es conveniente considerar el contenido mínimo de cemento, como garantía de la formación de productos de hidratación, que aseguren el buen comportamiento del concreto frente a la corrosión.

Finalmente, es necesario asegurar el espesor del concreto que recubre las armaduras. En efecto, la corrosión del concreto se desarrolla en razón de la raíz cuadrada del tiempo, en consecuencia si el recubrimiento se reduce a la mitad, la corrosión podrá ocurrir aceleradamente en la cuarta parte del tiempo. El recubrimiento del concreto debe ser de espesor tal que retarde el ingreso de cloruros y de ser posible del CO₂, los espesores recomendados por el código ACI 318.

Tabla 3.9. Recubrimiento o cobertura mínima del concreto al refuerzo.

Concreto vaciado in situ	Recubrimiento mínimo (mm)
a) Concreto vaciado contra el suelo o en contacto con agua de mar	70
b) Concreto en contacto con el suelo o expuesto al ambiente	
▪ Barras de 5/8" o menores	40
▪ Barras de 3/4" o mayores	50
c) Concreto no expuesto al ambiente (protegido por un revestimiento) ni en contacto con el suelo (vaciado con encofrado y/o solado)	
▪ Losas, aligerados	20
▪ Muros o muros de corte	20
▪ Vigas y columnas	40
▪ Cáscaras o laminas plegadas	20
Concreto prefabricado (en condiciones de control de planta)	Recubrimiento mínimo (mm)
a) Concreto en contacto con el suelo o expuesto al ambiente	
▪ Paneles para muros y losas	20
Otros elementos:	
▪ Barras de 5/8" o menores	40
▪ Barras de 3/4" o mayores	30
b) Concreto no expuesto al ambiente ni en contacto con el suelo	
▪ Losas, aligerados	15
▪ Vigas y columnas	20
➤ Cáscaras o láminas plegadas	15

3.13 Protección y reparación de estructuras de concreto sometidos al ataque de cloruros

Para proteger las estructuras de concreto armado de la corrosión, en especial en zonas de ambiente marino, la medida más eficiente y económica es proteger las barras con un recubrimiento de concreto de apropiado espesor y mínima porosidad. Este último factor, se evalúa por una menor relación agua cemento, alrededor de 0.4 y por la cantidad de cemento, en un límite mínimo de 350 kg/m³ estas condiciones se controlan generalmente por la resistencia a la compresión. Según las producciones del mercado nacional, el cemento indicado para este fin es el Portland P-350.

3.14 Impacto Económico

La evaluación económica de este trabajo de diploma va dirigida fundamentalmente a la comparación de los costos incurridos en los ensayos practicados con la repercusión desde el punto de vista económica social que implica la destrucción de las estructuras por los efectos de la corrosión, puesto que el medio en que se encuentran las edificaciones de las que se tomaron las muestras incide considerablemente en su deterioro debido a los factores ya expuestos. La ficha de costo de estos ensayos, emitida por el laboratorio donde se realizaron; se muestra en el anexo 1. En la ficha los costos se expresan en Bolívares Fuertes (BsF), la moneda nacional de Venezuela

En la tabla 3.10., se muestran los costos valorados con el factor de conversión para expresarlos en USD donde 1 USD = 4,3 BsF.

Tabla 3.10 Análisis de Costos de los ensayos

Tipos de ensayos realizados	Costos (USD)
Análisis Químico de las muestras de hormigón	106.59
Determinación de la profundidad de carbonatación en el concreto	131.91
Medición del potencial electroquímico del acero de refuerzo	54.54
Determinación de la concentración de cloruros en el concreto	75.85
Determinación de la concentración de sulfatos en el concreto	75.85
Determinación de la permeabilidad del hormigón	181.63
Determinación del espesor de la capa carbonatada en el concreto	100.51
Total	726.88

Como se observa, los costos totales ascienden a 3125.67 BsF, equivalentes a 726.88 USD. De esta manera, la obtención y el tratamiento de datos que revelen la influencia de la concentración de iones cloruro, iones sulfuro o carbonatos presentes en la atmósfera, el conocimiento de las profundidades de difusión de capas oxidadas y su tendencia, la influencia de la humedad relativa, la temperatura, régimen pluvial, velocidad del viento, niveles de radiación solar, tiempo de humectación y tiempo de insolación que determinan el potencial de corrosión y la velocidad de corrosión de los refuerzos en el concreto representa un importante aporte al conocimiento en el campo de la Ingeniería de los Materiales referida al desarrollo de estructuras de hormigón armado fiables.

