

**UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO HENRÍQUEZ UREÑA
(UNPHU)**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Civil



“Durabilidad Del Hormigón Armado Frente al Ion Cloruro en las Zonas
Costeras”

Trabajo de Grado Presentado Por:

Héctor Andrés Perdomo

Emil Isaías Heyer

Asesor:

Ing. Francisco G. Martínez

Para la obtención de grado de:

Ingeniero Civil.

Santo Domingo, D.N.

Septiembre 2015

“Nunca consideres el estudio como una obligación sino una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber”. Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Después de un largo recorrido queremos dar las gracias a Dios por permitirnos culminar con éxito esta etapa en nuestras vidas, sacando de esta experiencia el mejor de los conocimientos y el haber conocido un grupo de personas que permanecerán para siempre en nuestros corazones.

Queremos agradecer de manera muy especial a la Universidad Nacional Pedro Henríquez Ureña (UNPHU) por abrirnos las puertas y permitirnos formar parte de esta maravillosa familia.

A nuestros padres les queremos dar las gracias por ponernos en el lugar que estamos hoy en día y contribuir de múltiples maneras a lo largo de nuestro trayecto.

A nuestro asesor Ing. Francisco Martínez el cual desde nuestros inicios con el proyecto estuvo a nuestra plena disposición apoyándonos y colaborando con toda la información requerida, y por suministrarnos una gran cantidad de ideas para que este proyecto cumpliera con el mejor de los estándares.

De manera particular queremos agradecer al Ing. Ramiro Restrepo, Ing. Noemi Pichardo e Ing. Orquídea Ramos, que con su alta experiencia en durabilidad del hormigón nos permitieron hacer un trabajo acabado, profundo y de más alto nivel.

A nuestros compañeros Ing. Ediniery Pichardo, Ing. Carol W. Reyes, Alexandro Ramos, Ing. Iván fantasía, Douglas L. Noboa y Héctor Oscar Escalante por su gran apoyo.

Contenido

AGRADECIMIENTOS _____	III
INTRODUCCIÓN _____	X
CAPÍTULO I - EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN _____	12
1.1 Planteamiento y formulación del problema _____	12
1.2 Preguntas de investigación _____	13
1.3 Objetivos _____	13
Objetivo general _____	13
Objetivos específicos _____	13
1.4 Justificación _____	14
1.5 Alcances y límites _____	15
1.6 Metodología de la investigación _____	15
CAPÍTULO II – MARCO CONCEPTUAL _____	16
2.1 Antecedentes _____	16
2.2 Marco Teórico _____	17
2.2.1 El hormigón armado _____	17
2.2.1.1 Materiales que constituyen el hormigón armado _____	17
Agua _____	18
Aditivos _____	21
2.2.1.2 Ventajas del hormigón armado _____	23
2.3 Antecedentes históricos _____	23
2.4 Durabilidad Del Hormigón Armado _____	25
2.4.1 Mecanismos de deterioro en el Hormigón _____	27
2.4.1.1 Ataque de Sulfato _____	27
2.4.1.2 Ataque químico por sulfatos provenientes de fuentes externas al hormigón _____	29
2.4.1.4 Ataque físico por sales _____	34
2.4.1.5 Ataque por Ácidos _____	35
2.4.1.6 Carbonatación _____	37

2.5 Corrosión de las Armaduras _____	40
2.5.1 Corrosión Química _____	40
2.5.2 Corrosión Electroquímica _____	40
2.6 El Mar Dominicano _____	42
2.7 Clasificación de zonas expuestas en los elementos estructurales _____	43
2.7.1 Zona de inmersión _____	44
2.7.2 Zona de marea _____	44
2.7.3 Zona de salpicaduras _____	45
2.7.4 Zona de Ambiente Marino _____	45
2.8 Ensayo Rápido de Permeabilidad de Cloruros (RCPT) _____	46
2.9 Life-365 _____	52
CAPÍTULO III – MARCO METODOLÓGICO _____	54
3.1 Formulación de hipótesis _____	54
3.2 Tipo de investigación _____	54
3.3 Enfoque de la investigación _____	54
3.4 Tiempo de ocurrencia de la investigación _____	54
3.5 Método de investigación _____	55
3.6 Procedimiento _____	55
3.7 Técnicas de investigación _____	55
3.7.1 Técnicas _____	55
3.7.2 Instrumentos _____	55
CAPÍTULO IV – RESULTADOS _____	58
4.1 Ensayos realizados a los materiales para el diseño de mezcla _____	58
4.1.2 Gravedad específica y absorción _____	60
4.1.3 Densidad suelta y varillada _____	62
4.1.4 Combinación de los agregados y curva granulométrica (Diego Sánchez de Guzmán). _____	64
4.2 Diseño De Mezcla de Hormigón Hidráulico _____	65
4.3 Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire _____	67
4.4 Resultados de las Densidades _____	68
4.5 Resultados de Rapid Chloride Permeability _____	69
4.6 Resultados del life-365 _____	76

4.7 Análisis de Costo	78
Conclusión	80
Recomendaciones	82
Bibliografía	83
Anexos	84

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1. Microsílice, (López L.G. 2011)	22
Ilustración 2. Corrosión de las armaduras en el hormigón. (BERMÚDEZ 2007)	41
Ilustración 3. Esquema de la muestra seleccionada para el ensayo	48
Ilustración 4. Recipiente de vacío	49
Ilustración 5. Esquema del ensayo RCPT	50
Ilustración 6. Equipo utilizado para el ensayo	52
Ilustración 7. Generador Eléctrico.....	56
Ilustración 8. Bomba y Desecador de vacío para desairar las muestras.....	56
Ilustración 9. Productos Químicos	57
Ilustración 10. Probeta de Hormigón con Microsílice.....	65
Ilustración 11. Probetas de hormigón a/c 0.40	66
Ilustración 12. Virtual Rapid Chloride Permeability Test	74
Ilustración 13. Tavares Industrial, 2015	85
Ilustración 14. Predicción de la Carga muestra #A7	88
Ilustración 15. Predicción de la Carga muestra #A8	89
Ilustración 16. Predicción de la Carga muestra #B7	90
Ilustración 17. Predicción de la Carga muestra #B8	91
Ilustración 18. Selección de Muestras de Hormigón.....	92
Ilustración 19. Equipo en funcionamiento.....	92
Ilustración 20. Equipo utilizado para el ensayo RCPT.....	92
Ilustración 21. Anotación de datos durante el ensayo	92
Ilustración 22. Celda contenedora de las soluciones.....	93
Ilustración 23. Preparación de la muestra antes del ensayo	93
Ilustración 24. Celdas en funcionamiento durante el ensayo	93
Ilustración 25. Tester utilizado para medir la corriente (A) y la Temperatura	93
Ilustración 26. Corrosión de la armadura.....	94
Ilustración 27. Descascaramiento del hormigón en la Autopista las Américas.	94
Ilustración 28. Descascaramiento del hormigón por la corrosión del acero.....	95

Índice de Tablas

Tabla 1. Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el hormigón (ACI 201, 2001)	26
Tabla 2. Factores que afectan el ataque del hormigón por parte de los agentes químico(ACI 201, 2001).....	27
Tabla 3. Requisitos para proteger al hormigón contra los daños provocados por los ataques por sulfatos. (ACI 201, 2001).....	32
Tabla 4. Clasificación del Hormigón de acuerdo a la carga total.....	47
Tabla 5. Granulometría del agregado grueso.	58
Tabla 6. Granulometría del agregado fino	59
Tabla 7. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.	60
Tabla 8. Gravedad específica y absorción del agregado fino.	61
Tabla 9. Densidad suelta y varillada del agregado grueso.....	62
Tabla 10. Densidad suelta y varillada del agregado fino.....	63
Tabla 11. Diseño de mezcla hormigón durable con adición de microsílíce	65
Tabla 12. Diseño de mezcla hormigón con relación a/c 0.40.....	66
Tabla 13. Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire Hormigón Durable.....	67
Tabla 14. Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire Hormigón Convencional	67
Tabla 15. Tabla de densidades del Hormigón convencional.....	68
Tabla 16. Tabla de Densidades del hormigón con microsílíce	68
Tabla 17. Resultados del Virtual Rapid Chloride Permeability Test	74
Tabla 18. Precio unitario hormigón durable	78
Tabla 19. Precio unitario hormigón menos durable.....	78
Tabla 20. Resultados de las roturas de las muestras # A.....	86
Tabla 21. Resultados de las roturas de las muestras# B.....	87

Índice de Graficas

Grafica 1. Promedio del comportamiento de la corriente en función del tiempo del ensayo.....	72
Grafica 2. Comportamiento de la corriente en función del tiempo de la prueba.	75
Grafica 3. Influencia del tiempo de curado en el valor de la carga.	75
Grafica 4. Comparación de durabilidad en el tiempo del hormigón con adición de microsílíce y sin microsílíce.	77

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de las estructuras en las zonas costeras siempre se ha visto amenazadas por las condiciones del ambiente marino, una buena resistencia mecánica no es suficiente para garantizar su durabilidad, Realizar reparaciones y protecciones de estructuras de hormigón armado resulta muy costoso y en ocasiones ante un alto grado de degradación no ha habido otra solución más que sustituir las viejas y sustituirlas por unas nuevas.

La corrosión en el acero de refuerzo es el problema más común que afecta a la durabilidad del hormigón armado. La corrosión inducida por los ataques de los cloruros, es uno de los canales principales del deterioro que afecta su funcionamiento físico y mecánico.

En este trabajo de grado se investigó la durabilidad del hormigón frente a la penetración del ion cloruro, el cual disminuye la vida útil de las estructuras debido a la corrosión del acero, que genera un desconchamiento del hormigón en las zonas afectadas. Cuando este problema no es atendido adecuadamente podría causar problemas de servicio y hasta el colapso de la estructura.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la prolongación de la vida del hormigón armado, mediante la adición de aditivos, haciendo una comparación de un hormigón durable y uno que no lo es, observando el comportamiento ante los cloruros,

utilizando muestras que fueron sometidas a ensayos de permeabilidad rápida de cloruros (RCPT), en probetas de 35 días y 38 días de edad, teniendo en cuenta lo descrito por la ASTM-C1202, Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration.

CAPÍTULO I - EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento y formulación del problema

En la República Dominicana las estructuras ubicadas en las zonas costeras están siendo afectadas por uno de los problemas más importante en el área de la construcción, que es los procesos de abrasivos que ocasionan las condiciones cercanas a las aguas del mar.

Hoy día vemos como construcciones con menos de 15 años presentan problemas de corrosión, carbonatación y abrasión, ya que con el paso del tiempo nos percatamos que el concreto reforzado por sí solo no pueden satisfacer esas necesidades, es decir, que tenemos un problema que trasciende más allá de la Resistencia, los esfuerzos y diseños ingeniosos, nos referimos a la durabilidad de los elementos estructurales, condición indispensable para que las obras desarrollen los fines y tiempo de vida útil concebidos en su planificación.

No sólo es de utilidad alcanzar eficientes diseños y calidad de construcción óptima si al final alcanzan un período corto de utilidad debido a la degradación de sus componentes estructurales. La utilidad de las estructuras de hormigón armado dependerá de la resistencia del concreto y de la armadura de refuerzo, vistas ambas como un conjunto inseparable. Cualquiera de las dos que se deteriore, comprometerá la estructura en su totalidad.

Por lo general, un ambiente marino, produce debilitamiento al elemento estructural, causando desintegración del hormigón y corrosión en el refuerzo metálico, ya que el agua de mar posee una alta incidencia de los iones cloruros y sulfatos (se pueden encontrar de diferentes maneras, ya sean absorbidos o disueltos en la mezcla), que penetran al concreto y producen la corrosión y consiguiente deterioro del acero de refuerzo.

1.2 Preguntas de investigación

1. ¿Cuáles serían los métodos utilizados para mejorar la durabilidad del hormigón armado?
2. ¿Cuáles son los requisitos para mejorar la durabilidad del hormigón armado expuesto a las condiciones de un ambiente en zonas costeras?
3. ¿Cuál es el beneficio de implementar estos métodos en la República Dominicana?

1.3 Objetivos

Objetivo general

Implementar tecnologías de concreto para mejorar la durabilidad del hormigón expuesto a los iones de cloruro, en el ambiente marino y zonas costeras.

Objetivos específicos

- Evaluar los efectos que influyen en la durabilidad del hormigón armado de las estructuras en estudio.

- Comparar un hormigón con características de durabilidad con uno confeccionado por el método convencional.
- Demostrar la viabilidad de los métodos utilizados en la construcción de obras.

1.4 Justificación

Atendiendo a la necesidad de mejoras en la calidad y durabilidad de las obras en las zonas donde se encuentra en constante exposición a la salinidad, se ha tomado como iniciativa presentar la sugerencia, de la implementación de tecnologías para mejorar los métodos constructivos de obras marítimas y costeras en la República Dominicana, puesto que son muchos los casos de las obras semejantes que se ven afectadas ante la constante exposición a estos elementos, en comparación con los métodos convencionales de confección de hormigón hidráulico.

En la República Dominicana las estructuras ubicadas en las zonas costeras, están siendo afectadas por uno de los problemas más importantes en el área de la construcción que es la de los procesos corrosivos que proporcionan las aguas saladas. La mayor parte de las atribuciones que registran los congresos se refieren a condiciones propias de los países del hemisferio norte y en especial a problemas de climas fríos. Las contribuciones sobre zonas tropicales o semitropicales son muy pocas.

En el concreto la explicación aceptada es que en las regiones cálidas se acrecientan los fenómenos de corrosión, que hacen insuficientes los códigos de edificación europeos o norteamericanos, que se basan en la experiencia del hemisferio norte. Esta realidad lleva a dirigir la investigación dentro de los climas y microclimas propios de nuestro ambiente.

1.5 Alcances y límites

El estudio de mejoramiento de la durabilidad del hormigón como material de construcción en las zonas costeras tiene la finalidad de obtener una mezcla de hormigón que sea capaz de prolongar su vida contra el devastador ambiente marino. Para lograr esta mejora sólo nos concentraremos en mejorar el concreto para que sea más impermeable y a su vez más denso sin tener que incurrir en aumentar las secciones de los elementos estructurales.

Se realizaron estudios como el de la penetración rápida de cloruros, para poder simular cómo se comporta el hormigón frente al ataque directo de las sales, también se tienen previstos ensayos a los agregados para poder evaluar desde una primera instancia la resistencia, ya que si no tenemos una buena calidad de los agregados no vale de nada mejorar o querer implementar dicho hormigón.

1.6 Metodología de la investigación

La investigación que se está presentando es de tipo experimental, tomando en cuenta que en la misma se implementaron una serie de estudios de laboratorio con el fin de demostrar los objetivos plasmados.

Para poder obtener los resultados se realizó la elaboración de 20 probetas para someterlas a pruebas, una parte con hormigón sin mejorar y otro con hormigón mejorado a fin de examinar sus comportamientos, y demostrar las conclusiones a las que se quería llegar.

CAPÍTULO II – MARCO CONCEPTUAL

2.1 Antecedentes

En enero del 2010 la Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui realizó un proyecto de investigación sobre “Durabilidad del Concreto Armado en viviendas de zonas costeras por acción del medio ambiente en la conurbación Barcelona, lechería, puerto la cruz y guanta del estado Anzoátegui”.

La universidad politécnica de Madrid realizó un trabajo de investigación sobre la predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de la resistividad eléctrica:

El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado (*Pérez López, del Valle Moreno, & Martínez Madrid, 2001*).

La universidad politécnica de Madrid realizó un trabajo de investigación sobre corrosión de la armadura de hormigón en ambientes marino: zona de carreras de mareas y zonas sumergidas.

Influencia de la composición de distintos hormigones en los mecanismos de transporte de iones agresivos procedentes de medios marítimos. (*Mahmoud Abdelkader, 2010*)

2.2 Marco Teórico

2.2.1 El hormigón armado

Según Construmática (www.construmatica.com) el concepto de acero, cemento y hormigón se define de la siguiente manera:

Hormigón armado es el complemento de dos materiales: acero y hormigón que reunidos en un material mixto, le dotan de la destacada resistencia a la tracción del primero y la buena resistencia a la compresión del segundo.

