Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación del transporte de iones cloruros en especímenes de hormigón hidráulico producidos con cementos de bajo carbono LC^3.

Autor: Alberto Gabriel Nasco Díaz

Tutor: Ing. Dayran Rocha Francisco

Ing. Liset León Consuegra

Consultante: Dr. Ing. Raúl González López

MSc. Lic. Ernesto Díaz Caballero

Santa Clara 2016

“Año 58 de la Revolución”

Pensamiento

"El genio se hace con un 1% de talento
y con un 99% de trabajo".

Albert Einstein

Dedicatoria

A la mujer que me ha dado todo su amor desde que nací,

mi madre linda y querida Esther.

Al hombre que ha mantenido el amor en familia y ha constituido un digno

ejemplo a seguir, mi padre Gilberto.

A mi hermanita querida Verónica por su ejemplo de valentía.

A mi abuelo Eladio por todo lo que me enseñó en la vida.

A mis abuelas Esther y Carmen por todo el cariño que me han brindado.

A mis abuelos paternos Luisa y Mateo.

A mi cosita linda Dayana.

A mis padrinos Iyaya y Domingo.

A mis otras tres madres Celita, Nora y Mercedita.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a mis padres y hermana por toda su dedicación, ayuda y esfuerzo durante todos estos años.
A mi novia y a los suegros por sus clases de informática y reparación de la computadora.
Agradezco a mi tutor Raúl por confiar en mí para este estudio; por ayudarme y guiarme en cada proceso de la investigación, y por ser un padre en cada consejo.
A familiares: Iyaya, Domingo, Felito, Edith, Kioma, Kiny, Iliana, Noe, Lini, Pedro, Mario, Alianni, mi tío Jose N., Isabelita, Frank, Papo, Nasquito, mi tía Marlene y Andrés F.
Agradecerle a otros familiares: Celita, Rosendo, Rosendito y Beatriz; Nora, Migue, Juanmi y Maryoli; Michel y Nelsi.
A Ibrahincito por sus clases de medición con voltímetro y pie de rey.
A mis otros abuelos: Nora y Eddy.
A May y Eddy por sus consejos.
A Crisanto por su alegría.
A mis amigos: Jairon, Amauri, Carlos R., Eduardo, Pernús, Córdova, Yunior, Javier G., Ihosvany, Alex, Henry, Cándido, Carlos C., Frandy
A mis amigos de trabajo: Adrián, José F., Sandy, Frank L., Frandy Ernesto, y Ariel S.
A Liset León la profesora de Matanzas que me ayudó en todas las fases de la tesis, a Fernando Martirena por el impulso del primer día y a Ernesto el habanero.
A Felipe por ayudarme en todas las partes técnicas que requerida el ensayo y mediciones cuando que yo necesitaba comer. También a Yoel el técnico de laboratorio.
A todos mis profesores por contribuir a mi formación como profesional, muchas gracias.

Resumen

La durabilidad del hormigón armado es afectada por el transporte o penetración de iones cloruros a través la matriz cementicia, generando corrosión en el acero de refuerzo y el consiguiente deterioro en el hormigón. El presente trabajo profundiza en el transporte iónico en especímenes de hormigón hidráulico, producidos con un cemento de bajo carbono LC^3 con respecto al cemento Pórtland P-35. Los hormigones se colocan desde el 2014 en el sitio de exposición #1 Cayo Santa María, evaluándose elementos prefabricados confeccionados a partir de los tipos, contenido de cemento y relación agua/cemento, mientras la resistencia a compresión de diseño es de 20 MPa y 25 MPa. La determinación de la intensidad de la corriente, la diferencia de potencial, el coeficiente de difusión y el factor de formación, en el ensayo de migración de iones según la metodología del protocolo STADIUM, demuestra que los especímenes M 381, M 25, y M 30 fabricados con cemento de bajo carbono LC^3 logran una mayor resistencia a la migración de iones cloruros, homologado por el valor del factor de formación superior, que es atribuido al refinamiento de la estructura de poros y una mayor tortuosidad, debido a la reacción puzolánica que densifica la matriz y la nucleación de los silicatos de calcio hidratados.

Palabras clave: durabilidad, hormigón, transporte, ion cloruro.