Los costos incluidos en los ensayos son incomparables con los beneficios que reporta el conocimiento con determinado nivel de profundidad de los factores de corrosión a considerar para el tratamiento del refuerzo de acero en hormigón armado bajo condiciones ambientales del territorio de Moa particularizado al ISMMM.

3.15 Impacto social y ambiental

La naturaleza sirve de fuente de materia prima y de energía; con la utilización de sus riquezas se contribuye la vida material de la sociedad y de su desarrollo económico. Durante las últimas décadas, la influencia de la humanidad sobre la naturaleza se ha ido incrementando en relación con el aumento de la demanda de recursos naturales. El desarrollo intensivo de la producción industrial va acompañado de considerables alteraciones ambientales. En el proceso de la actividad productiva, el hombre actúa como un factor decisivo, provocando cambios considerables en la naturaleza y alteraciones en la estructura balanceada del intercambio de sustancias en los ecosistemas naturales.

Los resultados mostrados pueden contribuir a la sustentabilidad ecológica y al uso racional de los recursos naturales, ya que al adoptar medidas para el cumplimiento de las normas para la protección y diseño de armaduras y factores a considerar para la protección y reparación de estructuras de concreto sometidos al ataque de cloruros, se puede aumentar la vida útil de las construcciones, se mejora la tasa de utilización de los recursos naturales renovables y no renovables y con esto aumentará el tiempo previsto para su agotamiento. Al mismo tiempo se disminuyen los impactos negativos al medio ambiente por concepto de desechos y se disminuyen las pérdidas económicas que se derivan con la consiguiente la mitigación de los consiguientes impactos ecológicos - ambientales negativos que se generan por los efectos del deterioro de las estructuras, favoreciendo el desarrollo sustentable.

3.16 Conclusiones del Capítulo III

1. El hormigón investigado presenta buena calidad en su constitución, reflejada por la baja permeabilidad y elevada resistividad comprobadas en los ensayos. Se descarta la presencia de arena de playa como agente introductor de iones cloruro.
2. Los factores que más inciden en el deterioro por corrosión del refuerzo del hormigón armado en el ambiente urbano del ISMMM son:
 - Ambiente costero con elevadas concentraciones de ion cloruro presente en el agua o en la niebla marina,
 - Microclima de la región, del tipo tropical tropical húmedo (mínimo 70 %), con un promedio anual de precipitaciones alcanza los 2 000 mm y la evaporación se acerca a los 1 600 mm, temperatura media anual de 27 C con máximas de 36 C, insolación prácticamente constante todo el año, régimen eólico moderado con combinación alisios-brisa marina con dirección E-NE y velocidad promedio anual de 3,9 a 4,4 m/s que transportan los iones cloruro a distancias prudenciales de la costa
 - Insuficiente espesor del concreto que recubre las armaduras, en contraposición a lo establecido por las normas.

Conclusiones Generales

- Se definieron y caracterizaron las particularidades de los principales factores que determinan el deterioro por corrosión del refuerzo del hormigón armado bajo condiciones ambientales de la región de Moa, particularizados al ISMMM.
- El deterioro de las estructuras de hormigón armado del ISMMM, está provocado por la corrosión electroquímica del refuerzo bajo los efectos combinados de la presencia de iones en la atmósfera, la poca uniformidad en el tipo de acero, Insuficiente espesor del concreto que recubre las armaduras, en contraposición a lo establecido por las normas, la humedad relativa y los prolongados tiempos de humectación por los efectos de las lluvias y las filtraciones.
- Los ensayos realizados reportaron un costo total de 726.88 USD. Estos costos son incomparables con los beneficios que reporta el conocimiento con determinado nivel de profundidad de los factores de corrosión a considerar para el tratamiento del refuerzo de acero en hormigón armado bajo condiciones ambientales del territorio de Moa particularizado al ISMMM.