El acero de refuerzo, es una aleación hierro/carbono, que generalmente tiene un acabado superficial en relieve llamado corrugado.

El cemento portland puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto.

2.2.1.1 Materiales que constituyen el hormigón armado

Gravas

Se denomina grava a las partículas rocosas cuya media se encuentra contenida entre los 2 y 64 mm. Estas deben estar limpias y en caso contrario se deben lavar, pues las materias terrosas hacen disminuir la adherencia en grandes proporciones (Construmática).

Arena

Conjunto de partículas pequeñas de rocas que se acumulan en las orillas de mar o de los ríos, se usan para elaborar morteros y hormigones. La arena es una roca incoherente cuyos granos son inferiores a 5 mm (Construmática).

Cemento Portland

El Cemento Portland es el producto artificial resultante de calcinar hasta un principio de fusión mezclas rigurosamente homogéneas de Caliza y Arcilla, obteniéndose un cuerpo llamado clínquer, constituido por silicatos y aluminatos anhidros, el cual hay que pulverizar junto con el Yeso, en proporción menor al 3%, para retrasar su fraguado. Se emplean en hormigones de alta resistencia, en la elaboración de Elementos prefabricados y en algunas obras especiales. (Construmática).

Agua

Debido a que el agua ocupa un papel preponderante en las reacciones del cemento durante el estado plástico, el proceso de fraguado y el estado endurecido de un concreto o mortero. Este comentario pretende dar una visión generalizada acerca de las características que debe tener este vital elemento de la naturaleza desde el punto de vista de la tecnología del concreto. El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado. (De Guzmán, D.S., 2009)

Agua de mezclado

El agua de mezclado está definida con la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta eficientemente hidratada, con un fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. (De Guzmán, D.S., 2009)

La pasta de cemento, inmediatamente se mezclan los materiales, es una mezcla plástica de cemento y agua que va adquiriendo nueva estructura conforme se produce la hidratación del cemento. Esta nueva estructura es la formación del llamado gel de cemento y la redistribución del agua dentro de la pasta. En una porción de pasta hidratada, al aguar se encuentra en dos formas básicas, a saber: agua de hidratación (no evaporable) y agua evaporable. (De Guzmán, D.S., 2009)

Agua de hidratación

El agua de hidratación es aquella parte del agua original de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida del gel. Es también llamada no evaporable porque en una porción de pasta hidratada se conserva a 0% de humedad del ambiente y 110 °C de temperatura. (De Guzmán, D.S., 2009)

Agua evaporable

El agua restante que existe en la pasta, es agua que puede evaporarse a 0% de humedad relativa del ambiente y 110 °C de temperatura, pero no se encuentra libre en su totalidad. El gel de cemento cuya característica sobresaliente es un enorme desarrollo

Superficial interno, ejerce atracción molecular sobre una parte del agua evaporable y la mantiene atraída. (De Guzmán, D.S., 2009)

Agua de adsorción

Es una capa molecular de agua que se halla fuertemente adherida a las superficies del gel por fuerza intermolecular de atracción. El agua adsorbida, cuyas distancias con respecto a la superficie del gel están en el intervalo de 0 a 30 A (un Angstrom A= 0.000001 mm), es llamada también “agua activa” por su influencia en el comportamiento del concreto bajo carga. (De Guzmán, D.S., 2009)

Agua de curado

El curado puede definirse con el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate en el concreto alcance sus propiedades potenciales. Estas condiciones se refieren básicamente a la humedad y la temperatura. (De Guzmán, D.S., 2009)

Por lo tanto, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento. En el primer lugar, este suministro adicional depende de la humedad del ambiente, ya que la evaporación del agua libre de la pasta ocurre con tanta mayor rapidez cuanto menor es la humedad relativa del ambiente.

En segundo lugar, el agua y el cemento al mezclarse ocupan un espacio inicial que permanece constante y que tiende a ser llenado gradualmente por los productos de hidratación (gel). Como estos desarrollaron un volumen que es dos veces mayor que el del cemento original, resultado que con reacciones agua-cemento demasiado baja puede

no haber espacio suficiente en la pasta para acomodar todo el gel potencialmente desarrollable y completa hidratación de cemento no llega a producirse por esta limitación. (De Guzmán, D.S., 2009)

En tercer lugar, el agua químicamente combinada con el cemento (agua no evaporable) tiene una densidad mayor que el agua capilar. Esto significa que, en un momento dado, puede ser mayor el espacio que ha dejado libre en los poros capilares, que aquel con el que ha contribuido a formar el gel. Si no existe aportación de agua exterior para suplir este déficit, la hidratación se vuelve más lenta, e incluso se detiene.

Aditivos

Aditivos para concreto

Hoy en día, los aditivos son considerados un ingrediente más del concreto y son empleado para modificar las propiedades de este, de tal modo que se lo hagan más adecuado para las condiciones de trabajo o por economía. Para ello, en la actualidad se cuenta con toda suerte de aditivos que cumplen diversos fines dentro del concreto. Según el comité ACI-212, un aditivo se puede definir como un material distinto al agua, agregados y cemento hidráulico, que se usa como ingrediente en concretos o morteros u se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Desarrollo del empleo de aditivos

Desde la época de los romanos se emplearon aditivos agregados al concreto de cal y puzolanas. Se cree que los primeros aditivos fueron la sangre de toro y la clara de huevo, los cuales se utilizaron para mejorar las características de la mezcla en estado

plástico. Posteriormente, después de la creación del prototipo de cemento portland moderno, se vio la necesidad de obtener unos fraguados más regulares en el cemento, para los cuales se utilizó yeso crudo o el cloruro de calcio, que se agregaban al cemento o al concreto en el momento de mezclado. La incorporación de estos productos se remonta a los años 1875 a 1890; en esa época, los albañiles franceses añadían el cemento sin yeso crudo, un poco de yeso vivo, a pie de obra, en el momento de mezclar el concreto. En el año de 1885 fue patentada la adición de cloruro de calcio como aditivo y en 1888 Candlot demostró que, según dosis, este podía ser utilizado como acelerante o de fraguado. (De Guzmán, D.S., 2009)

Adiciones minerales (Microsílice)

La adición más utilizada en la fabricación del concreto de alta resistencia es el humo de sílice o microsíllice SiO_2 , la cual es obtenida en hornos de arco eléctrico en la industria del ferrosilicio, en donde se recogen los vapores de los óxidos de silicio después de condensarse los vapores a baja temperatura, dando lugar a sílice amorfa de área superficial muy elevada (20-25 m^2/g).



Ilustración 1. Microsílice, (López L.G. 2011)

2.2.1.2 Ventajas del hormigón armado

- El hormigón armado puede ser conformado en una variedad infinita de formas para fabricar vigas, columnas, cascarones.
- Presenta ventajas con respecto a la madera y las estructuras metálicas en los nudos o uniones, ya que estos desaparecen en el hormigón armado, al fabricarse elementos monolíticos con el mismo.
- El hormigón armado es un material que sirve para proteger la contra la acción de los agentes atmosféricos al construirse con él nudos y losas.
- Sostienen cargas fijas o móviles permitiendo el paso de vehículos y personas al emplearse en la construcción de autopistas, puentes, avenidas, viaductos y pisos.
- Resiste fuerzas horizontales cuando se emplea en presas, muros de contención y diques (Comarazamy, 1985).

2.3 Antecedentes históricos

En Francia tuvo su origen el hormigón armado. En 1854 el industrial Lambot descubre el interesante hecho, el aumento de resistencia del hormigón al armarlo con hierro y construye la primera embarcación con estos materiales, que aún se conserva y se exhibe en el Parque de Miraval (Halinco).

En 1861 el Ing. Coignet obtiene una patente ya para la ejecución de ciertas estructuras de hormigón armado. En 1867, J. Monier, obtiene también la patente para la construcción de cubos y tuberías con este material y consigue reducir notablemente los

espesores de las estructuras, debido a la adecuada y razonable distribución de la armadura metálica. (Halinco)

En los años posteriores al 1875 el Ing. Hennebic estudia científicamente este nuevo tipo de construcción y llega así a ejecutar obras de cierta importancia y magnitud (Halinco).

Recién en 1884 una Empresa constructora de Alemania adquiere los derechos de la patente perfeccionada de Monier para aplicar el hormigón armado en ese país. Más o menos en esta misma época el Ing. Emperger de la Universidad de Viena se interesa por el hormigón armado y lo estudia, aplicándole las leyes y reglas de la Mecánica aplicada a las Construcciones llega así a fundar la actual teoría del cálculo, basándose además en los resultados de numerosísimos ensayos mecánicos de estructuras de hormigón armado. Con todo derecho se le llama "abuelo del hormigón armado" (Halinc).

Paralelamente a los estudios e investigaciones de Emperger los profesores Mörsch y Probst, a su vez, contribuyeron eficazmente al estudio y perfeccionamiento de métodos de cálculo de este nuevo sistema de Construcción, llegando así estos investigadores y muy especialmente el ilustre profesor Dr. Ing. Marcus a formar una teoría científica para el cálculo del Hormigón Armado (Halinco).

En E.E.U.U. en el año 1875 se inician los ensayos de aplicación de este nuevo material en las construcciones. En ese año Ward aplica, por primera vez, el hormigón armado en la construcción de entresijos, como también Hyatt en varias clases de estructuras. Pero recién en el año 1890 se generaliza y se adopta este sistema de construcción en las obras en general (Halinco).

2.4 Durabilidad Del Hormigón Armado

El hormigón se comporta satisfactoriamente bajo exposiciones correspondientes a diferentes condiciones atmosféricas, a la mayoría de las aguas y suelos que contienen químicos, y bajo muchos otros tipos de exposiciones a agentes químicos. Sin embargo, existen algunos ambientes químicos en los cuales, a menos que se tomen medidas específicas, la vida útil aún del mejor hormigón será muy breve. Comprender estas condiciones permite tomar medidas para evitar el deterioro o reducir la velocidad con la cual se produce los daños en las estructuras. (ACI201).

Son escasas o nulas las circunstancias bajo las cuales el hormigón es atacado por agentes químicos sólidos secos. Para producir un ataque significativo sobre el hormigón, los químicos agresivos deben estar en solución y presentes en una concentración superior a una cierta concentración mínima. Un hormigón que está expuesto a soluciones agresivas a presión en uno de sus lados es más vulnerable que uno que no lo está, ya que la presión tiende a forzar la solución agresiva hacia el interior del hormigón. (ACI201).

El Comité ACI 515 (515.1R) y la Asociación del Cemento Pórtland (Portland Cement Association 1968) han tabulado los efectos de numerosos agentes químicos sobre el hormigón. Biczok (1972) presenta una discusión detallada del deterioro que provocan los agentes químicos en el hormigón, la cual incluye datos obtenidos tanto en Europa como en Estados Unidos. (ACI201)

En la Tabla 2.1 se resumen los efectos que producen en el hormigón algunos agentes químicos habituales.

La Tabla 2.2 muestra los factores más importantes que afectan la capacidad del hormigón para resistir el deterioro, siempre que se tomen las debidas prevenciones al seleccionar los materiales utilizados para elaborar el hormigón y dosificar la mezcla. Por lo tanto, la Tabla 2.1 debe ser considerada apenas como una guía preliminar. (ACI201)

Algunos de los factores que provocan mayor preocupación son la exposición a los sulfatos, el agua de mar, la sal del agua de mar, los ácidos y la carbonatación. (ACI201)

Tabla 1. Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el hormigón (ACI 201, 2001)

Tabla 2.1 – Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el hormigón					
Velocidad del ataque a temperatura ambiente	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Otros
Rápida	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	–	Cloruro de aluminio	–
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio* > 20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gaseoso) Licor de sulfato
Lenta	Carbónico	–	Hidróxido de sodio* 10 a 20%	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro (gaseoso) Agua de mar Agua blanda
Despreciable	–	Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio* < 10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de cinc Cromato de sodio	Amoniaco (líquido)

* El efecto del hidróxido de potasio es similar al del hidróxido de sodio.

Tabla 2. Factores que afectan el ataque del hormigón por parte de los agentes químico(ACI 201, 2001)

Factores que aceleran o agravan el ataque	Factores que mitigan o demoran el ataque
1. Elevada porosidad debida a: <ul style="list-style-type: none"> i. Elevada absorción de agua ii. Permeabilidad iii. Vacíos 	1. Hormigón denso obtenido mediante: <ul style="list-style-type: none"> i. Correcta dosificación de la mezcla * ii. Contenido unitario de agua reducido iii. Mayor contenido de material cementicio iv. Incorporación de aire v. Compactación adecuada vi. Curado efectivo †
2. Fisuras y separaciones debidas a: <ul style="list-style-type: none"> i. Concentración de tensiones ii. Choque térmico 	2. Tensiones de tracción reducidas en el hormigón atribuibles a: ‡ <ul style="list-style-type: none"> i. Uso de armadura de tracción de tamaño adecuado y correctamente ubicada ii. Inclusión de puzolana (para reducir el aumento de temperatura) iii. Colocación de materiales adecuados en las juntas de contracción
3. Lixiviación y penetración de líquidos debido a: <ul style="list-style-type: none"> i. Flujo de líquidos § ii. Formación de charcos iii. Presión hidráulica 	3. Diseño estructural: <ul style="list-style-type: none"> i. Minimizar las áreas de contacto y turbulencia ii. Proveer membranas y sistemas con barreras protectoras ¶ para reducir la penetración

* La dosificación de la mezcla y el mezclado y procesamiento inicial del hormigón fresco determinan su homogeneidad y densidad.

† Si los procedimientos de curado son defectuosos se producirán fallas y fisuras.

‡ La resistencia a la fisuración depende de la resistencia y capacidad de deformación.

§ El movimiento de las sustancias perjudiciales que transportan agua aumenta las reacciones que dependen tanto de la cantidad como de la velocidad del flujo.

¶ Los hormigones que frecuentemente estarán expuestos a agentes químicos que se sabe producen un rápido deterioro del hormigón se deberían proteger con una barrera protectora resistente a dichos agentes químicos.

2.4.1 Mecanismos de deterioro en el Hormigón

El concreto reforzado, durante su vida útil puede estar sometido a diversos agentes y factores que causa su deterioro, entre dichos mecanismos de ataque al hormigón podemos mencionar los siguientes:

2.4.1.1 Ataque de Sulfato

Una de las formas más frecuentes de ataque químico al hormigón es la acción de los sulfatos. Se estima que el 75% de las publicaciones que tratan de la durabilidad del concreto se ocupan de este tema.

El ión sulfato aparece en mayor o menor proporción en todas las aguas libres subterráneas.

El contenido de ión sulfato de las aguas subterráneas es considerable en los terrenos arcillosos, constituyendo uno de los más importantes alimentos de los vegetales.

En zonas áridas los sulfatos se pueden presentar en las arenas como material de aporte y en rocas carbonatadas de origen sedimentario.

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio, y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad.

La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio Ca_3Al y el ferroaluminato tetracálcico Ca_4FeAl .

El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al hormigón a un estado quebradizo y hasta suave.

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferroaluminato tetracálcico, produciendo sulfoaluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

2.4.1.2 Ataque químico por sulfatos provenientes de fuentes externas al hormigón

Los sulfatos de sodio, potasio, calcio o magnesio que ocurren en la naturaleza, los cuales pueden atacar al hormigón endurecido, algunas veces se encuentran en el suelo y otras disueltos en el agua adyacente a las estructuras de hormigón. Las sales de sulfato en solución ingresan al hormigón y atacan los materiales cementicios. Si en una superficie expuesta al aire se produce evaporación, los iones sulfato se pueden concentrar cerca de dicha cara y aumentar el potencial de deterioro.