Tabla de contenidos

Pensamiento I

Dedicatoria II

Agradecimientos III

Resumen IV

Introducción 1

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes marinos tropicales 5

1.1 Hormigón hidráulico 5

1.2 Constituyentes principales del hormigón hidráulico 6

1.2.1 Cemento Pórtland 7

1.2.1.1 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono LC^3 8

1.2.2 Agregados naturales y artificiales 9

1.2.3 Aditivos superplastificantes para el hormigón 10

1.3 Durabilidad de las estructuras de hormigón 11

1.3.1 Factores que afectan la durabilidad en el hormigón hidráulico 11

1.3.2 Influencia del ambiente marino en el comportamiento del hormigón hidráulico 12

1.3.3 Deterioro del hormigón. Ataque de cloruros 13

1.4 Mecanismos de transporte de iones cloruros en el hormigón 15

1.4.1 Permeabilidad 15

1.4.2 Difusión de cloruros en el hormigón 16

1.4.2.1 Dependencia del coeficiente de difusión del tiempo 17

1.4.2.2 Métodos de ensayos de difusión 18

1.4.2.3 Factores influyentes en la difusión del cloruro en el hormigón. Factor de formación 19

1.4.2.4 Efecto del ion cloruro sobre la difusión 19

1.4.3 Absorción 20

1.4.3.1 Factores que influyen en la sorptividad del hormigón 20

1.6 Técnicas de medición del ingreso del ion cloruro en el hormigón. 22

1.6.1 Métodos no destructivos para la evaluación in situ de cloruros 23

1.6.1.1 Técnicas electroquímicas 23

1.6.1.2 Técnicas electromagnéticas 24

1.6.2 Técnicas destructivas para la evaluación in situ de cloruros 26

1.6.2.1 Método de Volhard 26

1.6.2.2 Método de medición potenciométrica de la solución de poro 27

1.6.3 Ensayo de migración de cloruros en el hormigón 27

1.6.3.1 Ensayo rápido de permeabilidad de cloruros (Rapid Chloride Permeability Test (ASTM C1202) 28

1.6.3.2 Ensayo de difusión de cloruros (NT BUILD 492) 30

1.6.3.3 Método estándar de prueba para la resistencia del hormigón a la penetración de iones de cloruro (Salt Ponding Test) (AASHTO T259, ASTM 1543) 31

1.6.3.4 Ensayo de migración eléctrica 32

1.6.3.5 Software para el Transporte y la Degradación de Materiales no Saturados (STADIUM®). 33

1.7 Perspectiva de la durabilidad del hormigón hidráulico en el Siglo XXI 34

Conclusiones parciales del Capítulo I 35

Capítulo II: Aplicación del protocolo STADIUM para la evaluación de la migración de iones cloruros en hormigones fabricados con cementos de bajo carbono LC^3 36

2.2 Diseño experimental de mezclas de hormigón para elementos estructurales y especímenes 36

2.3 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón 37

2.3.1 Cementos 37

2.3.2 Áridos 37

2.3.2.1 Granulometría de los áridos 38

2.3.3 Aditivo 39

2.3.4 Agua de amasado 39

2.4 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas 39

2.5 Método experimental 40

2.5.1 Protocolo STADIUM. Metodología aplicada 40

2.5.2 Equipos, instrumentos y materiales empleados en la migración de iones 41

2.5.2.1 Equipos y materiales empleados en la extracción de testigos 41

2.5.2.2 Equipos empleados en los cortes de los especímenes 42

2.5.2.3 Equipos empleados en la saturación y en la saturación al vacío de los especímenes 42

2.5.2.4 Equipos empleados para el ensayo de migración de iones cloruros 42

2.5.2.5 Materiales y reactivos 42

2.5.2.6 Medios de protección utilizados 43

2.5.3 Ensayo de migración de iones cloruro. Procedimiento desarrollado 43

2.5.3.1 Extracción de testigos 43

2.5.3.3 Procedimiento experimental desarrollado en el ensayo de migración de iones 44

2.6 Resultados obtenidos en el ensayo de migración de iones por el protocolo STADIUM 46

Conclusiones parciales del Capítulo II 57

Capítulo III: Análisis de los resultados del transporte de iones cloruros en hormigones hidráulicos producidos con cemento de bajo carbono LC^3 58

3.1 Análisis de los resultados del ensayo de migración de iones cloruros 58

3.1.1 Análisis de la intensidad de la corriente en función del tiempo en especímenes de hormigón 58

3.1.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de difusión en especímenes de hormigón 60

3.1.3 Análisis del factor formación en función del tiempo para especímenes de hormigón ensayados 62

3.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de difusión en especímenes de los testigos M 381, M 25, M 32, M 35 y M 30 entre los años 2015 y 2016 64

Conclusiones parciales de Capítulo III 65

Conclusiones generales 66

Recomendaciones 67

Referencias bibliográficas 68

Introducción

El hormigón ha sido el material de construcción más empleado por el hombre desde los romanos, dado a sus propiedades resistentes, tanto ante las acciones de las cargas como al medio ambiente.

La norma cubana NC 120: 2014 *"Hormigón Hidráulico. Especificaciones"* define al hormigón hidráulico como el material formado por la mezcla de cemento, árido grueso y árido fino, agua con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento.

Globalmente existe un enfoque en los estudios sobre la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, ya que son periódicas las inversiones que se generan por los deterioros que surgen en ellas, afectando su vida útil y la economía de los propietarios.

La NC 250: 2005 *"Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural"*, define la durabilidad como la capacidad del hormigón para soportar durante la vida útil para la que ha sido diseñado, las condiciones físicas y químicas a las que va a estar expuesto.

Sin embargo la ACI 201-2R.01, 2001 Guía para la durabilidad del hormigón define la durabilidad del hormigón de cemento hidráulico como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.

En Cuba puede apreciarse el deterioro de las estructuras que se encuentran cerca a la costa. Este deterioro se debe a las condiciones geográficas del país, al estar rodeada de mar (isla), ser estrecha y alargada, donde el ataque por penetración de cloruros, nitratos y sulfatos en el hormigón se hace inevitable, siendo la corrosión del acero de refuerzo el deterioro principal, provocado y acelerado esencialmente por los procesos de transporte de iones cloruros en el hormigón.

Con el fin de establecer un diseño en la mezcla y el recubrimiento de los elementos de hormigón armado, para disminuir su deterioro por los diferentes agentes; la NC 120: 2014 en su Tabla 1 plantea cuatro niveles de agresividades del medio donde se desarrollan las estructuras: muy alta, alta, media y baja; que

mayormente están en función de su cercanía a la costa y las condiciones de humedad.