Recomendaciones

1. Estudiar en profundidad las variables electroquímicas del concreto y el refuerzo para esclarecer mejor los factores analizados
2. Proponer, sobre la base de los resultados, medidas de protección y reparación de estructuras de concreto para mitigar el ataque de cloruros en el refuerzo de hormigón
3. Generalizar la metodología de la presente investigación a otras áreas del municipio

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. A. Vico, W. Morris y M. Vázquez: Evaluación del avance de la corrosión de refuerzos en estructuras de hormigón. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata Juan B. Justo 4302 - B7608FDQ Mar del Plata - Argentina 1995.
2. Batista, J.: Comportamiento de la susceptibilidad magnética en el ambiente ofiolítico del nordeste de Cuba oriental. Revista Minería y Geología, Vol. 25 (4), 2009.
3. Borges, P.: El umbral de los cloruros para despasivar el acero de refuerzo, Criterios y resultados en el mundo.- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.- Revista Construcción y Tecnología.-México.-Enero 2001.
4. Castro, P: El umbral de los cloruros para despasivar el acero de refuerzo, Criterios y resultados en el mundo. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.- Revista Construcción y Tecnología, México, Enero 2001.
5. CESIGMA SA. Estudio del impacto ambiental del Proyecto Expansión de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Informe de investigación realizado por la División América de la empresa CESIGMA SA, 2004..
6. Francois R. y G Arliguie.- Durability of Loaded Reinforced Concrete In Chloride Environment.- ACI SP-145.- American Concrete Institute.- EUA.- 1994.
7. García, M.: Estudio petrográfico de los yacimientos de la Delta. Departamento de Geología. Trabajo de Diploma. 1976.
8. García, T.: Caracterización petrológica del pozo estructural E No. 1 de Pinares de Mayarí. Trabajo de Diploma. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa,1990.
9. Hansson, C.: Concrete: The Advances Industrial Material of the 21st Century. - Metallurgical and Materials Transactions A.- Vol. 26 A.- EUA.- 1995.
10. Hernández, O. y Mendoza, C.: Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico, Ingeniería Investigación y Tecnología, UNAM, 7(1), 2006. 57-70.

11. Industria de la Construcción. Agregados para Concreto. Examen Petrografico. Método de prueba.- ONNCCE.- México.- 1984.
12. Industria de la construcción. Cementos hidráulicos. Especificaciones y métodos de prueba.- ONNCCE.- México 1996.
13. Lamond, J. F.: Designing for durability, Concrete International. Nov. 2006, 34–36.
14. Lewis, E.: Escala práctica de salinidad y sus antecedentes. IEEE J. Ocean. Eng., OE-5 (1), 1980.
15. López, R.; J. Trinidad; A. Torres; M. Martínez; W. Martínez; L. Ariza; E. Zamudio; J. Genescá; B. Valdez: Durabilidad de la Infraestructura de concreto reforzado expuesta a diferentes ambientes urbanos de México. Publicación Técnica No. 292 Sanfandila, ISSN 0188-7297, Qro, 2006.
16. Marrero, J. C.: Estudio petrográfico del macizo de gabra Jiguaní. Trabajo de Diploma. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1983.
17. Mena, M.: Durabilidad de Estructuras de Concreto en México.- IMCYC.- Primera Edición.- México.- 2005. pp. 31-32, pp. 90, pp. 34
18. Norma ACI-222-2001. Protection of metals in concrete against corrosion, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
19. Norma ACI-318-2005. Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
20. Norma ASTM C 1017 / C 1017M. - Standard Specification for Chemical Admixture for Use in Producing Flowing Concrete. American Society for Testing and Materials. USA, 1998.
21. Norma ASTM C 1152.- Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. USA, 1997.
22. Norma ASTM C 150.- Standard Specification for Portland. American Society for Testing and Materials. EUA.- 1999.