El agua que se utiliza en las torres de enfriamiento de hormigón también puede ser una potencial fuente de ataque por sulfatos debido a la evaporación, particularmente si estos sistemas utilizan cantidades relativamente pequeñas de agua de reemplazo. También puede haber iones sulfato en los materiales que contienen desechos industriales, tales como las escorias obtenidas del procesamiento de hierro, cenizas y aguas subterráneas que contienen estos materiales. (ACI201)

El agua de mar y los suelos costeros embebidos en agua de mar constituyen un tipo de exposición particular. Las dos consecuencias del ataque por sulfatos sobre los componentes del hormigón mejor conocidas son la formación de etringita (aluminato de calcio trisulfato 32-hidratado, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) y yeso (sulfato de calcio dihidratado, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La formación de etringita puede generar un aumento del volumen sólido, provocando expansión y fisuración. La formación de yeso puede provocar ablandamiento y pérdida de resistencia del hormigón. Sin embargo, la presencia de etringita o yeso en el hormigón no constituye por sí misma una indicación

de ataque por sulfatos; la evidencia de un ataque por sulfatos se debería verificar mediante análisis químicos y petrográficos. Si la solución de sulfatos que provoca el ataque contiene sulfato de magnesio, además de etringita y yeso se produce brucita ($Mg(OH)_2$, hidróxido de magnesio). Algunos de los procesos relacionados con los sulfatos pueden dañar al hormigón incluso sin expansión. Por ejemplo, un hormigón expuesto a sulfatos solubles puede sufrir ablandamiento de la matriz de la pasta o un aumento de su porosidad global; estos dos efectos pueden reducir su durabilidad. (ACI201)

2.4.1.3 Protección contra los ataques por sulfatos

La protección contra los ataques por sulfatos se logra utilizando hormigones que retrasen el ingreso y el movimiento del agua e ingredientes adecuados para producir hormigones que tengan la resistencia a los sulfatos necesaria. El ingreso y el movimiento del agua se reducen disminuyendo la relación agua/cemento (a/c). Se debe tener cuidado para asegurar que el cemento de hormigón se diseñe y construya de manera tal de minimizar la fisuración por contracción. Incorporar aire resulta beneficioso si es acompañado por una reducción de la relación agua/cemento (a/c) (Verbeck 1968). Para minimizar el ingreso y el movimiento del agua, la cual es la portadora de las sales agresivas, es fundamental colocar, compactar, acabar y curar el hormigón adecuadamente. Las normas ACI 304R, ACI 302.1R, ACI 308.1, ACI 305R y ACI 306R recomiendan procedimientos para realizar estas operaciones.

La resistencia a los sulfatos del cemento p \acute{o} rtland generalmente disminuye cuando aumenta el contenido calculado de aluminato tricalcico (Ca_3Al) (Mather 1968).

La norma ASTM C 150 incluye al cemento resistente a los sulfatos Tipo V, para el cual el contenido máximo calculado de aluminato tricalcico Ca_3Al permitido es de 5%, y el cemento moderadamente resistente a los sulfatos Tipo II, para el cual el contenido máximo calculado de aluminato tricalcico Ca_3Al permitido está limitado a 8%. También hay algunas evidencias que indican que la alúmina presente en la fase aluminoferrítica del cemento pórtland podría participar en los ataques por sulfatos. En consecuencia, la norma ASTM C 150 establece que en el cemento Tipo V el contenido de $Ca_4Al+2Ca_3Al$ no debe ser mayor que 25%, a menos que se invoque el requisito alternativo que se basa en el uso del ensayo de comportamiento ASTM C 452 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate. En el caso del cemento Tipo V, en lugar de los requisitos químicos se puede utilizar el ensayo de expansión por sulfatos ASTM 452 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland Cement Mortars Exposed to Sulfate (Mather 1978b). Patrias (1991) discute el uso de ASTM C 1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. (ACI201)

En obra, las condiciones de exposición del hormigón a los sulfatos son muchas y muy variables. Entre otros factores, la agresividad de las condiciones depende de la saturación del suelo, del movimiento del agua, de la temperatura y la humedad ambiente, de la concentración de los sulfatos y del tipo de sulfato o combinación de sulfatos involucrados. Dependiendo de estas variables, generalmente las soluciones que contienen sulfato de calcio son menos agresivas que las que contienen sulfato de sodio Na_2SO_4 , las cuales a su vez en general son menos agresivas que las que contienen sulfato de magnesio Mg_2SO_4 . La Tabla 2.3 presenta criterios cuyo objeto es

maximizar la vida útil de los hormigones expuestos a las condiciones de exposición más agresivas. (ACI201)

Los hormigones de cemento pórtland también pueden ser atacados por soluciones ácidas, tales como el ácido sulfúrico H₂SO₄.

Tabla 3. Requisitos para proteger al hormigón contra los daños provocados por los ataques por sulfatos. (ACI 201, 2001)

Tabla 2.3 – Requisitos para proteger al hormigón contra los daños provocados por ataques por sulfatos provenientes de fuentes externas				
Severidad de la potencial exposición	Sulfato soluble en agua (SO ₄) ⁺	Sulfato (SO ₄) ⁺ en agua, ppm	w/c en masa, máx. ^{1,2}	Materiales cementicios requeridos
Exposición Clase 0	0,00 a 0,10	0 a 150	Ningún requisito especial para resistencia a los sulfatos	Ningún requisito especial para resistencia a los sulfatos
Exposición Clase 1	> 0,10 y < 0,20	> 150 y < 1500	0,50 ²	C 150 Tipo II o equivalente ³
Exposición Clase 2	0,20 a < 0,20	1500 a < 10.000	0,45 ²	C 150 Tipo V o equivalente ³
Exposición Clase 3	≥ 0,20	≥ 10.000	0,40 ²	C 150 Tipo V más puzolana o escoria ³
Exposición al agua de mar	–	–	Ver Sección 2.4	Ver Sección 2.4

* En los informes de los análisis químicos realizados sobre los cementos pórtland, el sulfato expresado como SO₄ se relaciona con el sulfato expresado como SO₃ de la siguiente manera: SO₃% × 1,2 = SO₄%

¹ El Capítulo 4 de la norma ACI 318 incluye requisitos para condiciones de exposición especiales, por ejemplo para el hormigón con armaduras de acero que puede estar expuesto a cloruros. Para los hormigones que probablemente estarán sujetos a estas condiciones de exposición, si es menor que el valor indicado en la Tabla 2.3, w/c debería ser como se especifica en el Capítulo 4 de ACI 318.

² Estos valores se aplican para el hormigón de peso normal. También se aplican al hormigón estructural liviano, excepto que las máximas relaciones w/c requeridas (es decir 0,50; 0,45 y 0,40) se deberían reemplazar por una resistencia a la compresión especificada a 28 días igual a 26, 29 y 33 MPa (3750, 4250 y 4750 psi) respectivamente.

³ En las Secciones 2.2.5, 2.2.6 y 2.2.9 se describen equivalentes para el caso de exposición Clase 1. En las Secciones 2.2.5, 2.2.7 y 2.2.9 se describen equivalentes para el caso de Exposición Clase 2. En las Secciones 2.2.5, 2.2.8 y 2.2.9 se presentan recomendaciones para las puzolanas y escorias para el caso de Exposición Clase 3.

Para evaluar la severidad de la potencial exposición del hormigón a cantidades perjudiciales de sulfatos se deberían tomar muestras del agua que podría llegar al hormigón o del suelo que podría ser lixiviado por el agua que se desplaza hacia el hormigón. El Apéndice A del ACI capítulo 4 presenta un procedimiento para preparar un demostrando que su expansión es 0,10% en un año al ser ensayados individualmente con cemento pórtland de acuerdo con la norma ASTM C 1012 Standard Test Method for Length Change of Hydraulic Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution en las siguientes mezclas: Para las cenizas finas o puzolanas

naturales, el extracto acuoso a partir de las muestras de suelo que se puede utilizar para analizar los sulfatos. Este extracto se debería analizar para determinar la presencia de sulfatos utilizando algún método adecuado según la concentración de sulfatos en la solución. (ACI201)

Para establecer la capacidad de las puzolanas y escorias para mejorar la resistencia a los sulfatos se requieren ensayos de un año de duración.

Una vez establecida esta propiedad para los materiales específicos, se pueden evaluar mezclas de los mismos para exposiciones Clase 1 y Clase 2 utilizando los criterios a 6 meses establecidos en las Secciones 2.2.6 y 2.2.7 de ACI capítulo 4. Se puede establecer que las cenizas finas, las puzolanas naturales, los vapores de sílice y las escorias son adecuadas para proveer resistencia a los sulfatos cemento pórtland de la mezcla de ensayo debería consistir en un cemento con un contenido de aluminato tricalcico Ca_3Al calculado según el método de Bogue mayor o igual que 7%. El contenido de ceniza fina o puzolana natural debería estar comprendido entre 25 y 35% en masa, calculado como porcentaje en masa del material cementicio total.

Para los vapores de sílice, el cemento pórtland de la mezcla de ensayo debería consistir en un cemento con un contenido dealuminato tricalcico Ca_3Al calculado según el método de Bogue mayor o igual que 7%. El contenido de vapores de sílice debería estar comprendido entre 7 y 15% en masa, calculado como porcentaje en masa del material cementicio total. (ACI201)

2.4.1.4 Ataque físico por sales

Se han informado algunos ejemplos en obra (Reading 1975; Tuthill 1978; Haynes y O'Neill 1994; Haynes et al. 1996) en los cuales se ha producido deterioro debido a la acción física de las sales del agua subterránea que contenía sulfato de sodio Na_2SO_4 , carbonato de sodio Na_2CO_3 y cloruro de sodio NaCl . Este mecanismo aún no se comprende completamente, pero Hansen (1963), Folliard y Sandberg (1994), Haynes y O'Neill (1994), Haynes et al. (1996) y Marchand y Skalny (1999) han discutido posibles mecanismos. El mecanismo del ataque físico por sulfato de sodio Na_2SO_4 o magnesio MgSO_4 podría ser similar al utilizado en el ensayo de Brard (Schaffer 1932), el cual constituye la base de la norma ASTM C 88 Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. Los daños típicamente ocurren en las superficies expuestas del hormigón húmedo que están en contacto con suelos que contienen las sales mencionadas. Una vez disueltas, los iones se pueden transportar a través del hormigón y luego concentrarse y precipitar en la superficie expuesta. Los daños se producen en forma de escamas superficiales de aspecto similar a las producidas por los ciclos de congelamiento y deshielo. La pérdida del hormigón expuesto es progresiva; una exposición continua, provocada por cambios cíclicos de humedad o temperatura, puede llevar a la desintegración total de un hormigón de baja calidad. Numerosos ciclos de deshidratación y rehidratación de las sales provocadas por variaciones cíclicas de la temperatura aceleran este deterioro. (ACI201)

El problema se puede mitigar adoptando medidas para minimizar el movimiento del agua dentro del hormigón. Aunque incorporar aire también puede ser beneficioso, esta

práctica no sustituye el uso de hormigones con una relación agua/cemento (a/c) adecuadamente baja para reducir la velocidad de desplazamiento de la humedad dentro del hormigón. Para mejorar la durabilidad, Haynes et al. recomiendan utilizar una máxima relación agua/cemento(a/c) de 0,45 junto con una puzolana. El adecuado curado del hormigón es también una importante medida preventiva. Para reducir el ingreso de humedad al hormigón también se recomienda utilizar barreras de vapor y un drenaje adecuado para mantener el agua alejada del hormigón. Para proteger al hormigón contra este tipo de ataques, el grupo de medidas mencionadas se considera más efectivo que utilizar algún tipo específico de cemento o aditivo. (ACI201)

2.4.1.5 Ataque por Ácidos

En general, el cemento pórtland no tiene una buena resistencia a los ácidos; no obstante, puede tolerar algunos ácidos débiles, particularmente si la exposición es ocasional. (ACI201)

Los productos de la combustión de numerosos combustibles contienen gases sulfurosos que se combinan con la humedad para formar ácido sulfúrico H_2SO_4 . Además, es posible que se acumulen aguas residuales en condiciones tales que provoquen la formación de ácidos. El agua de drenaje de ciertas minas y ciertas aguas industriales pueden contener o formar ácidos que atacan al hormigón. (ACI201)

Los suelos arcillosos y los esquistos aluminosos pueden contener sulfuro de hierro FeS_2 (pirita) que, al oxidarse, genera ácido sulfúrico H_2SO_4 . Mediante reacciones adicionales pueden producir sales de sulfato, las cuales generan ataques por sulfatos

(Hagerman y Rozar 1955; Lossing 1966; Bastiensen, Mourn y Rosenquist 1957; Mourn y Rosenquist 1959). (ACI201)

En ocasiones los arroyos de montaña son levemente ácidos debido a la presencia de dióxido de carbono CO_2 libre en disolución. Generalmente, si el hormigón es de buena calidad y tiene una baja absorción, estas aguas sólo atacan su superficie. Algunas aguas minerales que contienen grandes cantidades, ya sea de dióxido de carbono CO_2 y/o sulfuro de hidrógeno H_2S en disolución pueden dañar severamente cualquier hormigón (RILEM 1962; Thornton 1978). En el caso del sulfuro de hidrógeno H_2S , las bacterias que convierten este compuesto en ácido sulfúrico H_2SO_4 pueden tener un papel importante (RILEM 1962). (ACI201)

Los ácidos orgánicos que se originan en los silos utilizados para almacenar productos agrícolas o en instalaciones de industrias manufactureras o procesadoras tales como las cervecerías, lecherías, plantas de enlatado y molinos de pulpa de madera, pueden provocar daños superficiales. Esto puede representar una preocupación particularmente importante en el caso de las losas de piso, aun cuando la integridad estructural no resulte afectada. (ACI201)

(Biczok 1972). Los ácidos oxálicos $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ y fosfórico H_3PO_4 son excepciones, ya que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y no pueden ser fácilmente eliminadas de las superficies de hormigón.

En el caso del ataque por ácido sulfúrico H_2SO_4 , el deterioro producido es mayor o acelerado, ya que el sulfato de calcio formado afectará al hormigón. Si a través de las fisuras o poros del hormigón pueden ingresar ácidos, cloruros u otras soluciones

salinas agresivas, es posible que las armaduras de acero sufran corrosión (Capítulo 4), la cual a su vez provocará fisuración y descantillado del hormigón.

Un hormigón denso con una baja relación agua/cemento (a/c) proporciona algún grado de protección contra el ataque por ácidos. Ciertos materiales puzolánicos, y los vapores de sílice en particular, aumentan la resistencia del hormigón a los ácidos (Sellevold y Nilson 1987). Sin embargo, en todos los casos el tiempo de exposición a los ácidos se debería minimizar tanto como sea posible y se debería evitar la inmersión.

Independientemente de su composición, ningún hormigón de cemento hidráulico puede soportar durante mucho tiempo un agua fuertemente ácida ($\text{pH} \leq 3$).

En estos casos se debería utilizar un sistema de barrera protectora o tratamiento adecuado. ACI 515.1R Guide to the Use of Waterproofing, Dampproofing, Protective, and Decorative Barrier Systems for Concrete, contiene recomendaciones sobre barreras protectoras para proteger al hormigón contra diferentes compuestos químicos. El Capítulo 7 discute los principios generales que involucra el uso de estos sistemas.

2.4.1.6 Carbonatación

Cuando un hormigón o mortero está expuesto a dióxido de carbono CO_2 se origina una reacción que produce carbonatos; esta reacción es acompañada por contracción.

Virtualmente todos los elementos constitutivos del cemento pórtland hidratado son susceptibles de carbonatación. El deterioro que los ácidos provocan en extensión de la carbonatación y del ambiente al cual el hormigón es fundamentalmente el resultado de una reacción entre estos compuestos químicos y el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del

cemento pórtland hidratado. (Cuando se utilizan calizas o agregados dolomíticos, éstos también están sujetos al ataque por ácidos.) En la mayoría de los casos, la reacción química da por resultado la formación de compuestos de calcio solubles en agua que posteriormente son lixiviados por las soluciones acuosas está expuesto el cemento. Por otra parte, una carbonatación intencional durante su producción puede mejorar la resistencia, dureza y estabilidad dimensional de los productos de hormigón. Sin embargo, en otros casos la carbonatación puede provocar el deterioro y una disminución del pH de la pasta cementicia, provocando la corrosión de las armaduras próximas a la superficie. La exposición al dióxido de carbono (CO_2) durante el proceso de endurecimiento puede afectar la superficie acabada de las losas, dejando una superficie blanda, polvorienta y menos resistente al agua. El uso de calefactores sin ventilación o la exposición a los gases de escape de las maquinarias o de otras fuentes durante el proceso de endurecimiento puede producir superficies altamente porosas susceptibles a los ataques químicos.