Por tanto, es necesaria la búsqueda de materiales de construcción novedosos que modifiquen las propiedades del hormigón resultante, con el objetivo de hacerlo más duradero y estable ante dichos ataques, permitiendo reducir los costos de mantenimiento y reparaciones.

Por tales motivos también se han desarrollado métodos de predicción de la vida útil de las estructuras, como ensayos de laboratorio que evalúan el transporte del ion cloruro en el hormigón, por difusión, permeabilidad, absorción o migración eléctrica, los cuales ofrecen resultados del comportamiento del material en el entorno donde se desarrolla.

Por lo antes planteado el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) propone el estudio sobre la evaluación de la durabilidad de hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC^3 y cemento Pórtland P-35, ubicados en el sitio de exposición #1 Cayo Santa María con agresividad muy alta del medio, atendiendo a los mecanismos de transporte del ion cloruro, aplicando el ensayo de migración de estos iones por el protocolo STADIUM, siendo un método de laboratorio empleado para predecir la vida útil de las estructuras, iniciado por SIMCO Technologies Inc. en Quebec, Canadá.

En consideración, se asume como **problema científico**: ¿Cómo se comporta el transporte de iones cloruros en especímenes de hormigón hidráulico, producidos con cemento de bajo carbono LC^3 y Pórtland P-35, colocados en el 2014 en el sitio de exposición #1 Cayo Santa María?

Campo de acción: Durabilidad de hormigones hidráulicos fabricados con cemento de bajo carbono LC^3.

Objeto de Estudio: Transportación de iones cloruros en especímenes de hormigones hidráulicos.

Objetivo general: Evaluar el transporte de iones cloruros en especímenes de hormigón hidráulico fabricados con cemento de bajo carbono LC^3 y cemento Pórtland P-35.

Objetivos específicos:

1. Fundamentar el comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes marinos tropicales.

2. Caracterizar los materiales empleados en la fabricación de los hormigones hidráulicos producidos.
3. Aplicar la metodología del protocolo STADIUM para la migración de iones cloruros en el hormigón.
4. Analizar los resultados del ensayo de transporte de iones cloruros según el protocolo STADIUM en hormigones hidráulicos producidos con LC^3.

Hipótesis de investigación: Si se emplea un cemento de bajo carbono LC^3 para fabricar hormigones, es posible reducir el transporte de iones cloruros en muestras de hormigón, en relación con el cemento Pórtland P-35, una vez sometidos a la agresividad marina de Cayo Santa María durante el período 2014-2016.

Tareas de investigación:

1. Fundamentación del comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico colocado en ambientes marinos tropicales.
2. Caracterización de los materiales constituyentes empleados en los hormigones producidos.
3. Aplicación de la metodología definida en el protocolo STADIUM para el ensayo de migración de iones cloruros.
4. Análisis de resultados del ensayo de migración de iones cloruros según el protocolo STADIUM, en hormigones producidos con un cemento de bajo carbono LC^3.

Novedad científica: La aplicación de los estudios de migración de iones cloruros establecidos en el protocolo STADIUM a varios tipos de hormigón producidos con cemento de bajo carbono LC^3 y estacionados durante el período 2014-2016 en el sitio de exposición #1 Cayo Santa María.

Actualidad: La aplicación del protocolo STADIUM para la evaluación de la migración de iones permite evaluar el comportamiento de hormigones fabricados con un cemento de bajo carbono LC^3.

Aporte científico-técnico: Resulta novedoso el estudio del comportamiento de los hormigones producidos con un cemento de bajo carbono LC^3 con respecto a los fabricados con el cemento Pórtland P-35, al evaluar el fenómeno de la migración de iones cloruros en especímenes colocados en un ambiente marino tropical de elevada agresividad.

Aporte medio ambiental: La utilización de un cemento de bajo carbono LC^3 con sustituciones de clínquer de hasta un 45% en lugar del cemento Pórtland ordinario reduce significativamente las emisiones de CO_2 al medio ambiente y mejora la vida útil de las estructuras sometidas a una elevada agresividad.

Justificación de la investigación: La producción invariable del hormigón con un cemento de bajo carbono LC^3, exige el conocimiento de sus propiedades físicas, mecánicas y de su durabilidad. Resultados favorables propician su empleo en la producción de hormigón en obras para el turismo, más duraderas y económicas, constituyendo una latente prioridad del país. También la fabricación de este cemento de bajo carbono, aporta a la reducción del consumo de clínquer y de emisiones de CO_2 a la atmósfera, lo cual coloca a Cuba como abanderado dentro de los países en vías de desarrollo en la reducción de las emisiones de gases contaminantes a pesar de elevar sus producciones de tales aglomerantes.

Estructura del Trabajo de Diploma:

- ✓ **Resumen**
- ✓ **Introducción:** Se detallan los elementos metodológicos e investigativos de la presente investigación.
- ✓ **Desarrollo:** Incluye los contenidos tratados en cada capítulo.
- ▪ **Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes marinos tropicales**
- ▪ **Capítulo II: Aplicación del protocolo STADIUM para la evaluación de la migración de iones cloruros en hormigones fabricados con cementos de bajo carbono LC^3**
- ▪ **Capítulo III: Análisis de los resultados del transporte de iones cloruros en hormigones hidráulicos producidos con cemento de bajo carbono LC^3**
- ✓ **Conclusiones.**
- ✓ **Recomendaciones**
- ✓ **Referencias bibliográficas**

Capítulo I: Fundamentación del comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes marinos tropicales

En el capítulo se argumentan temas relacionados con la composición y comportamiento del hormigón hidráulico, como: materiales constituyentes, la resistencia mecánica y durabilidad en ambientes marinos tropicales, los mecanismos de transporte del ion cloruro y esencialmente los ensayos y métodos actuales de evaluación de la concentración de iones cloruro en el propio hormigón.