23. Norma ASTM C 295. Petrographic Examination of Aggregates for Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1998.
24. Norma ASTM C 494 / C 494M. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete.- American Society for Testing and Materials.- EUA.- 1999.
25. Norma ASTM C-114, 2007. Determinación de la concentración de sulfatos en el concreto
26. Norma ASTM C-1218, 1999. Determinación de la concentración de cloruros en el concreto.
27. Norma ASTM G-57-2005. Field Measurements of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method”.
28. Norma ASTM C617-98. Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens. Determinación del espesor de la capa carbonatada en el concreto
29. Norma ASTM C-876, 1999. Medición del potencial electroquímico del acero de refuerzo.
30. Norma UNE 112-011-94. Determinación de la Profundidad de Carbonatación en Hormigones Endurecidos y Puestos en Servicio. Norma Española.
31. Norma UNE 83-306-85- Determinación de la permeabilidad del hormigón. Parámetros y especificaciones
32. Norma UNE 83-309-90. Determinación de la permeabilidad del hormigón. Designaciones.
33. Paillére S; López R; RILEM, M; W. Martínez, Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la Armadura del Hormigón 1992.
34. Pinell, A.: Estudio petrológico en el basamento del yacimiento ferroniquelífero Moa-Oriental, provincia Holguín. Trabajo de diploma. Departamento de Geología. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, 1987.
35. Retirado, Y.: Modelación matemática del proceso de secado natural de las menas lateríticas. Tesis Doctoral. ISMMM. 2012.

36. Rick, M.: La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.- Revista Construcción y Tecnología. México, Diciembre, 2000.
37. RILEM CPC-18. "Measurement of Hardened Concrete Carbonation Depth". Materials and Structures. Volumen 21, Numero 126, 1998.
38. Ríos, Y y J. Cobiella: Estudio preliminar del macizo de gabroides Quesigua de las ofiolitas del este de la provincia de Holguín. Minería y Geología, 2, 1984:109-132.
39. Sanjuán, M. y P. Castro: Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto, México: IMCYC, 2001
40. Sanjuán, M.: Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del Hormigón. Memoria presentada para optar al grado de Doctor en Ciencias Químicas. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja" C.S.I.C. Madrid, 1992.
41. Solís, R., E. Moreno y C. Estrella: Carbonatación natural del concreto con agregado calizo, En: IX Congreso Latinoamericano de Patología y XI Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Quito, Ecuador, 2007.
42. Torres, A.: Periodo de iniciación de la Corrosión (T1) en Estructuras de Concreto Expuestas a un Ambiente Marino. Revista Internacional Construlink (RCI). Vol. 2, No. 5, Construlink.- ISSN 1645-576.- 2004.
43. Trocónis O.: Memorias del Curso de Durabilidad de Estructuras de Concreto Reforzado.- México, Querétaro.- 2005.
44. Trocónis, O.: Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. CYTED, Tercera Edición. Maracaibo, Venezuela. Agosto 2000.



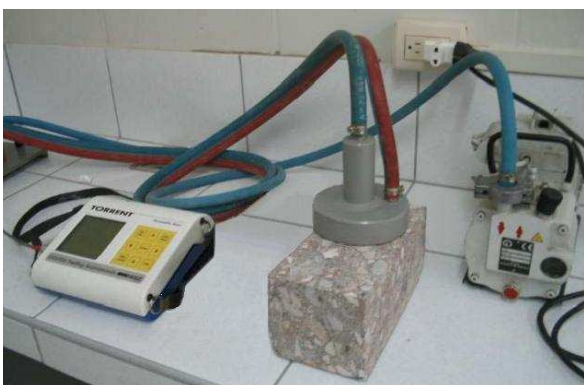
Anexo 2. Foto paredes del almacén de víveres



Anexo 3. Pasillo de la enfermería.



Anexo 4. Foto pared trasera del edificio # 4



Anexo 5. Fotografía instalación para el ensayo de permeabilidad



Anexo 6. Corrosión generalizada de las armaduras acelerada por cloruros bajo los efectos de las filtraciones y deterioro de las estructuras de hormigón en el pasillo trasero del Laboratorio de Ciencia de los Materiales.



Anexo 7. Muestra 1 de concreto.



Anexo 8. Muestra 2 de concreto.



Anexo 8. Muestra 3 del concreto