La fuente de dióxido de carbono (CO_2) puede ser la atmósfera o bien agua que transporta CO_2 en disolución.

La reacción del cemento pórtland hidratado con el dióxido de carbono (CO_2) del aire es generalmente un proceso lento (Ludwig 1980). Este proceso depende fuertemente de la humedad relativa ambiente, la temperatura, la permeabilidad del hormigón y la concentración de dióxido de carbono (CO_2). Las mayores tasas de carbonatación se producen cuando la humedad relativa se mantiene entre 50 y 75%. Para humedad relativa menor que 25%, el grado de carbonatación que ocurre se considera insignificante (Verbeck 1958). Si la humedad relativa es mayor que 75%, la humedad

presente en los poros restringe la penetración de dióxido de carbono (CO_2). Los hormigones relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los hormigones densos, bien compactados y curados. Una menor relación agua/cemento (a/c) y una buena compactación reducen la permeabilidad y limitan la carbonatación a la superficie. (ACI201)

El dióxido de carbono (CO_2) absorbido por la lluvia ingresa al agua subterránea en forma de ácido carbónico H_2CO_3 . La putrefacción de la vegetación puede aportar dióxido de carbono (CO_2) adicional, junto con ácido húmico, lo cual puede provocar elevados niveles de dióxido de carbono (CO_2) libre. Aunque en general estas aguas son ácidas, su agresividad no puede ser determinada exclusivamente en base al pH.

La reacción con los carbonatos presentes en el suelo produce un equilibrio con bicarbonato de calcio CaCO_3 que puede resultar en soluciones de pH neutro pero que sin embargo contienen cantidades significativas de dióxido de carbono (CO_2) agresivo (Lea 1971). Tasa de ataque, similar a la del ataque por el dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera, depende de las propiedades del hormigón y de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) agresivo. Debido a la amplia variedad de condiciones en las construcciones subterráneas, en este momento no existe consenso en cuanto a establecer valores limitantes. Sin embargo, algunos estudios han concluido que el agua que contiene más de 20 partes por millón (ppm) de dióxido de carbono (CO_2) agresivo pueden provocar la rápida carbonatación de la pasta cementicia hidratada.

2.5 Corrosión de las Armaduras

En las obras de hormigón armado y especialmente en aquellas que están situadas en las proximidades del mar, en atmósferas salinas, o en lugares muy húmedos y con atmósferas contaminadas, es muy frecuente que aparezcan fisuras debidas a la corrosión de las armaduras.

La corrosión de los aceros en el hormigón armado tiene dos inconvenientes importantes: producir disgregaciones en el hormigón y debilitar la sección resistente de las barras.

Podemos considerar la corrosión bajo el aspecto químico y electroquímico. (Escalante 2010).

2.5.1 Corrosión Química

Es la que menos se presenta en el hormigón armado, ya que se suelen dar todas las condiciones para que la corrosión se haga por vía electroquímica.

2.5.2 Corrosión Electroquímica

Esta es la que más se presenta en el concreto armado, siendo esta un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, hará que este tipo de corrosión pueda tener lugar. (BERMÚDEZ 2007).

La corrosión se localiza en un principio en puntos que actúan como ánodos, dando lugar a la corrosión localizada aunque luego llegue a extenderse a toda la formando la corrosión generalizada. (BERMÚDEZ 2007)

Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden generar de dos formas: a.) cuando se colocan dos metales diferentes dentro del concreto, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existen variaciones significativas en las características superficiales del acero; b.) debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno. (BERMÚDEZ 2007)

Como consecuencia uno de los dos metales (o algunas partes del metal si sólo hay uno) se convierte en anódico y el otro en catódico, produciéndose una celda electroquímica. (BERMÚDEZ 2007)

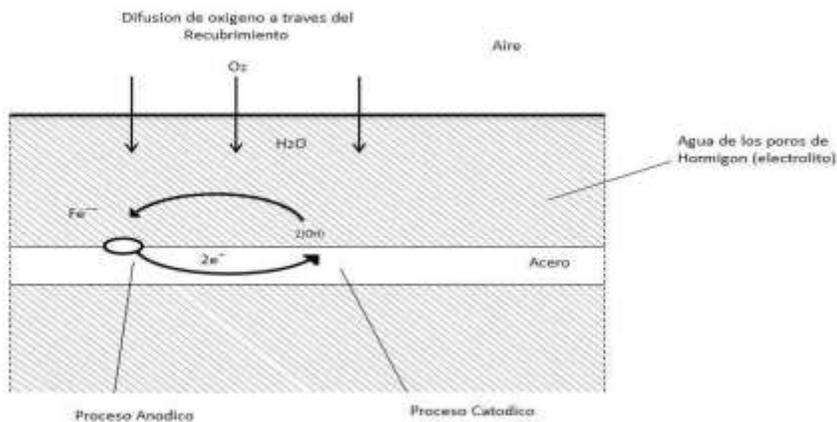
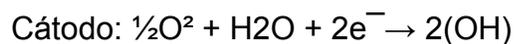
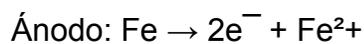


Ilustración 2. Corrosión de las armaduras en el hormigón. (BERMÚDEZ 2007)

En la corrosión del acero dentro del hormigón, el proceso anódico no puede producirse hasta que la capa protectora del acero se elimina en un ambiente ácido (por ejemplo, por carbonatación del hormigón) o se hace permeable por la acción de los iones de cloruro. (BERMÚDEZ 2007)

El proceso catódico no se produce hasta que en la superficie del acero se dispone de una cantidad suficiente de oxígeno y agua. Las reacciones son:



En la superficie del acero, las áreas que actúan como ánodo y como cátodo pueden estar muy próximas, a distancias medianas, e incluso a distancias relativamente grandes. En consecuencia si el concreto está lo suficientemente húmedo.

Para garantizar la conexión electrolítica, la corrosión puede ocurrir incluso en áreas de la estructura donde sea difícil el acceso directo del oxígeno a la superficie de la armadura. (BERMÚDEZ 2007)

2.6 El Mar Dominicano

La República Dominicana está rodeada por el Océano Atlántico, en el norte, y el Mar Caribe o Mar de las Antillas, en el sur. Ambos mares se unen por el Canal de la Mona, que se encuentra al este y que separa la isla de Puerto Rico.

Las masas de agua que bañan las costas dominicanas son muy calientes durante todo el año (26° C de media). La variación de un mes a otro es reducida, oscilando entre 24

y 29° C. Los meses más "fríos" son febrero y marzo y los más cálidos agosto y septiembre. El Mar Caribe es, durante todo el año, más caliente que el Océano Atlántico.

La salinidad de los mares dominicanos es, en general, muy alta (36 partes por mil), debido a la gran evaporación de la región, la cual es favorecida por el viento y las altas temperaturas del aire y de las aguas. La salinidad disminuye en la desembocadura de los ríos importantes y en las zonas de gran pluviometría, sobre todo después de lluvias abundantes; en la Bahía de Samaná, por ejemplo, la salinidad es de 33 partes por mil debido a las aportaciones de agua dulce del Río Yuna y las lluvias de los Alisios.

Las aguas marinas dominicanas tienen un bajo contenido de oxígeno (5 mililitros/litro), lo cual está relacionado con las altas temperaturas y salinidad de estos mares.

Nuestras costas están bañadas por las aguas que desplazan las Corrientes Ecuatoriales del Norte y Sur que, con pequeñas variantes, se desplazan de este a oeste. (Marcano)

2.7 Clasificación de zonas expuestas en los elementos estructurales

Las estructuras en ambiente marino pueden clasificarse según su ubicación y las condiciones agresivas del medio, en las siguientes zonas, cuyas fronteras en la realidad no son definidas:

2.7.1 Zona de inmersión

El concreto que se encuentra permanentemente sumergido por debajo de las zonas de mareas, es capaz de proteger las barras de acero de refuerzo pues debido a la débil concentración de oxígeno en el agua que impide la actividad corrosiva del ión cloruro, en el caso de haberse introducido hasta las barras.

En las zonas sumergidas, la penetración del agua tiene lugar inicialmente por succión capilar y se acelera en razón de la presión hidráulica, el agua ingresa con sustancias disueltas como el cloro y los sulfatos.

En estos casos el comportamiento del concreto a la corrosión se diferencia según la profundidad en que se encuentra. En las zonas más profundas, la permeabilidad del concreto disminuye, pues se cierran los poros superficiales.

2.7.2 Zona de marea

Comprende los elementos entre los niveles de marea alta y baja, donde el concreto está permanentemente húmedo, debido a que la inmersión es cíclica en el lapso de un día.

Los poros se encuentran saturados, pues, el tiempo de baja marea es reducido y no se produce la desecación, lo que disminuye el peligro de corrosión, pues el concreto absorbe agua más rápidamente que la pierde. En esta zona el agua ingresa por succión capilar, transportando las sustancias disueltas como el cloro y los sulfatos, sin difusión de gases.

En el concreto comprendido entre mareas, se pueden producir fisuras que adelanten la corrosión, sea por golpes de impacto o por la acción de las olas.

2.7.3 Zona de salpicaduras

Se ubica por encima del nivel de la marea alta, propensa a la salpicadura de las olas y el baño de la espuma, presenta el riesgo de ciclos alternados de humidificación y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del medio, que pueden afectar severamente el concreto.

En el período húmedo se produce el ingreso del ión cloruro por difusión, 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.

En esta zona de abundante oxígeno, la corrosión por cloro puede darse conjuntamente con la corrosión por carbonatación.

2.7.4 Zona de Ambiente Marino

El concreto no está en contacto con el agua de mar, pero recibe las sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina.

Puede comprender muchos kilómetros al interior de la costa dependiendo de la característica de los vientos dominantes.

Las construcciones de concreto ubicadas en el litoral o alrededores, 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 esta zona la corrosión produce fallas características en el concreto, como fisuras, grietas y desprendimientos del revestimiento, pero además, causa un peligroso daño invisible, que afecta las estructuras en casos de sismos. En efecto, los cloruros de la brisa marina atacan la estructura reduciendo la sección del acero de refuerzo, de manera que cuando recibe solicitaciones por efecto del sismo, únicamente puede soportar una pequeña parte de la carga de diseño.

En las estructuras aéreas los poros mayores del concreto generalmente se llenan de aire pero cuando la humedad ambiente es mayor, la superficie de los poros se cubre con una capa de agua adsorbida. Los cloruros disueltos se difunden a través de esta capa de agua que recubre las paredes de los poros o a través de los poros llenos de agua; si la cantidad de agua es menor, entonces la cantidad de difusión se reduce. El transporte de las sustancias disueltas en el agua es un proceso de difusión por la humedad del aire, inducido por la gradiente de tensiones. (González, M., (1998).)

2.8 Ensayo Rápido de Permeabilidad de Cloruros (RCPT)

Principio

Un espécimen saturado en agua, 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, es posicionado en una celda conteniendo una reserva de fluidos en ambos lados. Para el RCPT o Prueba Coulomb, una reserva es llenada con una solución de 3 % Cloruro de

Sodio NaCl y la otra con solución 0.3N Hidroxido de Sodio NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con cloruro de sodio NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con hidróxido de sodio NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migraran hacia la terminal positiva. (ASTM C-1202)

Entre más permeable sea el concreto, mas iones cloruro viajara a través de él espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente es medida por 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulomb que pasaron a través del espécimen. (ASTM C-1202)

Los valores de la cantidad de Coulomb se utilizan para caracterizar el concreto como sigue (ASTM C 1202) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration:

Tabla 4. Clasificación del Hormigón de acuerdo a la carga total

Coulombs	Clase de Permeabilidad	Típico de
>4000	Alta	a/c > 0.50
4000-2000	Moderada	a/c = 0.40 a 0.50
2000-1000	Baja	a/c < 0.40
1000-100	Muy Baja	Concreto modificado con látex
<100	Insignificante	Concreto Polimérico

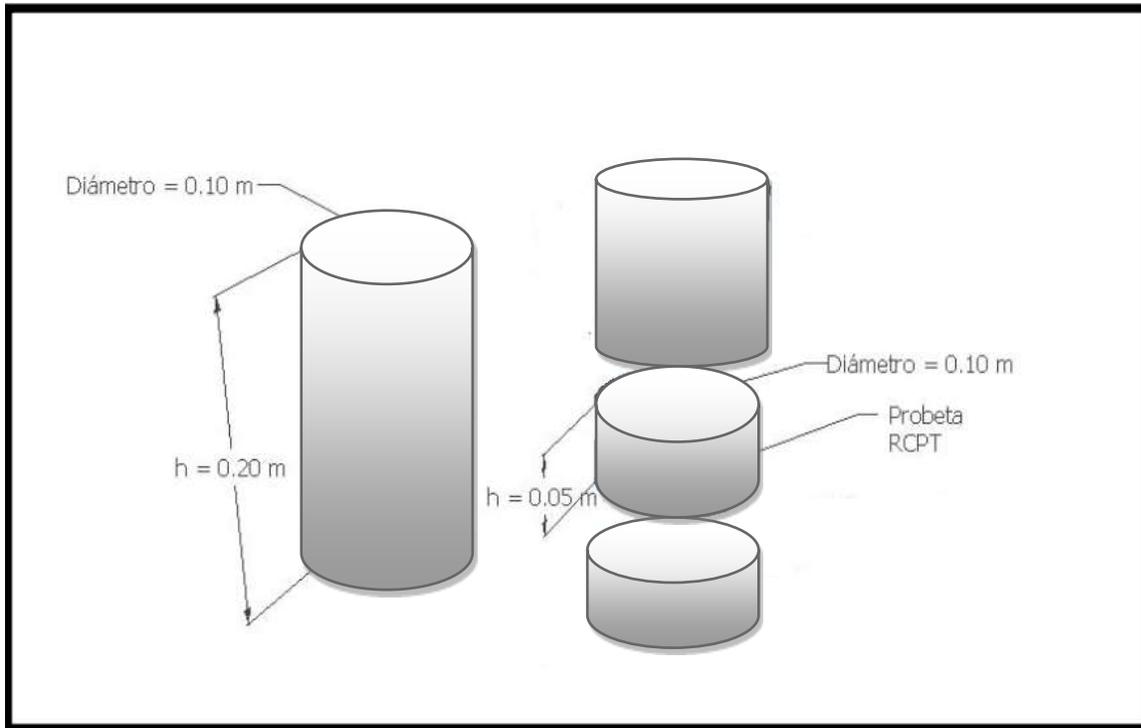


Ilustración 3. Esquema de la muestra seleccionada para el ensayo

Selección de la Muestra

Para la selección de la muestra se utiliza una sierra refrigerada por agua, haciendo un corte un $2 \pm 1/8$ pulg de largo y $(51 \pm 3 \text{ mm})$ diámetro, se selecciona una rebanada de la parte central del núcleo o cilindro, con un corte paralelo a la parte superior del núcleo. Como se muestra en la ilustración, esta rebanada será la muestra de ensayo. Para eliminar cualquier rugosidad en los extremos de la muestra se utiliza una lijadora de banda.

Acondicionamiento de la muestra

Se introduce la muestra en un recipiente de vacío, se sella el recipiente y se arranca la bomba de vacío. La presión debe disminuir a menos de 1 mm Hg (133 Pa) dentro de unos pocos minutos. Mantener la muestra desairándose durante 3 h. Con la bomba

todavía corriendo, abra la llave de paso del agua y drene el agua destilada y vierta suficiente agua en el recipiente para cubrir la muestra como se muestra en la ilustración (no permita la entrada de aire al recipiente a través de esta llave de paso).