1.1 Hormigón hidráulico

El hormigón es un material versátil, durable, económico y sostenible, llegando a constituir el material de construcción de mayor empleo en el mundo en la era actual, alrededor de cuatro toneladas de hormigón se producen a nivel global por persona cada año. (Mehta & Monteiro, 2006)

El hormigón hidráulico es caracterizado principalmente por su resistencia mecánica a compresión, la cual clasifica a estos en hormigones de alta resistencia, de media y de baja resistencia. Esta propiedad por lo general determina las propiedades duraderas que puede presentar dicho material, ya que al ser más resistente podría ser más impermeable. Materiales como el cemento, los áridos (agregados); la dosificación de la mezcla del hormigón y la ejecución en obra, influyen en la resistencia mecánica a compresión y sus propiedades durables. Existen diferentes hormigones hidráulicos atendiendo a su resistencia a compresión: de densidad normal hasta 25 MPa de resistencia y de alta densidad de 30 MPa en adelante, la Tabla 1.1“Tipos de resistencia para hormigón de densidad normal y alta densidad” resume esto.

Tabla 1.1 Tipos de resistencia para hormigón de densidad normal y alta densidad

Tipo de Resistencia	$f'c_k$ (MPa)
H 10	10
H 15	15
H 20	20
H 25	25
H 30	30
H 35	35
H 40	40
H 45	45
H 50	50
H 55	55
H 60	60
H 65	65
H 70	70

Fuente: NC 120: 2014

La resistencia a compresión se comprueba en probetas ensayadas en prensas hidráulicas a diferentes edades, en especial a 28 días de fabricado el hormigón, según la necesidad del cliente se puede desarrollar en edades tempranas o posteriores a ese tiempo. (NC 120: 2014).

Betancourt, (2013) argumenta que la relación entre la resistencia del hormigón y la relación agua/cemento se puede formular atendiendo a la expresión esbozada por Bolomey:

$$f'c_{28} = K({}^{c}/_{a} - 0.5) \quad (1)$$

Donde K es un factor que toma en cuenta la calidad del cemento y las características de los áridos.

De otra parte la NC 120: 2014 “Hormigón Hidráulico- Especificaciones” y la ACI 201-2R.01 “Guía para la durabilidad del hormigón”, argumentan que el uso de materiales de calidad y una correcta dosificación de la mezcla, no aseguran que el hormigón resultante sea durable. Para el logro de un hormigón durable es fundamental disponer de un sistema de control de calidad y mano de obra calificada, así como aplicar procedimientos adecuados de ejecución del hormigón, considerando los requerimientos para el transporte, vertido, compactación, curado, terminación de la superficie y cualquier otro tratamiento posterior que tenga que experimentar el hormigón.

1.2 Constituyentes principales del hormigón hidráulico

El hormigón hidráulico está constituido principalmente por áridos o agregados y la pasta de cemento endurecida. Este material anisótropo es conformado por

una mezcla de áridos, cemento y agua para lograr su hidratación y que facilite la laborabilidad en su estadio inicial. Además exige la incorporación de aditivos y/o adiciones que modifiquen sus propiedades en su estado fresco y endurecido, según el diseño y requerimientos tanto en plantas como en obras.

1.2.1 Cemento Pórtland

El cemento Pórtland contiene silicatos y aluminatos de calcio formados mediante una secuencia de procesos térmicos y químicos, que incluye la descomposición de la caliza, la reacción con otros materiales de cantera tales como la arcilla, el mineral de hierro, y la arena; hasta la fusión parcial de estos componentes y posterior formación de nódulos duros, redondeados denominados clínquer. Todo esto ocurre a temperaturas entre 1350 a 1450 °C en hornos rotatorios de la planta de cemento. Una vez enfriado el clínquer se muele junto al 3- 5 % de yeso (sulfato de calcio dihidratado) hasta alcanzar una adecuada finura, produciendo el producto final, cemento Pórtland. (Taylor et al. 2002)

Según NC 120: 2014, se clasifica el cemento en tres grados de calidad de acuerdo a su resistencia a compresión a los 28 días expresada en MPa:

a) Pórtland 35: P - 35

b) Pórtland 45: P - 45

c) Pórtland 55: P - 55

La selección del tipo de cemento depende de las características de la ejecución de la obra, el uso final del hormigón, las condiciones del curado (tratamiento térmico), dimensiones de la estructura (calor de hidratación), condiciones ambientales de exposición de la estructura y la reactividad potencial de los áridos con los álcalis procedentes del resto de los constituyentes.

La industria productora de cemento es la responsable entre un 7 y 8% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera asociadas a la producción del clínquer, constituyendo este producto el componente principal del cemento. Hoy surgen varias alternativas para disminuir la contaminación ambiental, dentro de ellas el uso de materiales cementicios suplementarios (MCS), los cuales adicionados al cemento disminuyen el empleo del clínquer en los cementos Pórtland.

1.2.1.1 Cemento con adiciones minerales. Cemento de bajo carbono LC^3

Los materiales cementicios suplementarios empleados con el objetivo principal de lograr una disminución en el uso del cemento Pórtland, mejoran o mantienen las propiedades del cemento y el hormigón.

Una puzolana natural (tales como las cenizas volcánicas) o artificial (subproductos industriales o agrícolas), puede ser utilizada como material cementicio suplementario, al contener principalmente en su composición química óxidos de sílice y de aluminio. Esto les da un carácter ácido, por tanto una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente). La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño, no obstante, cuando la puzolana se emplea en combinación con el cemento Pórtland, reacciona con el hidróxido de calcio de este a través de una reacción secundaria a la reacción de hidratación de los componentes principales del cemento, para formar compuestos cementantes. (González, 2011)

El humo de sílice constituye un material puzolánico altamente eficaz debido a su extrema finura y alto contenido de sílice, aumenta la resistencia del hormigón a edades tempranas y también reduce la permeabilidad. Mientras la ceniza volante tiende a limitar la velocidad de reacción, por tanto requiere de mayor período de tiempo para mejorar el completamiento de la estructura de poros. El uso de las cenizas volantes mejora zonas de la interface de transición (ITZ) entre la matriz de cemento y el agregado, conducente a una reducción en la porosidad. Las escorias dan una reacción de hidratación lenta, permite la sustitución de cemento por altos contenidos de estas, aunque pueden tener un efecto negativo sobre la resistencia y la porosidad a edades tempranas. El metacaolín es una puzolana eficaz con alta velocidad de reacción, genera resultados mejores de la resistencia del hormigón. La zeolita como una puzolana natural, provoca altas resistencias a largo plazo y bajo calor de hidratación, pero con la desventaja de baja resistencia inicial en morteros y hormigones. La zeolita a pesar de aumentar el número de microporos, disminuye la cantidad de poros grandes. (Janotka et al. 2003; Toutanji et al. 2004 y Huat 2006 citado en Bioubakhsh, 2011)

Como expresa la NC 120: 2014 las cantidades de las adiciones del Tipo I -aproximadamente inertes y del Tipo II -puzolánicas o hidráulicamente activas a utilizar en el hormigón, deben ser objeto de ensayos preliminares. Se debe tener en cuenta no solo la influencia de la adición y cantidad en las propiedades mecánicas del hormigón, sino también en las propiedades durables que pueda presentar.

Una variante aplicada en Cuba para disminuir el uso del clínquer en la producción de cemento Pórtland, consiste en la sustitución de parte del clínquer del cemento Pórtland por materiales cementicios suplementarios, como arcilla-calcinada, caliza y yeso, donde los porcentajes de clínquer y estos materiales son básicamente en 48; 30; 15 y 7 respectivamente. El producto final es denominado cemento de bajo carbono LC^3, permite lograr reducciones de las emisiones asociadas a la producción de cemento entre un 25 – 35 % con respecto a la práctica diaria sobre la base de la sustitución de clínquer, son más sensibles a la carbonatación en comparación con el cemento Pórtland debido fundamentalmente a su menor contenido de portlandita, además el comportamiento ante la penetración de cloruros en morteros fabricados a partir de la serie de cemento con 45 % de adición de arcilla calcinada, caliza es 10 veces superior que en los morteros de cemento Pórtland. (Vizcaíno, 2014)

1.2.2 Agregados naturales y artificiales

La clasificación de los agregados o áridos se debe al tamaño de las partículas, la densidad, o la fuente de procedencia de estos. Los agregados gruesos son las partículas de 4,75 mm (retenida sobre el Tamiz No.4) a aproximadamente 50 mm, a excepción del hormigón en masa que puede contener partículas de hasta 150 mm; y los agregados finos son las partículas más pequeñas que 4,75 mm, estos contienen partículas en intervalo de tamaño de 75 µm (Tamiz No.200) a 4,75 mm. La mayoría de los agregados minerales naturales, tales como arena y grava, tienen una densidad aparente de 1520 a 1680 kg/m^3 y producen hormigón de peso normal con aproximadamente 2400 kg/m^3. Los agregados con densidades aparentes de menos de 1120 kg/m^3 se llaman de peso ligero y de densidades aparentes de más de 2080 kg/m^3 se llaman de peso pesado. Los agregados empleados en hormigones se componen de arena, grava, piedra triturada y derivados de fuentes naturales. Los materiales procesados

térmicamente tales como arcilla expandida y pizarra, utilizadas para la fabricación de hormigón ligero, se denominan agregados sintéticos, también pertenecen a este tipo de agregados, los elaborados a partir de subproductos industriales, como escorias de alto horno y cenizas volantes. El hormigón reciclado a partir de los edificios y aceras demolidas también está siendo investigado para su posterior uso en hormigones. (Mehta & Monteiro, 2006)

Los áridos tienen notable influencia en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, ya que la estructura formada por el acomodo y empaquetamiento de las partículas en la pasta de cemento endurecida, debido a la compactación, forman un material denso y resistente. Existen áridos que de acuerdo a su composición petrográfica y mineralógica pueden reaccionar con los álcalis del cemento provocando expansión y fisuras en el hormigón, por lo que se debe tener en cuenta este aspecto químico.

1.2.3 Aditivos superplastificantes para el hormigón

La NC 228-1: 2005 “Aditivos para hormigones, morteros y pastas- Parte 1: Aditivos para hormigón-requisitos” los aditivos químicos son sustancias que se añaden en una proporción inferior al 5 % del peso del cemento, para modificar las propiedades del hormigón en estado fresco y/o endurecido y mejorar el comportamiento de servicio.