Cerrar la llave de paso de agua y deje que la bomba de vacío funcione por una hora adicional. A continuación, apague la bomba. (Cambia la bomba a aceite si no se está utilizando una trampa de agua.) Abra el recipiente de vacío para permitir que el aire vuelva a entrar en él.

Retire la muestra del agua, secar el exceso de agua, y transfiera la muestra a una lata sellada u otro recipiente que mantendrá la muestra en 95% o más de humedad relativa.



Ilustración 4. Recipiente de vacío

Montaje de la Muestra

Montaje de la muestra (alternativa junta de goma): utilizar una junta de 4 in. De diámetro exterior por 3 in. Diámetro interior por un cuarto (1/4). (100 mm de diámetro exterior por 75 mm de diámetro interior por 6 mm) utiliza una junta de goma circular en cada celda de ensayo. Insertar la muestra y une las dos células de ensayo para sellar.

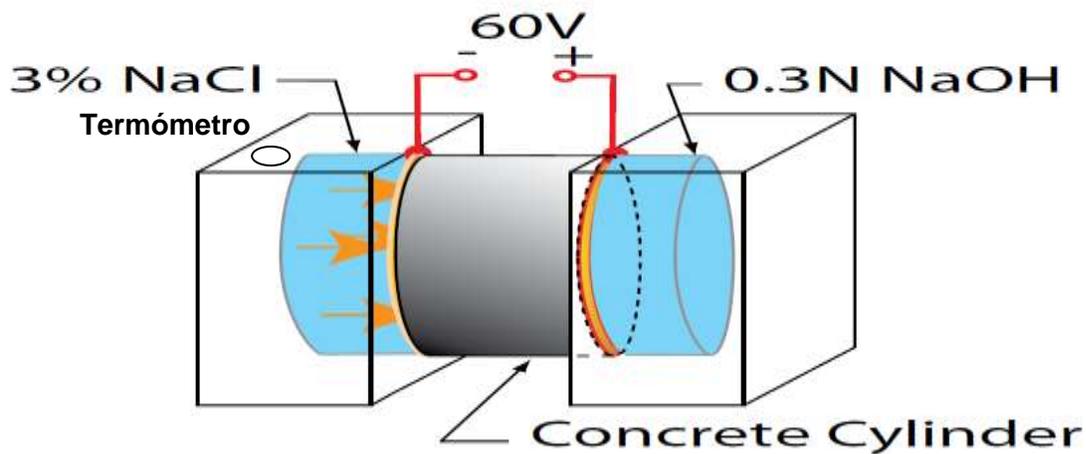


Ilustración 5. Esquema del ensayo RCPT

Llenar el lado de la celda que contiene la superficie superior de la muestra con una solución de Cloruro de sodio NaCl 3,0%. (Ese lado de la célula será conectado al terminal negativo de la fuente de alimentación, también de este lado es donde estará el termómetro.)

Llenar el otro lado de la celda (donde se conectara a el terminal positivo de la fuente de alimentación) con una solución de 0,3 N Hidróxido de Sodio NaOH.

Conectar los cables conductores a un conector banana. Haga las conexiones eléctricas para la aplicación de voltaje y el aparato de lectura de datos según el caso. Encienda la

fuente alimentadora, fije en $60,0 \pm 0.1$ V, y regístrela lectura inicial. La temperatura de la muestra, células aplicadores de voltaje y soluciones deberán operar en un rango de temperatura 68 a 77 ° F (20 a 25 ° C) en el momento que se inicia la prueba, es decir, cuando la fuente de alimentación está encendida Lea y registre las corrientes por lo menos cada 30 minutos. Si se utiliza un voltímetro en combinación con una resistencia derivada para la lectura de corriente, utilizar factores de escala apropiados para convertir la lectura de voltaje en amperios. Cada mitad de la célula de prueba debe permanecer llena con la solución apropiada para la totalidad del período de la prueba.

Alcance

Este método de ensayo cubre la determinación de la conductancia eléctrica del concreto para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro. Esta prueba método es aplicable a los tipos de concretos donde las correlaciones se han establecido entre este procedimiento de ensayo y a largo plazo procedimientos de retención de cloruro, tales como los descritos en AASHTO T259 Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration.

Significado y Uso

Este método de ensayo es adecuado para la evaluación de materiales y las proporciones de materiales para fines de diseño e investigación y desarrollo.

La edad de la muestra puede tener efectos significativos en los resultados de la prueba, dependiendo del tipo de hormigón y el procedimiento de curado. La mayoría de los

hormigones, con un curado adecuado, se convierten progresivamente y significativamente menos permeables con el tiempo.

Se debe tener cuidado en la interpretación de los resultados de esta prueba cuando se utiliza en hormigones con superficies tratadas, por ejemplo, hormigones tratados con selladores penetrantes. Los resultados de esta prueba en algunos de estos hormigones indican una baja resistencia a la penetración de iones de cloruro.

En este ensayo rápido de permeabilidad de cloruros (RCPT) se usó un equipo construido bajo las especificaciones del ASTM C-1202.



Ilustración 6. Equipo utilizado para el ensayo

2.9 Life-365

En mayo del 1998, ACI's Strategic Development Council (SDC) identificó la necesidad de desarrollar una herramienta para estimar el análisis de costo asociado al ciclo de vida de las estructuras de concreto expuestas a las condiciones que causan corrosión

en el acero de refuerzo. Con la intención de predecir su tiempo de vida útil, Este programa fue desarrollado por un grupo de empresa de décadas a la investigación de prolongar la vida del hormigón hidráulico. Estas fueron las empresas que se encargaron de desarrollar el programa:



Las nuevas tecnologías son la base de tener edificaciones de mejor calidad y mejor desempeño frente al intemperismo y los ataques de las aguas de mar, compañías como estas están en el camino del ingeniero para desarrollar nuevos aditivos, nuevas mejoras para que nuestras construcciones sean más seguras.

Este programa nos ayuda a tener una visualización del tiempo de vida del hormigón frente a la exposición de las sales y ver un análisis de costo por reparaciones en el tiempo.

CAPÍTULO III – MARCO METODOLÓGICO

3.1 Formulación de hipótesis

Dar a conocer las técnicas para realizar un hormigón de alta durabilidad frente a las condiciones de un ambiente costero.

3.2 Tipo de investigación

Investigación experimental:

Porque se realizaron ensayos en un laboratorio para demostrar la viabilidad de los métodos.

Investigación descriptiva:

Ya que se presenta de manera detallada todo el proceso desarrollado en los laboratorios y las conclusiones a las que se llegaron.

3.3 Enfoque de la investigación

Cuantitativo: porque se emplearon cálculos matemáticos e informáticos para poder avalar en las conclusiones como llegamos a las mismas.

3.4 Tiempo de ocurrencia de la investigación

El tiempo aproximado en el cual se desarrolló toda la investigación fue de 8 meses, de donde se partió de una investigación general hasta desarrollar los ensayos de lugar.

3.5 Método de investigación

En esta parte se emplearon las observaciones y la experimentación para llegar a las generalidades de hechos que se repiten una y otra vez.

3.6 Procedimiento

- * Búsqueda de información bibliográfica.
- * Elaboración del diseño de muestra experimental.
- * Realizar ensayo.
- * Obtención de resultados.
- * Análisis de datos.
- * Redacción del informe final.

3.7 Técnicas de investigación

En esta parte se describen los métodos utilizados para el desarrollo de la investigación de este proyecto.

3.7.1 Técnicas

La técnica a utilizar es la observación de laboratorio ya que se tiene un elemento estructural para observar sus comportamientos.

3.7.2 Instrumentos

Se usaron hojas de cálculos diseñadas en Excel para la obtención de los resultados finales.

Se utilizó el software life 365 para obtener de manera más resumida algunos datos que fueron necesarios para el desarrollo del estudio.

También se utilizaron palas, probetas, mezcladora, termómetros, tester, generador eléctrico, agua destilada y productos químicos de alto grado de pureza.

Generador Eléctrico.

Como instrumento electrónico se utilizó un generador eléctrico para generar 60v CD de corriente continua como se observa en la ilustración 7.



Ilustración 7. Generador Eléctrico

Bomba de Vacío y Desecador a Vacío



Ilustración 8. Bomba y Desecador de vacío para desairar las muestras

Cloruro de Sodio (NaCl) e Hidróxido de Sodio (NaOH).

Como materiales químicos se utilizaron elementos de calidad reactivo con un alto grado de pureza. Se utilizaron productos para realizar los ensayos RCPT. En la ilustración 9, se observa la presentación del Cloruro de Sodio NaCl.



Ilustración 9. Productos Químicos

Tabla 6. Granulometría del agregado fino

Proyecto: Hormigon Durable		Desc. Material: Arena lavada Gris									
Cliente: UNPHU		Procedencia: Tavarez Industrial									
Localización: San Cristóbal		Fecha: 6/26/2015									
COMPOSICION GRANULOMETRICA DEL MATERIAL (INDIVIDUAL)											
Muestra No.: M#1		Peso H. 2276.70									
Peso Seco: 2184.5		Peso Lav. Lavada <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Si									
Muestra No.: M#2		Peso H. 2276.40									
Peso Seco: 2179.9		Peso Lav. Lavada <input type="checkbox"/> No <input checked="" type="checkbox"/> Si									
TAMICES		acumulad	%			TAMICES		Peso	%		
Pulgadas	MM	o	Retenido	Acumulado	Que Pasa	Pulgadas	MM	retenido	Retenido	Acumulado	Que Pasa
3/4	19.1	0.00	0.00	0.00	100.00	3/4	19.1	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00	1/2	12.5	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00	3/8	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00
4	4.76	56.60	2.59	2.59	97.41	4	4.76	54.10	2.48	2.48	97.52
8	2.36	467.00	21.38	23.97	76.03	8	2.36	470.10	21.57	24.05	75.95
16	1.18	573.70	26.26	50.23	49.77	16	1.18	372.60	17.09	41.14	58.86
30	0.6	536.20	24.55	74.78	25.22	30	0.6	535.80	24.58	65.72	34.28
50	0.3	361.30	16.54	91.32	8.68	50	0.3	363.20	16.66	82.38	17.62
100	0.15	124.20	5.69	97.00	3.00	100	0.15	123.10	5.65	88.03	11.97
200	0.075	20.10	0.92	97.92	2.08	200	0.075	21.30	0.98	89.00	11.00
			0.00	3.40				0.00		3.04	

PROMEDIO					
TAMICES		Peso	%		
Pulgadas	MM	Acumulado	Retenido	Acumulado	Que Pasa
3/4	19.1				100.00
1/2	12.5				100.00
3/8	9.5				100.00
4	4.76				97.46
8	2.36				75.99
16	1.18				54.31
30	0.6				29.75
50	0.3				13.15
100	0.15				7.49
200	0.075				6.54

4.1.2 Gravedad específica y absorción

Tabla 7. Gravedad específica y absorción del agregado grueso.

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION AGREGADO GRUESO (ASTM C - 127)			
PROYECTO:	Hormigon Durable		
LOCALIZACION:	San Cristobal		
MATERIAL:	Gravilla Triturada Gris		
FECHA:	27/6/2015		
GRAVEDAD ESPECIFICA	MUESTRA 1	MUESTRA 2	PROMEDIO
A = PESO MUESTRA SECA , gr.	1067.1	1236.5	
B= PESO MUESTRA HUMEDA, gr.	1080.6	1252.6	
C= PESO MUESTRA SUMERGIDA, gr.	685.7	794.3	
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK = $\frac{A}{(B - C)}$	2.702	2.698	2.700
Gr . Esp. Bulk Sat. Sup. Seca = $\frac{B}{(B - C)}$	2.736	2.733	2.735
GRAVEDAD ESP. APARENTE = $\frac{A}{(A - C)}$	2.798	2.796	2.797
% DE ABSORCION = $\frac{(B - A)}{A} \times 100$	1.265	1.302	1.284

Tabla 8. Gravedad específica y absorción del agregado fino.

GRAVEDAD ESPECIFICA Y ABSORCION AGREGADO FINO (ASTM C - 128)				
PROYECTO:	Hormigon Durable			
LOCALIZACION:	San Cristobal			
MATERIAL:	Arena lavada Gris			
FECHA:	27/6/2015			
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
MATRAZ No.	9	K		
TEMPERATURA (°C)	25.0	25.2		
A = PESO MUESTRA SECA , gr.	255.900	255.860		
M= PESO MUESTRA HUMEDA, gr.	260.200	260.010		
B= PESO MATRAZ + AGUA A TEMPERATURA DE LA CURVA DE CALIBRACION, gr.	670.140	665.300		
C = PESO MATRAZ + AGUA + MUESTRA gr.	834.760	829.830		
GRAVEDAD ESPECIFICA BULK = $\frac{A}{(M + B - C)}$	2.677	2.680		2.679
Gr. Esp. Bulk Sat. Sup. Seca = $\frac{M}{(M + B - C)}$	2.722	2.723		2.723
GRAVEDAD ESP. APARENTE = $\frac{A}{(A + B - C)}$	2.803	2.801		2.802
% DE ABSORCION = $\frac{(M - A)}{A} \times 100$	1.680	1.622		1.651

4.1.3 Densidad suelta y varillada

Tabla 9. Densidad suelta y varillada del agregado grueso.

PROYECTO:	Hormigon Durable				
PROCEDENCIA DEL MATERIAL:	Mina Industria Tavarez				
MUESTRA NO. :	1				
DESCRIPCION DEL MATERIAL:	Gravilla Triturada				
FECHA:	26/6/15				
DENSIDAD SUELTA DEL MATERIAL (ASTM C-29)					
Envase No.	2	2	2		
Peso Mat. + Envase (kg)	15.685	15.663	15.660		
Peso de Envase (kg)	4.075	4.075	4.075	HUMEDAD DE LA MUESTRA	
Peso de Material (kg)	11.610	11.588	11.585	P. M. HUMEDA	2,277 g
Peso Mat. Sin Humedad (kg)	11.108	11.087	11.084	P. M. SECA	2,182 g
Volumen Envase (m³)	0.00835	0.00835	0.00835	PESO AGUA	94 g
Densidad Suelta (kg/m³)	1,330.31	1,327.79	1,327.44	CONT. HUMEDAD %	4.33 %
Promedio Densidad Suelta	1,328.6		(kg/m³)		
DENSIDAD VARILLADA DEL MATERIAL (ASTM C-29)					
Envase No.	2	2	2		
Peso Mat. + Envase (kg)	17.011	16.986	16.990		
Peso de Envase (kg)	4.060	4.060	4.060	HUMEDAD DE LA MUESTRA	
Peso de Material (kg)	12.951	12.926	12.930	P. M. HUMEDA	2,277 g
Peso Mat. Sin Humedad (kg)	12.391	12.367	12.371	P. M. SECA	2,182 g
Volumen Envase (m³)	0.00835	0.00835	0.00835	PESO AGUA	94 g
Densidad Suelta (kg/m³)	1,483.96	1,481.10	1,481.56	CONT. HUMEDAD %	4.33 %
Promedio Densidad Varillada	1,482.5		(kg/m³)		

Tabla 10. Densidad suelta y varillada del agregado fino.