Generalmente el hormigón premezclado se transporta a diferentes lugares de construcción y se entrega con la ayuda de camiones mezcladores de tipo giratorio. Estos sitios están ubicados a largas distancias y el hormigón suministrado tiene que ser viable y capaz de fluir. Los recientes desarrollos en tecnología de aditivos han producido superplastificantes que pueden extender el tiempo de fraguado del hormigón más allá del tiempo de retardo típico conseguido con mezclas de retardadores convencional; permitiendo para las técnicas de construcción, ahorro de la mano de obra, desarrollo de métodos de trabajo eficientes y económicos, permite reducir el consumo de cemento sin aumentar el costo de la construcción. Los superplastificantes cuando se utilizan, dentro de los límites, imparten trabajabilidad extrema sin afectar negativamente a la hidratación y la cohesión característica del cemento en el hormigón. (Varshney et al. 2013)

Cuando un superplastificante se utiliza como un reductor de agua a una determinada trabajabilidad, mejora las propiedades del hormigón endurecido, y en particular, aumenta la resistencia y la durabilidad, debido a la reducción de la porosidad y la permeabilidad capilar, ambos relacionados con una disminución en la relación a/c.

1.3 Durabilidad de las estructuras de hormigón

La NC 250: 2005 tiene en cuenta lo que se entiende por durabilidad considerado como vida útil de una estructura, al intervalo de tiempo durante el cual la misma mantiene su forma original, sus propiedades resistentes, sus condiciones de servicio y sus características estéticas, sin necesidad de efectuar reparaciones capitales, pero con mantenimientos ligeros sistemáticos.

Mehta & Monteiro (2006) plantean que los costos de reparación y sustitución de estructuras se ha convertido en una parte sustancial del presupuesto total de la construcción, se estima que en los países industrialmente desarrollados alrededor del 40% de los recursos totales de la industria de la construcción se están aplicando a la reparación y el mantenimiento de las estructuras existentes, y sólo el 60% a las nuevas instalaciones. Existe una estrecha relación entre la durabilidad de los materiales y la ecología. La conservación de recursos naturales hace que se prolonguen los materiales de la construcción y por consiguiente un paso ecológico.

Las estructuras de hormigón armado bien diseñadas que se construyen con los materiales adecuados, se ejecutan de acuerdo a las normas y especificaciones, y se les garantiza un mantenimiento periódico ofrecen resultados muy favorables respecto a la durabilidad a lo largo de su vida útil, pero existen factores que la afectan.

1.3.1 Factores que afectan la durabilidad en el hormigón hidráulico

Durante la vida útil de las estructuras, estas se someten a diferentes procesos de deterioro, pueden ser de naturaleza física, como la abrasión, el efecto de los sismos, las deformaciones impuestas, o de origen químico como el ataque de sulfatos y ácidos, la reacción álcali agregado, la corrosión del acero de refuerzo en dependencia de la naturaleza del hormigón y del contexto que la rodea. Adicionalmente debe sumarse la existencia de prácticas de construcción inadecuadas tales como: recubrimientos insuficientes del acero de refuerzo,

relación a/c elevada, deficiente compactación, escaso curado, uso de agua y agregados contaminados con cloruros, sulfatos y otros elementos agresivos. (Castro, 1998 citado en González, 2014).

Cuando la pasta de cemento está expuesta a la atmósfera, comienza a deteriorarse, lo cual es una forma de corrosión química. La pasta reacciona a la exposición con la lluvia ácida o en la cantidad normal de dióxido de carbono en el aire. Esta reacción causa que las superficies se descascaren y carbonaten, y luego, el silicato de calcio se hidrate para dar la resistencia al hormigón que lo convertirá otra vez a carbonato de calcio, gel de sílice, y gel de aluminio. Dentro de los agentes que más afectan la durabilidad del hormigón se encuentran la humedad, los ciclos de temperatura, sales descongelantes, el ambiente marino, el dióxido de carbono y contaminantes ácidos (NO_2 y SO_2). Estos factores desencadenan procesos destructivos asociados a los minerales hidratados del cemento, que proveen la resistencia y la durabilidad. (Taylor et al. 2002)

1.3.2 Influencia del ambiente marino en el comportamiento del hormigón hidráulico

Cuba es un archipiélago constituido por la isla mayor de las Antillas, la Isla de la Juventud y 4195 cayos, islotes e islas. Está ubicada en el Mar de las Antillas o Mar Caribe, cerca de las costas de los Estados Unidos y México. La isla tiene 104556 km^2 y cuenta con 5746 km de costa y 29 km de fronteras. Se extiende 1250 km a lo largo, 191 km en su punto más ancho y 31 km en su punto más estrecho. (Cámara de Comercio de Cuba)

Dada las condiciones geográficas de la isla, la durabilidad de las estructuras de hormigón armado se ve afectada por la penetración de iones cloruros, dada su cercanía a la costa, lo que influye en la corrosión del acero de refuerzo, que provoca la pérdida de sus propiedades originales y aumento del volumen, causándole grietas al hormigón que lo protege, quedando el acero vulnerable a cualquier ataque de la intemperie, de cloruros o de la carbonatación.

El hormigón expuesto a un ambiente marino se deteriora por los efectos combinados de la acción química de los constituyentes del agua de mar sobre los productos de hidratación del cemento, de la expansión álcali-árido (cuando hay áridos reactivos), de la presión de cristalización de sales en el hormigón si una cara de la estructura está sometida a condiciones de humedad y la otra a

condiciones de secado, a la acción del hielo en climas fríos, a la corrosión de las armaduras y a la erosión física debida a la acción de las olas y de las partículas en suspensión. Cada una de estas acciones provoca un aumento de la permeabilidad del hormigón, lo que contribuye a que progrese el ataque de la causa inicial y el de los demás tipos de acción. En ambientes que contienen cloruros, tales como los ambientes marinos (el agua de mar presenta como media 3,5% de concentración de sales minerales) o donde se utiliza sales descongelantes, la velocidad de corrosión del acero en el hormigón puede aumentar. (Ahlström et al. 2015)

Con el objetivo de lograr una mayor precisión en la explicación de los procesos que afectan la durabilidad del hormigón surgen los sitios de exposición para este material, ubicándose en las condiciones más reales y agresividad posibles del medio.

En décadas anteriores no existen trabajos en este sentido en nuestro país; pero en los últimos 5 años el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Facultad de Construcciones en la Universidad “Marta Abreu” de Las Villas ha realizado trabajos de investigación preliminares en Cayo Santa María, a una distancia de casi 50 km de la costa norte de Caibarién. Para cumplimentar exigencias de la NC 120: 2014 recientemente se trabaja en la ampliación de diferentes sitios a ubicar en dependencia del tipo de agresividad. Estos sitios se enmarcan en cuatro niveles de agresividad (muy alta, alta, media y baja) según la Tabla 1 de la propia norma, los cuales dependen de la distancia que se encuentran de la costa norte, de la costa sur y del tipo de estructura.

1.3.3 Deterioro del hormigón. Ataque de cloruros

Los deterioros del hormigón como grietas, desconchados, fracturas y la corrosión del propio hormigón son causa de los gradientes de temperatura, el calor de hidratación del cemento, la reacción álcalis-agregado, el hielo y deshielo en los países fríos y la deficiente ejecución en la fabricación de los elementos estructurales. Esto a su vez provoca la penetración de agentes agresivos que atacan tanto al hormigón como al acero de refuerzo, el aumento de la humedad en el interior del material y la vulnerabilidad al intemperismo. Por mencionar algunas investigaciones como las de Andrade, 2003; Zych, 2014; González, 2014; M. de Gutiérrez et al. 2000; Torres-Agredo et al. 2011; Rao, 2001; Siddique

y Klaus, 2009; Kim et al. 2007; Ramezanianpour y Jovein, 2012; Hassan et al. 2012; Badogiannis et al. 2015a. se conoce que la principal causa de deterioro en hormigón es la corrosión del acero de refuerzo, siendo la transportación o penetración de iones cloruros el principal catalizador de este proceso.

Abbas (2015) enuncia que los cloruros existen en diferentes formas en el hormigón, unidos y libres. El cloruro libre está en la forma iónica en la solución de los poros y puede difundirse al acero a través de los poros.

Los cloruros que intervienen en el proceso de corrosión son los libres, la gran mayoría de normas y códigos de construcción establecen los límites para los cloruros totales. La fijación de los cloruros a la matriz sólida del hormigón ha sido ampliamente estudiada y generalmente se utilizan las isotermas de fijación para explicarlas, que se definen como la relación entre cloruros libres para un rango de concentraciones a una determinada temperatura, como también la fijación de los cloruros a la matriz del cemento es gobernada por reacciones físicas y químicas entre los iones presentes en la fase acuosa del hormigón y la fase sólida hidratada. (González, 2014)

Cuando el ion cloruro reacciona con las fases de aluminato forma un compuesto relativamente insoluble conocido sal de Friedel, esta es levemente expansiva, pero no provoca tensiones grandes que deterioren al hormigón, también frena temporalmente los iones cloruros, reduciendo su movilidad para alcanzar a las armaduras y romper su condición pasiva. (Montaña y Carmona, 2015)

La siguiente tabla muestra el contenido de cloruros máximo admisible del hormigón, expresado como el porcentaje en masa de iones cloruros con relación a la masa de cemento.

Tabla 1.2 Contenido máximo de cloruros del hormigón

Utilización del hormigón	**Contenido máximo de Cl^- por peso de cemento (1)**
Sin acero de refuerzo ni piezas metálicas embebidas (con excepción de elementos u horquillas de manipulación que sean resistentes a la corrosión)	1,0%
Con acero de refuerzo o piezas metálicas embebidas	0,20%
Con acero de refuerzo pretensado	0,10%

Fuente: NC: 120 2014

1.4 Mecanismos de transporte de iones cloruros en el hormigón

Los iones cloruros y otras sustancias agresivas penetran a través del hormigón por diferentes mecanismos de vía, dependiendo de la fuerza que acciona. La permeabilidad, difusión y absorción (capacidad de absorción) son los mecanismos de transporte de cloruros más conocidos. El estado de humedad del hormigón y el entorno de servicio determinan la fuerza de conducción y por lo tanto los mecanismos por los que el cloruro penetra en el hormigón. (Bioubakhsh, 2011)

La Tabla 1.3 muestra los mecanismos de transporte de iones a través del hormigón, las fuerzas conductoras y la vía que utilizan durante el transporte.