PROYECTO:	Hormigon Durable				
PROCEDENCIA DEL MATERIAL:	Mina Industria Tavarez				
MUESTRA NO. :	2				
DESCRIPCION DEL MATERIAL:	Arena triturada				
FECHA:	26/6/15				
DENSIDAD SUELTA DEL MATERIAL (ASTM C-29)					
Envase No.	2	2	2		
Peso Mat. + Envase (kg)	16.756	16.721	16.715		
Peso de Envase (kg)	4.060	4.060	4.060	HUMEDAD DE LA MUESTRA	
Peso de Material (kg)	12.696	12.661	12.655	P. M. HUMEDA	2,704 g
Peso Mat. Sin Humedad (kg)	12.491	12.457	12.451	P. M. SECA	2,661 g
Volumen Envase (m ³)	0.00835	0.00835	0.00835	PESO AGUA	43 g
Densidad Suelta (kg/m ³)	1,496.00	1,491.88	1,491.17	CONT. HUMEDAD %	1.61 %
Promedio Densidad Suelta		1,493.3	(kg/m³)		
DENSIDAD VARILLADA DEL MATERIAL (ASTM C-29)					
Envase No.	2	2	2		
Peso Mat. + Envase (kg)	18.176	18.158	18.149		
Peso de Envase (kg)	4.060	4.060	4.060	HUMEDAD DE LA MUESTRA	
Peso de Material (kg)	14.116	14.098	14.089	P. M. HUMEDA	2,704 g
Peso Mat. Sin Humedad (kg)	13.888	13.871	13.862	P. M. SECA	2,661 g
Volumen Envase (m ³)	0.00835	0.00835	0.00835	PESO AGUA	43 g
Densidad Suelta (kg/m ³)	1,663.33	1,661.21	1,660.15	CONT. HUMEDAD %	1.61 %
Promedio Densidad Varillada		1,662.3	(kg/m³)		

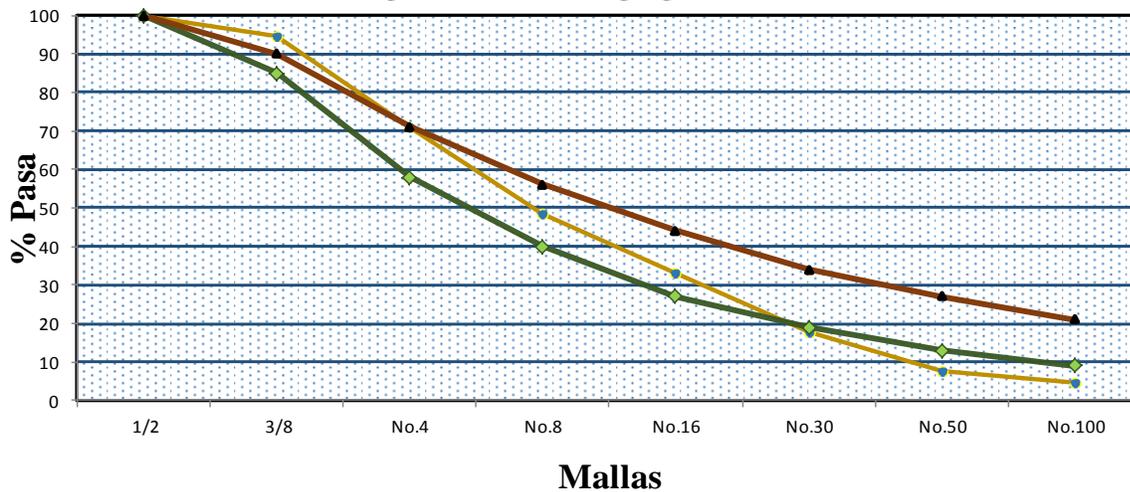
4.1.4 Combinación de los agregados y curva granulométrica (Diego Sánchez de Guzmán).

PROYECTO: Hormigon Durable

FECHA: 1/7/2015

Tamices		Agr 1	Agr 2	Agr 3	Agr 4	Comb 2	19.1 mm (1/2")	
Abertura	mm.	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	0.42	Limite	Limite
		Acum	Acum	Acum	Acum	0.58		
		Gr.1	Gr.2	Ar.1	Ar.2	0	Fino	Grueso
		Gravilla 1/2"	Arena gris lavada	-	-	0		
3	76.2					0	100	100
2	50.8					0	100	100
1 1/2	38.1	100.0	100.0			100	100	100
1	25	100.0	100.0			100	100	100
3/4	19	100.00	100.00			100	100	100
1/2	12.5	100.00	100.00			100	100	100
3/8	9.5	86.77	100.00			94	90	85
No.4	4.76	34.46	97.46			71	71	58
No.8	2.18	10.26	75.99			48	56	40
No.16	1.18	3.82	54.31			33	44	27
No.30	0.6	1.19	29.75			18	34	19
No.50	0.3	0.45	13.15			8	27	13
No.100	0.15	0.33	7.49			4	21	9

Curva granulométrica agregados combinados



4.2 Diseño De Mezcla de Hormigón Hidráulico

En las siguientes tablas presentamos los pesos que utilizamos para poder hacer el diseño de hormigón.

Tabla 11. Diseño de mezcla hormigón durable con adición de microsílíce

Objetivo de la Mezcla:		<i>Diseño de hormigon durable A/C 0.40</i>	
Asentamiento Objetivo		17	cm
Tamaño Máximo Agregado Grueso		19	mm
Contenido de Aire		20	Litros
Agua		180	Litros/m ³
Resistencia a Compresión f'c		-	Kg/cm ²
Desviación Standard		35	Kg/cm ²
Resistencia a Compresión f'cr		-	Kg/cm ²
Relación a/c		0.40	peso
Dosis Aditivo 1	Gl. 3030	6.0	cc/kg
Dosis Aditivo 2		0.0	cc/kg
Dosis Aditivo 3		0.0	cc/kg
Dosis Aditivo 4		0.0	cc/kg
Fibra		0	% cemento
Adición	Silica fume	8.000	% cemento
Reducción de Agua		0	%



Ilustración 10. Probeta de Hormigón con Microsílíce

Tabla 12. Diseño de mezcla hormigón con relación a/c 0.40.

Objetivo de la Mezcla:		<i>Diseño de hormigón con relación a/c 0.40</i>	
Asentamiento Objetivo		17	cm
Tamaño Máximo Agregado Grueso		19	mm
Contenido de Aire		20	Litros
Agua		180	Litros/m ³
Resistencia a Compresión f'c		-	Kg/cm ²
Desviación Standard		35	Kg/cm ²
Resistencia a Compresión f'cr		-	Kg/cm ²
Relación a/c		0.400	peso
Dosis Aditivo 1	P7325	6.0	cc/kg
Dosis Aditivo 2		0.0	cc/kg
Dosis Aditivo 3		0.0	cc/kg
Dosis Aditivo 4		0.0	cc/kg
Fibra		0	% cemento
Adición		0.000	% cemento
Reducción de Agua		0	%



Ilustración 11. Probetas de hormigón a/c 0.40

4.3 Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire

Al realizar los ensayos correspondientes para determinar la durabilidad del hormigón encontramos cambios significativos a la hora de utilizar el micro sílice como fue el contenido de aire en la mezcla mostrada en las siguientes imágenes:

Hormigón Durable con Microsílice

Tabla 13. Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire Hormigón Durable

Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de Aire (ASTM C 138)		
Peso Olla	Kg	3.47
Volumen de Olla	L	7.10
Peso Concreto + Olla	Kg	20.78
Peso Concreto Fresco	Kg	17.31
Peso Unitario	Kg/L	2.4380
Rendimiento Volumétrico	L	24.41
Rendimiento Relativo		0.976
Contenido de Cemento	Kg/m ³	460.857
Contenido de Aire	%	2.031

Hormigón Convencional a/c 0.40

Tabla 14. Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de aire Hormigón Convencional

Masa Unitaria, Rendimiento Volumétrico y Contenido de Aire (ASTM C 138)		
Peso Olla	Kg	3.47
Volumen de Olla	L	7.10
Peso Concreto + Olla	Kg	20.78
Peso Concreto Fresco	Kg	17.31
Peso Unitario	Kg/L	2.4380
Rendimiento Volumétrico	L	24.50
Rendimiento Relativo		0.980
Contenido de Cemento	Kg/m ³	459.112
Contenido de Aire	%	2.402

Con los datos observados nos damos cuenta que el hormigón durable ofrece menor contenido de aire que el convencional, aportando así más tiempo de vida a las obras de ingeniería. Este contenido de aire debe a la influencia del micro sílice en el diseño de nuestro hormigón mejorado.

4.4 Resultados de las Densidades

Tabla 15. Tabla de densidades del Hormigón convencional

Densidad Bulk (laboratorio)				
Peso aire (gr)	Peso SSS (gr)	Peso en agua (gr)	Volumen (cm³)	Densidad (gr/cm³)
3964.40	3970.90	2301.80	1669.10	2.375
3953.80	3955.50	2298.40	1657.10	2.386
3954.80	3960.90	2307.40	1653.50	2.392
3937.30	3945.10	2290.30	1654.80	2.379
Densidad Promedio				2.383

Tabla 16. Tabla de Densidades del hormigón con microsílíce

Densidad Bulk (laboratorio)				
Peso aire (gr)	Peso SSS (gr)	Peso en agua (gr)	Volumen (cm³)	Densidad (gr/cm³)
4049.40	4058.50	2382.50	1676.00	2.416
4028.80	4037.50	2368.20	1669.30	2.413
4043.10	4050.90	2376.50	1674.40	2.415
4057.40	4066.20	2387.50	1678.70	2.417
Densidad Promedio				2.415

Un hormigón con adición de Microsílíce incrementa su densidad y homogeneidad tabla 16, lo que les permite una mayor durabilidad de las estructuras al incrementar su impermeabilidad, incrementando así la resistencia química a los ataques del cloruro los sulfatos y la carbonatación, mejorando la protección de las armaduras.

4.5 Resultados de Rapid Chloride Permeability

Determinación de la Carga Total Pasante

Se realizó una prueba de penetración rápida de cloruros (RCPT) la cual tuvo una duración de 6 horas aplicando un potencial de 60V CD en dos tipos de muestras de hormigón diseñadas con las mismas características a diferencia de una que contenía una adición de un 8% de microsílíce, luego se procedió a calcular la carga pasante de acuerdo a la ecuación basada en la regla trapezoidal:

$$Q_x = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

Dónde:

Q_x = carga pasante (coulombs),

I_0 = corriente (amperes) inmediatamente el voltaje es aplicado,

I_t = corriente (amperes) al tiempo t después que el volteje es aplicado.

Si la muestra es de un diámetro diferente a 3.75 in el valor de la carga total pasante establecido deberá ser ajustado mediante la siguiente ecuación:

$$Q_s = Q_x \times \left(\frac{3.75}{x} \right)^2$$

Dónde:

Q_s = carga pasante (coulombs) atreves de una muestra de 3.75-in. (95-mm)

Q_x = carga pasante (coulombs) atreves un diámetro x in

x = diámetro (in.) de la muestra no estándar.

Imágenes ilustrativas de los diámetros de los especímenes



Diámetro (in) 3.82



Diámetro (in) 3.90



Diámetro (in) 3.82



Diámetro (in) 3.86

Nota:

Con este diámetro buscaremos el Q_s (carga total corregida), según el astm C-1202 para prueba de Rapid Chloride Permeability.

Resultados del RCPT en probetas de 35

Carga (Q_x)	954	
Diámetro(in)	3.82	
Relación a/c	0.40	
Muestra No.	7	
Código	B	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
l ₀	0.03	26
l ₃₀	0.04	26.3
l ₆₀	0.04	27
l ₉₀	0.04	26.9
l ₁₂₀	0.04	27
l ₁₅₀	0.04	26.5
l ₁₈₀	0.04	26.6
l ₂₁₀	0.05	26.5
l ₂₄₀	0.05	27.1
l ₂₇₀	0.05	27.5
l ₃₀₀	0.05	27.5
l ₃₃₀	0.05	27.7
l ₃₆₀	0.05	27.7

Carga (Q_x)	3852	
Diámetro(in)	3.9	
Relación a/c	0.40	
Muestra No.	7	
Código	A	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
l ₀	0.12	29
l ₃₀	0.14	29
l ₆₀	0.15	26
l ₉₀	0.16	26
l ₁₂₀	0.17	27
l ₁₅₀	0.18	33
l ₁₈₀	0.18	33
l ₂₁₀	0.18	34
l ₂₄₀	0.19	34
l ₂₇₀	0.19	39
l ₃₀₀	0.20	39
l ₃₃₀	0.21	39
l ₃₆₀	0.22	39

Resultados del RCPT en probetas de 38

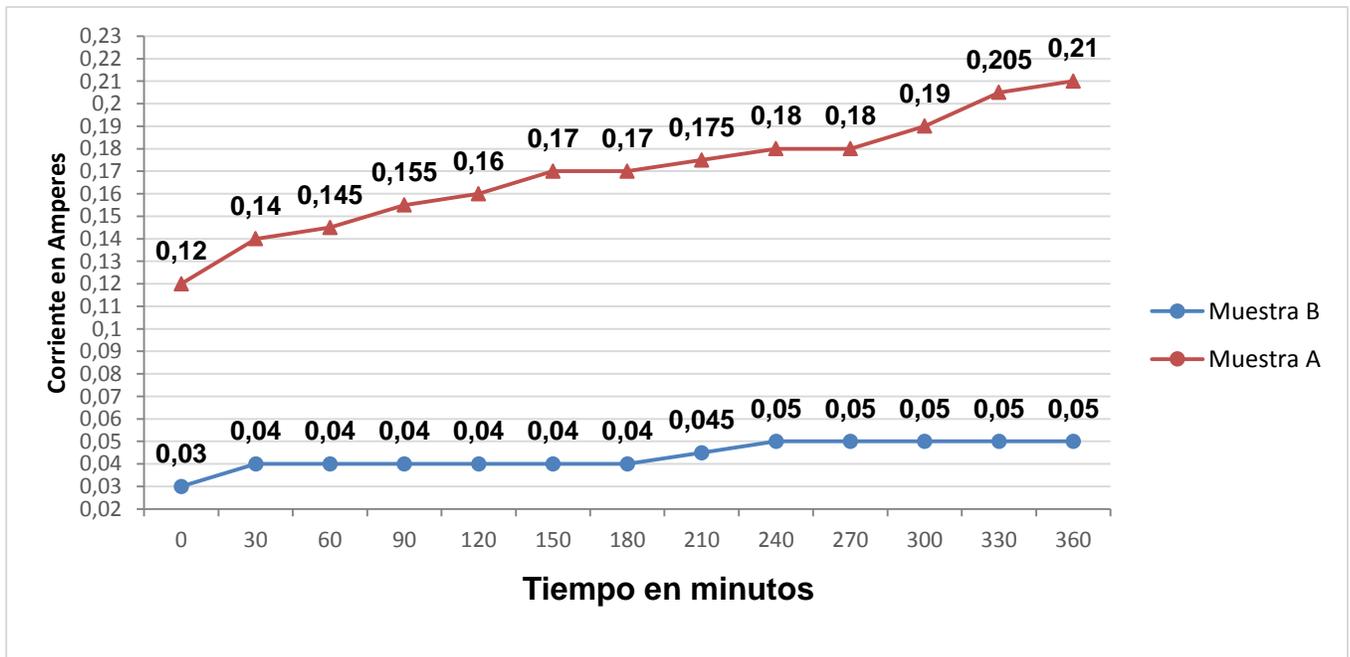
Carga (Q_x)	936	
Diámetro(in)	3.86	
Relación a/c	0.40	
Muestra No.	8	
Código	B	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
l ₀	0.03	28.8
l ₃₀	0.04	27.6
l ₆₀	0.04	27.1
l ₉₀	0.04	26.4
l ₁₂₀	0.04	26.2
l ₁₅₀	0.04	25.8
l ₁₈₀	0.04	25.7
l ₂₁₀	0.04	26.1
l ₂₄₀	0.05	26
l ₂₇₀	0.05	26
l ₃₀₀	0.05	25.8
l ₃₃₀	0.05	26
l ₃₆₀	0.05	26

Carga (Q_x)	3546	
Diámetro(in)	3.86	
Relación a/c	0.40	
Muestra No.	8	
Código	A	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
l ₀	0.12	24
l ₃₀	0.14	27
l ₆₀	0.14	27
l ₉₀	0.15	30
l ₁₂₀	0.15	32
l ₁₅₀	0.16	34
l ₁₈₀	0.16	34
l ₂₁₀	0.17	37
l ₂₄₀	0.17	36
l ₂₇₀	0.17	35
l ₃₀₀	0.18	35
l ₃₃₀	0.20	35
l ₃₆₀	0.20	35

Promedio de las cargas en función del tiempo.

Relación a/c	0.40	
Muestra No.	7	
Código	B	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
I ₀	0.03	27.4
I ₃₀	0.04	26.95
I ₆₀	0.04	27.05
I ₉₀	0.04	26.65
I ₁₂₀	0.04	26.6
I ₁₅₀	0.04	26.15
I ₁₈₀	0.04	26.15
I ₂₁₀	0.045	26.3
I ₂₄₀	0.05	26.55
I ₂₇₀	0.05	26.75
I ₃₀₀	0.05	26.65
I ₃₃₀	0.05	26.85
I ₃₆₀	0.05	26.85

Relación a/c	0.40	
Muestra N0.	7	
Código	A	
Tiempo (Min)	I(A)	Temperatura (°C)
I ₀	0.12	26.5
I ₃₀	0.14	28
I ₆₀	0.145	26.5
I ₉₀	0.155	28
I ₁₂₀	0.16	29.5
I ₁₅₀	0.17	33.5
I ₁₈₀	0.17	33.5
I ₂₁₀	0.175	35.5
I ₂₄₀	0.18	35
I ₂₇₀	0.18	37
I ₃₀₀	0.19	37
I ₃₃₀	0.205	37
I ₃₆₀	0.21	37



Grafica 1. Promedio del comportamiento de la corriente en función del tiempo del ensayo

Se calcularon las corrientes obtenidas en amperes para cada uno de los tiempos. Los resultados de las cargas en Coulomb se utilizan para caracterizar el concreto como sigue (ASTM C 1202):

Tabla 17. Permeabilidad al ion de cloruro basado en la carga pasante

Coulombs	Clase de Permeabilidad	Típico de
>4000	Alta	$a/c > 0.50$
4000-2000	Moderada	$a/c = 0.40$ a 0.50
2000-1000	Baja	$a/c < 0.40$
1000-100	Muy Baja	Concreto modificado con látex
<100	Insignificante	Concreto Polimérico

Resultados del RCPT

Tabla 16. Resultados Del Rapid Chloride Permeability Test

Muestras	Edad (Días)	Relación A/C	Carga Total (Q_x)	Carga Total Corregida (Q_s)	Permeabilidad	Adición
A7	35	0.4	3852	3561	Moderada	NA
A8	38	0.4	3546	3346	Moderada	NA
B7	35	0.4	954	919	Muy baja	Microsílice
B8	38	0.4	936	883	Muy baja	Microsílice

Virtual Rapid Chloride Permeability Test

Se utilizó un simulador virtual para estimar los resultados de una prueba rápida de permeabilidad de cloruro (ASTM C1202) de una mezcla de concreto.

Para una mezcla de hormigón especificado por el usuario, una estimación del factor de la formación del hormigón se obtiene a partir de una ecuación previamente desarrollada.

La ecuación fue desarrollada con una relación agua/cemento (a/c) de 0,3 a 0,5, adiciones humo de sílice de 0% a 10% en masa, y fracciones de volumen agregado de

0,62 a 0,70. Teniendo en cuenta el factor de la formación y una estimación de la solución de conductividad de poro, el cálculo de la carga total aprobada durante una prueba rápida de permeabilidad de cloruro es relativamente sencillo. Tenga en cuenta que para el método de prueba virtual, el resultado comunicado es para la muestra de concreto de un tamaño especificado por el usuario y no se ajusta a las 3.75 espécimen de diámetro nominal "como en el método C 1202"

Mixture Proportions

Material	Mass (kg)	SiO ₂ content (%)	Specific Gravity	Fineness (m ² /kg)
Water	4.52	Not applicable	1.0	Not applicable
Cement	11.25	20.0	3.2	375
Silica Fume	0.90	99.0	2.2	Not applicable
Fly Ash	0	0	2.6	Not applicable
Slag	0	Not applicable	2.8	Not applicable
Limestone filler	0	Not applicable	2.7	Not applicable
Fine Aggregate	21.94	Not applicable	2.68	Not applicable
Coarse Aggregate	21.41	Not applicable	2.70	Not applicable

Hardened Concrete Air Content (%): 2.031 Estimated pore solution conductivity (S/m): 25.0 Help available

Test Conditions

Applied Voltage (V): 60 Time (min): 360 Specimen length (mm): 51
 Specimen diameter (mm): 97.03 Initial Temperature (°C): 27.4 Final Temperature (°C): 26.85

Curing/Saturation: Saturated Sealed

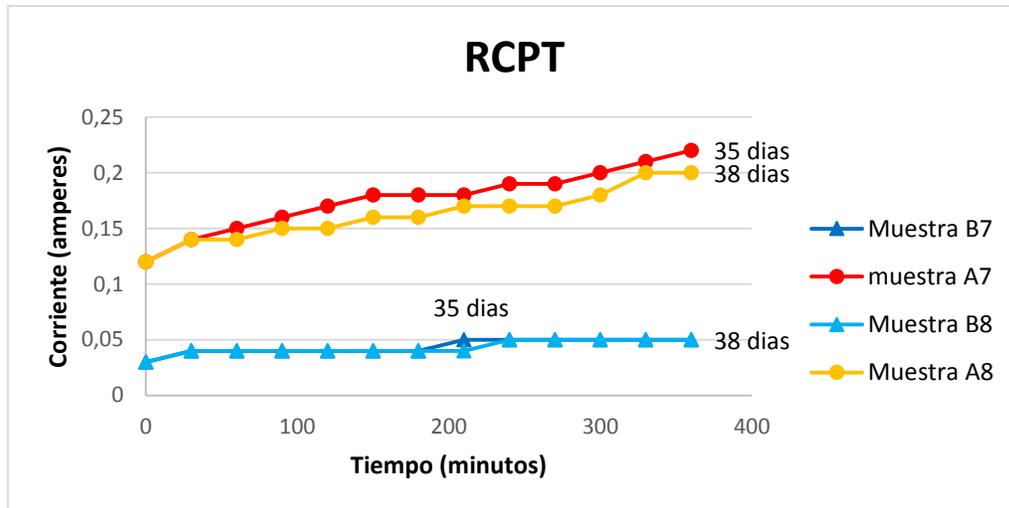
Predicted Total Charge Passed (Coulombs): 745
Predicted Initial Current (mA): 34.6
Predicted Initial Resistance (Ohms): 1731.14
Estimated Effective Water to Cement Ratio: 0.401
Predicted Degree of Hydration at 28 d (%): 66.9 (user may change)

Ilustración 12. Virtual Rapid Chloride Permeability Test

Resultados del Virtual Rapid Chloride Permeability Test

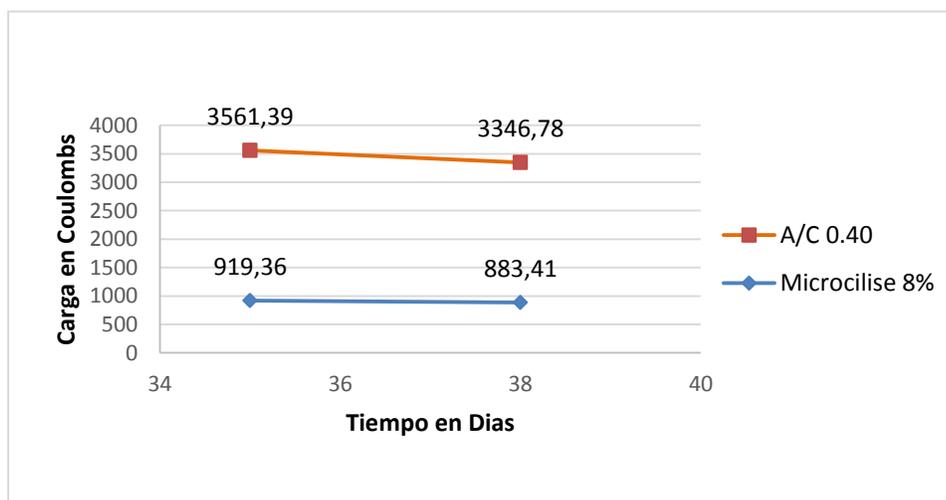
Tabla 17. Resultados del Virtual Rapid Chloride Permeability Test

Muestras	Edad (Días)	Relación A/C	Predicción de la Carga (Q)	Microsilíce %
A7	28	0.4	4368	0
A8	28	0.4	4330	0
B7	28	0.4	745	8
B8	28	0.4	758	8



Grafica 2. Comportamiento de la corriente en función del tiempo de la prueba.

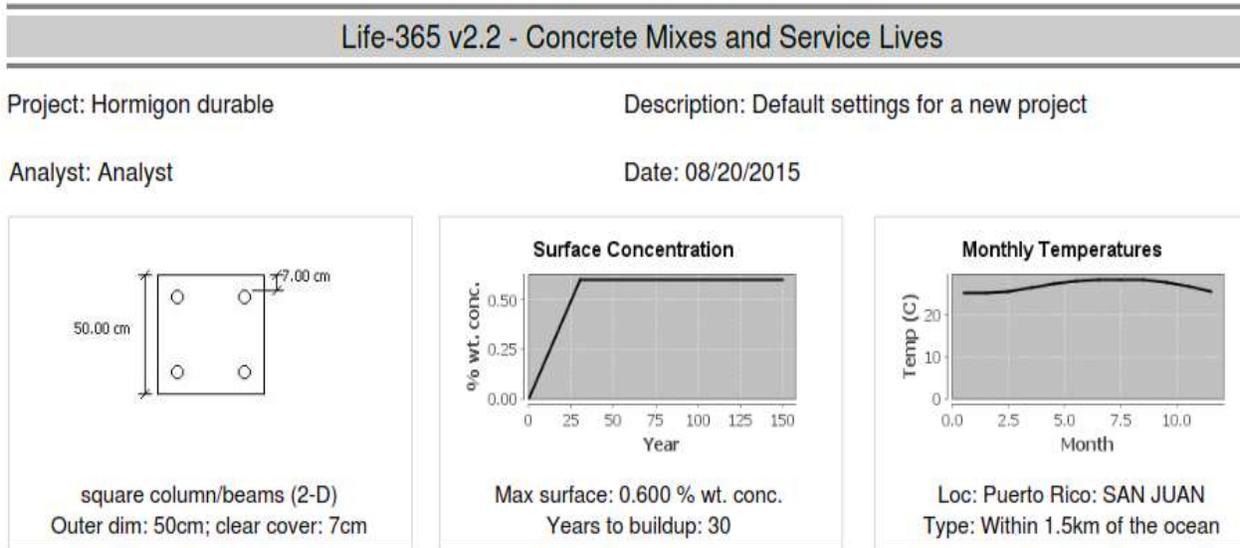
En la gráfica 2. Se observa el comportamiento de la corriente de cada una de las muestras durante el ensayo. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulomb que pasaron a través de la muestra.



Grafica 3. Influencia del tiempo de curado en el valor de la carga.

En la Grafica 3. se puede observar la influencia del tiempo de curado en el ensayo de RCPT, en dicha gráfica se evidencia una disminución de la carga en coulomb en los cilindros curados a 38 días y las muestras con adición de microsílíce presentan un mejor comportamiento ante el ion cloruro.

4.6 Resultados del life-365



Concrete Mixes

Alt name	User?	w/cm	SCMs	Inhib.	Barrier	Reinf.
Hormigon con silica		0.4	Silica Fume (8%);			Black Steel
hormigon sin silica		0.4				Black Steel

"n/a" indicates that, since the user is specifying the diffusion properties of this mix, this value is not specified.

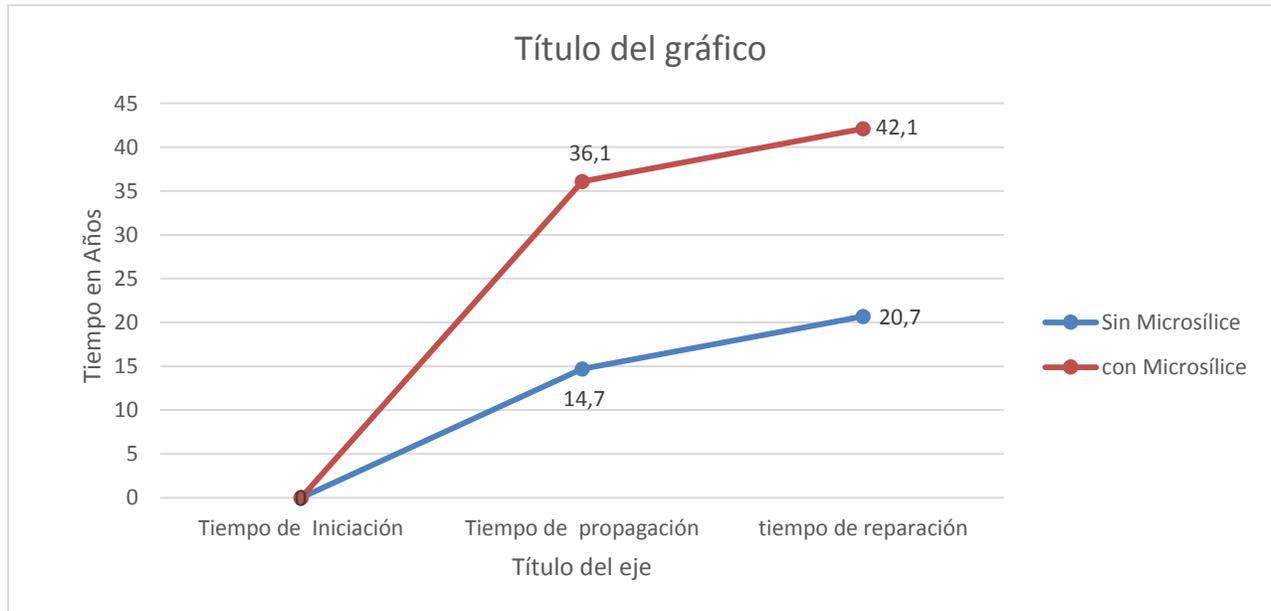
Diffusion Properties and Service Lives

Alt name	D28	m	Cl	Init.	Prop.	Service life
Hormigon con silica	2.12E-12 m ² /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	36.1 yrs	6 yrs	42.1 yrs
hormigon sin silica	7.94E-12 m ² /m/sec	0.2	0.05 % wt. conc.	14.7 yrs	6 yrs	20.7 yrs

"->" indicates that the user has directly specified this value; "+" indicates the service life exceeds the study period.

Es importante notar como la influencia de la microsilice aumenta la cantidad de años de hormigón, podemos ver claramente como hay una diferencia de tiempo de 22.8 años. Estos resultado lo que quieren decir es que ese es el tiempo que tarda la partícula de cloruro en penetrar a un punto que se considera critico o de reparación, un punto en el cual la estructura ha perdido sus características originales.

Comparación de la durabilidad del hormigón hidráulico con adición de microsilíce y sin microsilíce.



Grafica 4. Comparación de durabilidad en el tiempo del hormigón con adición de microsilíce y sin microsilíce.

Podemos ver claramente que existe una diferencia significativa entre el hormigón con microsilíce y el que no tiene microsilíce. Si hacemos un análisis económico con respecto a lo que tendríamos que invertir en una construcción que tenga carácter de durabilidad con una construcción que sea menos duradera esto sería lo que tendríamos que invertir.

4.7 Análisis de Costo

Precio unitario por metro cubico (m³) de hormigón.

Hormigon Durable

Componentes del hormigon	Tamices		Costo unitario con Itbis por M ³ (\$) RD.	Otros costos	cantidad	Costo
	Abertura	mm				
Gravilla	3/8	9.5	944	-	1	944
Arena	No.4	4.76	944	-	1	944
Cemento	pan	0.015	-	230	15	3450
Glenium 3030 ns	-	-	-	456	1	456
Microsílice	Pan	0.0001	-	1627.2	1	1627.2
					Σ=	7421.2

Tabla 18. Precio unitario hormigón durable

Hormigon menos Durable

Componentes del hormigon	Tamices		Costo unitario con Itbis por M ³ (\$) RD.	Otros costos	cantidad	Costo
	Abertura	mm				
Gravilla	3/8	9.5	944	-	1	944
Arena	No.4	4.76	944	-	1	944
Cemento	pan	0.015	-	230	15	3450
Polyheed 7325	-	-	-	247.3	1	247.3
					Σ=	5585.3

Tabla 19. Precio unitario hormigón menos durable

Estas tablas representan los precios unitarios para un metro cubico de hormigón durable frente al que es menos durable, podemos ver una gran diferencia de precios que a simple viste nos podría convenir más en lo económico un hormigón de carácter menos durable.

Vemos que el hormigón menos durable tiene un tiempo estimado de vida útil donde no hay que hacerle una intervención hasta los 20.7 años, y el hormigón durable tiene un tiempo de vida útil sin intervención de 42.1 años, por lo tanto si es de nuestro interés construir estructuras durables la inversión inicial podría tener un coste más elevado

pero a largo plazo evitaríamos costos de reparación y mantenimiento muy elevados ya que el hormigón durable duplica el tiempo de vida útil del hormigón común.

Conclusión

Después de nueve meses de investigaciones sobre el trabajo de grado de la durabilidad del hormigón armado frente al ion de cloruro, se pudo observar que un hormigón con una buena resistencia no es suficiente para garantizar que una obra de ingeniería será duradera, que para ello debemos diseñar estructuras con carácter de durabilidad , teniendo en cuenta que con una baja relación agua/cemento (a/c) y con ayuda de adiciones como la microsílice podemos alcanzar resultados extraordinarios como los que hemos visto anteriormente.

Cuando logramos reducir en una mezcla o pasta de hormigón la cantidad de vacío, podemos decir que estamos teniendo conciencia hacia la durabilidad ya que si tenemos una estructura de hormigón con una cantidad de vacío muy alta, corremos el riesgo de que esta estructura o elemento estructural corra peligro a que la resistencia y la introducción de agentes externos agresivos como las sales causen corrosión en el acero dando como resultado la fisuración del hormigón. En esta investigación se utilizaron inclusores de aire para así poder reducir el contenido de vacío en un hormigón durable.

Un hormigón durable es aquel que nos ofrecerá una permeabilidad mínima y una baja porosidad al lograr estas características obtendremos un hormigón más denso. La densidad fue uno de los factores que también se pudo apreciar ya que la densidad de un hormigón durable que tenía incluido microsílice, obtuvo valores de densidad mucho más alto que el que no tenía microsílice teniendo así un punto más a favor del uso de microsílice o humo de sílice.

Para concluir nos queda por decir que el tema de durabilidad es un tema que se seguirá desarrollando ya que el mundo va en constante evolución donde habrán nuevos contaminantes en la atmosfera y esta ataca al hormigón un material que siempre seguirá evolucionando para el disfruto de los seres humanos.

Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios con otras adiciones, con el fin de observar la influencia de las nuevas características que estas aportan en todas las propiedades analizadas en este trabajo de grado. Además utilizar materiales de buena calidad para un hormigón que estará expuesto constantemente a un ambiente de mar.

Usar adecuadamente las proporciones de Microsílice, ya que si se usa en grandes proporciones puede afectar la resistencia del hormigón.

Es importante el uso de aditivos en la mezcla de hormigón así podemos tener un mejor manejo de la mezcla, con una menor proporción de vacío para así aumentar su densidad.

El uso de aditivos incorporadores de aire en el concreto exige un perfecto control sobre:

- La granulometría de la mezcla, especialmente en la zona de los agregados finos.
- La dosis de aditivo y el contenido de aire obtenido, el cual no debe sobrepasar el 6%.
- El tiempo de mezcla, el cual se debe incrementar un 25% aprox. para favorecer la formación de las burbujas de aire.

Bibliografía

1. ACI (2001). "Guía para la Durabilidad del Hormigón ACI 201.2R-01".
2. ASTM (2002). "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration C 1202 – 97" American Society for Testing and Materials.
3. *Mahmoud Abdelkader, (2010) "Influencia de la composición de distintos hormigones en los mecanismos de transporte de iones agresivos precedentes de medios marino"*.
4. Comarazamy, J. F. (1985). *Materiales de Construcción*. Santo Domingo, Rep. Dom.: Ediciones de la UCE.
5. *Construmática*. (n.d.). Retrieved from <http://www.construmatica.com>
6. Halinco . (n.d.). *Halinco*. Retrieved from <http://www.halinco.de>
7. López, L.G.(2011) "Influencia del Porcentaje de adición de la microsílíce y el tipo de curado, en la Penetración del ion de cloruro en concretos de alto desempeño".
8. Bermudez, M.A. (2007) "Corrosión de las Armaduras del Hormigón Armado en Ambiente Marino: Zona de Carrera de Mareas y Zona Sumergida".
9. Virtual Rapid Chloride Permeability Test (2010-2012), The National Institute of Standards and Technology (NIST)Retrieved from<http://ciks.cbt.nist.gov/VirtualRCPT.html>
10. Mar Dominicano. (n.d.), Retrieved from <https://www.jmarcano.com/mipais/geografia/mar.html>
11. ASTM-C33 1999. Standard Specification for Concrete Aggregates.
12. De Guzmán, D.S., (2009), "Tecnología Del Concreto y Del Mortero"

Anexos

Imágenes ilustrativas de la mina de agregado en San Cristóbal



Ilustración 13. Tavares Industrial, 2015

Estas imágenes fueron tomadas de la graseira de Tavares industrial. Estas muestras las ensayamos y clasificamos según la norma ASTM C 33 para el diseño granulométrico de nuestra prueba de hormigón.

Resultados de las roturas de las muestras

Tabla 20. Resultados de las roturas de las muestras # A

Rotura de Probetas Cilíndricas de Hormigón Hidráulico por Compresión Simple (ASTM-C-39)															
Proyecto: HORMIGÓN DURABLE						Localización:									
Contratista:						Supervisión:									
Volumen del Molde = 0.00166 m ³						Esfuerzo: 350.00 kg/cm ²									
Fecha de elaboración	Fecha de Rotura	Muestra #	Identificación	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm ²)	Edad de probeta	Imagen de la rotura	Tipo de rotura	Resumen				
											% del Esfuerzo de Diseño	f _c -promedio kg/cm ²	Edad	% f _c -promedio	Tipo de Rotura
29/06/2015	06/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.07	2,451.81	30,920.00	378.60	7 DIAS		C	108.17%	374	a 7 Dias	107%	
29/06/2015	06/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.03	2,430.12	30,140.00	369.05	7 DIAS		E	105.44%				
29/06/2015	13/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.03	2,428.31	36,460.00	446.43	14 DIAS		E	127.55%	425	a 14 Dias	121%	
29/06/2015	13/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.07	2,450.60	32,880.00	402.60	14 DIAS		B	115.03%				
29/06/2015	27/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.03	2,428.92	38,700.00	473.86	28 DIAS		E	135.39%	473	a 28 Dias	135%	
29/06/2015	27/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.02	2,423.49	37,280.00	456.47	28 DIAS		B	130.42%				
29/06/2015	27/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.03	2,426.51	38,840.00	475.57	28 DIAS		B	135.88%				
29/06/2015	27/07/2015	A	Relacion A/C= 0.40	4.06	2,448.19	39,820.00	487.57	28 DIAS		C	139.31%				

OBSERVACIONES:

Tabla 21. Resultados de las roturas de las muestras# B

Proyecto: _____ HORMIGON DURABLE _____ Localización: _____ Contratista: _____ Rotura de Probetas Cilíndricas _____ de Hormigón Hidráulico por Compresión Simple (ASTM C-39) _____ Supervisión: _____														
Volumen del Molde =		0.00166		m ³		Esfuerzo: 350.00		kg/cm ²		Resumen				
Fecha de elaboración	Fecha de Rotura	Muestra #	Identificación	Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Carga de Rotura (kg)	Esfuerzo de Rotura (kg/cm ²)	Edad de probeta	Imagen de la rotura	Tipo de rotura	% del Esfuerzo de Diseño	f _c promedio kg/cm ²	Edad	%f _c promedio
29/06/2015	06/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.93	2,369.88	24,880.00	304.64	7 DIAS		C	87.04%	331	a 7 Días	94%
29/06/2015	06/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.95	2,378.31	29,140.00	356.80	7 DIAS		E	101.94%			
29/06/2015	13/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.95	2,378.31	34,680.00	424.64	14 DIAS		E	121.32%		a 14 Días	119%
29/06/2015	13/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.94	2,371.69	33,140.00	405.78	14 DIAS		B	115.94%			
29/06/2015	27/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.96	2,382.53	35,620.00	436.15	28 DIAS		C	124.61%			
29/06/2015	27/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.95	2,378.31	36,020.00	441.04	28 DIAS		E	126.01%		a 28 Días	126%
29/06/2015	27/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.96	2,383.13	36,180.00	443.00	28 DIAS		B	126.57%			
29/06/2015	27/07/2015	B	Relacion A/C= 0.40	3.94	2,372.29	36,000.00	440.80	28 DIAS		E	125.94%			



OBSERVACIONES:

Predicción de la Carga Mediante Virtual Rapid Chloride Permeability Test

Mixture Proportions

Material	Mass (kg)	SiO ₂ content (%)	Specific Gravity	Fineness (m ² /kg)
Water	4.52	Not applicable	1.0	Not applicable
Cement	11.25	20.0	3.2	375
Silica Fume	0	0	1	Not applicable
Fly Ash	0	0	1	Not applicable
Slag	0	Not applicable	2.8	Not applicable
Limestone filler	0	Not applicable	2.7	Not applicable
Fine Aggregate	22.52	Not applicable	2.68	Not applicable
Coarse Aggregate	21.97	Not applicable	2.70	Not applicable

Hardened Concrete Air Content (%): Estimated pore solution conductivity (S/m): [Help available](#)

Test Conditions

Applied Voltage (V): Time (min): Specimen length (mm):
 Specimen diameter (mm): Initial Temperature (°C): Final Temperature (°C):

Curing/Saturation: Saturated Sealed

Predicted Total Charge Passed (Coulombs):
Predicted Initial Current (mA):
Predicted Initial Resistance (Ohms):
Estimated Effective Water to Cement Ratio:
Predicted Degree of Hydration at 28 d (%): (user may change)

Estimated Final Temperature (°C):
Estimated Concrete Density (kg/m³):
Estimated Yield for Mixture Proportions Above (m³):

Ilustración 14. Predicción de la Carga muestra #A7

Mixture Proportions

Material	Mass (kg)	SiO ₂ content (%)	Specific Gravity	Fineness (m ² /kg)
Water	4.52	Not applicable	1.0	Not applicable
Cement	11.25	20.0	3.2	375
Silica Fume	0	0	1	Not applicable
Fly Ash	0	0	1	Not applicable
Slag	0	Not applicable	2.8	Not applicable
Limestone filler	0	Not applicable	2.7	Not applicable
Fine Aggregate	22.52	Not applicable	2.68	Not applicable
Coarse Aggregate	21.97	Not applicable	2.70	Not applicable

Hardened Concrete Air Content (%): Estimated pore solution conductivity (S/m): [Help available](#)

Test Conditions

Applied Voltage (V): Time (min): Specimen length (mm):
 Specimen diameter (mm): Initial Temperature (°C): Final Temperature (°C):

Curing/Saturation: Saturated Sealed

Predicted Total Charge Passed (Coulombs):
Predicted Initial Current (mA):
Predicted Initial Resistance (Ohms):
Estimated Effective Water to Cement Ratio:
Predicted Degree of Hydration at 28 d (%): **(user may change)**

Estimated Final Temperature (°C):
Estimated Concrete Density (kg/m³):
Estimated Yield for Mixture Proportions Above (m³):

Ilustración 15. Predicción de la Carga muestra #A8

Mixture Proportions

Material	Mass (kg)	SiO ₂ content (%)	Specific Gravity	Fineness (m ² /kg)
Water	4.52	Not applicable	1.0	Not applicable
Cement	11.25	20.0	3.2	375
Silica Fume	0.90	99.0	2.2	Not applicable
Fly Ash	0	0	2.6	Not applicable
Slag	0	Not applicable	2.8	Not applicable
Limestone filler	0	Not applicable	2.7	Not applicable
Fine Aggregate	21.94	Not applicable	2.68	Not applicable
Coarse Aggregate	21.41	Not applicable	2.70	Not applicable

Hardened Concrete Air Content (%): Estimated pore solution conductivity (S/m): [Help available](#)

Test Conditions

Applied Voltage (V): Time (min): Specimen length (mm):
Specimen diameter (mm): Initial Temperature (°C): Final Temperature (°C):

Curing/Saturation: Saturated Sealed

Predicted Total Charge Passed (Coulombs):
Predicted Initial Current (mA):
Predicted Initial Resistance (Ohms):
Estimated Effective Water to Cement Ratio:
Predicted Degree of Hydration at 28 d (%): (user may change)

Estimated Final Temperature (°C):
Estimated Concrete Density (kg/m³):
Estimated Yield for Mixture Proportions Above (m³):

Ilustración 16. Predicción de la Carga muestra #B7

Mixture Proportions

Material	Mass (kg)	SiO ₂ content (%)	Specific Gravity	Fineness (m ² /kg)
Water	4.52	Not applicable	1.0	Not applicable
Cement	11.25	20.0	3.2	375
Silica Fume	0.90	99.0	2.2	Not applicable
Fly Ash	0	0	2.6	Not applicable
Slag	0	Not applicable	2.8	Not applicable
Limestone filler	0	Not applicable	2.7	Not applicable
Fine Aggregate	21.94	Not applicable	2.68	Not applicable
Coarse Aggregate	21.41	Not applicable	2.70	Not applicable

Hardened Concrete Air Content (%): Estimated pore solution conductivity (S/m): [Help available](#)

Test Conditions

Applied Voltage (V): Time (min): Specimen length (mm):
Specimen diameter (mm): Initial Temperature (°C): Final Temperature (°C):

Curing/Saturation: Saturated Sealed

Predicted Total Charge Passed (Coulombs):
Predicted Initial Current (mA):
Predicted Initial Resistance (Ohms):
Estimated Effective Water to Cement Ratio:
Predicted Degree of Hydration at 28 d (%): **(user may change)**

Estimated Final Temperature (°C):
Estimated Concrete Density (kg/m³):
Estimated Yield for Mixture Proportions Above (m³):

Ilustración 17. Predicción de la Carga muestra #B8

Muestras de hormigón ensayadas



Ilustración 18. Selección de Muestras de Hormigón

Ensayos de Rapid Chloride Permeability



Ilustración 20. Equipo utilizado para el ensayo RCPT



Ilustración 19. Equipo en funcionamiento



Ilustración 21. Anotación de datos durante el ensayo



Ilustración 23. Preparación de la muestra antes del ensayo



Ilustración 22. Celda contenedora de las soluciones

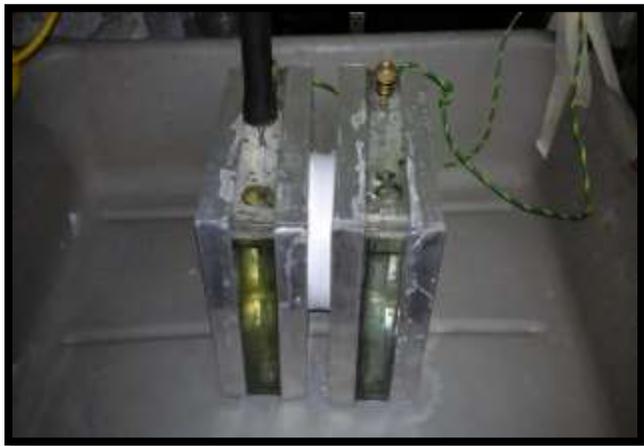


Ilustración 24. Celdas en funcionamiento durante el ensayo



Ilustración 25. Tester utilizado para medir la corriente (A) y la Temperatura



Ilustración 26. Corrosión de la armadura.



Ilustración 27. Descascaramiento del hormigón en la Autopista las Américas.



Ilustración 28. Descascaramiento del hormigón por la corrosión del acero.