Tabla 1.3 Mecanismos de transporte de iones en el hormigón

Tipos de mecanismos	Fuerza conductora	Poros
Permeabilidad (gases y líquidos)	Diferencia de presión absoluta dp	Llenos con aire o agua
Difusión (gases e iones)	Gradiente de concentración dc Diferencia de presión parcial dp	Llenos con aire o agua
Absorción (líquidos)	Tensión de superficie s Ángulo de contacto q	Llenos con aire

Fuente: Böhni y Hans 2005. Tomado de León y Oróstegui 2009

1.4.1 Permeabilidad

La permeabilidad del hormigón es la capacidad y facilidad del material de permitir el paso de líquidos, gases y otras sustancias al interior del mismo. Dicha propiedad es gobernada mayormente por la permeabilidad del mortero y la pasta de cemento endurecida, es definitiva donde se encuentran los poros permeables capaces de permitir el paso de sustancias, mediante distintos fenómenos. (Betancourt, 2013)

Por lo general las mismas propiedades que convierten al hormigón menos permeable, también lo vuelven más hermético y durable. La permeabilidad total del hormigón está en función de la permeabilidad de la pasta y de la permeabilidad y granulometría de los áridos. Varios factores pueden afectar la permeabilidad del hormigón, como:

- Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón
- Tipo y contenido de cemento utilizado
- Relación agua cemento (a/c)
- Régimen de curado del hormigón
- Edad y resistencia del hormigón

- Contenido de humedad y temperatura

Por ejemplo en el tipo de cemento, para una misma relación a/c, el cemento grueso produce una pasta más porosa que un cemento fino. La composición del cemento perjudica la permeabilidad, demostrándolo en su influencia sobre la rapidez de hidratación, pero el grado final de porosidad y de permeabilidad no se afecta. (Montaña y Carmona, 2015)

Las partículas de los agregados o áridos influyen en la microestructura de la pasta de cemento en la zona de transición en la interface árido-cemento. Comúnmente esta zona presenta mayor porosidad y menor contenido de cemento sin hidratar, en comparación con la pasta suelta. El tipo y tamaño de los áridos puede afectar el volumen y la porosidad de la zona de transición en la interface cemento-árido y por lo tanto pueden influir en las propiedades de permeabilidad del hormigón. (Elshareif et al. 2004 citado en Bioubakhsh, 2011)

La compactación tiene un valor importante dentro de las múltiples variables que influyen en la resistencia y durabilidad del hormigón. La porosidad del hormigón y la continuidad entre sus poros depende de una correcta compactación, las cuales afecta las características de permeabilidad del hormigón.

Uno de los problemas que presentan las construcciones de hormigón destinadas al almacenamiento de gases, cámaras de vacío, edificios nucleares, conductos para el transporte de fluidos, etc., es el de que, al no ser el hormigón un material estable, aumenta su permeabilidad con el paso del tiempo, independientemente que la resistencia del hormigón aumente con el tiempo. (Muñoz, 1988)

1.4.2 Difusión de cloruros en el hormigón

La difusión es el mecanismo de transporte principal de cloruros en el hormigón, al estar saturado como en condiciones sumergidas, ya que se producen gradientes de concentración. La transportación de una solución puede ocurrir por diferencias de concentración entre dos zonas adyacentes, por ejemplo, en una zona del hormigón la concentración es mayor que en otra; tratando de lograr un equilibrio entre ellas se genera un movimiento desde la zona más concentrada hacia la zona menos concentrada. Este proceso se conoce como "difusivo" y es muy lento; el ingreso de CO_2 desde la atmósfera, provocando la carbonatación del hormigón es un ejemplo de este proceso. (Montaña y Carmona, 2015)

León y Oróstegui (2009) plantean que en condiciones de estado no estacionario, este proceso se describe matemáticamente con la segunda ley de Fick de difusión, se ajusta a un alto grado a la realidad práctica del hormigón, y para un flujo dimensional está dada por $$\frac{d\,C}{d\,t} = D\left(\frac{d^2C}{dx^2}\right) \quad (2)$$

Donde D es el coeficiente de difusión (m^2/s) y C es la concentración de cloruros disueltos en la solución de poros (mol/m^3 de solución de poros).

A través del coeficiente de difusión se relaciona la concentración de iones cloruros en el espacio y en el tiempo, donde varios modelos tradicionales se apoyan en la segunda ley de Fick. Este coeficiente se precisa como la tasa de transferencia de una especie iónica a través de una sección de área por el gradiente de concentración. (González, 2014)

León y Oróstegui (2009) enuncian sobre la NT BUILD 443 que el coeficiente de difusión aparente no es un parámetro del material, pero debe ser considerado como un coeficiente de regresión que cuantifica la permeabilidad de un hormigón específico bajo condiciones ambientales establecidas, es una medida de la permeabilidad (porosidad, la distribución y conectividad de los poros) del hormigón con respecto a los cloruros en el tiempo de experimentación bajo condiciones de saturación, se reduce con el tiempo debido a la hidratación, aumenta con respecto a la temperatura de forma exponencial, tiene en cuenta la velocidad de ingreso y en consecuencia la caída en el coeficiente de difusión en varios ordenes de magnitud para bajos grados de saturación de agua en el hormigón.

1.4.2.1 Dependencia del coeficiente de difusión del tiempo

Tang y Nilsson (1992), acertaron que el coeficiente de difusión del hormigón en las primeras edades reduce drásticamente con el tiempo, provocando una dependencia del mismo, al utilizar la prueba de difusividad rápida, por lo que proponen una expresión matemática para un coeficiente de difusión de cloruro dependiente del tiempo: $$D(t') = a \times (t')^{-n} \quad (3)$$

Donde D (t ') es el coeficiente de difusión en función del tiempo, t' es la edad del hormigón, a y n son constantes. (León y Oróstegui, 2009)

El conjunto de iones acumulados en una unidad de tiempo por unidad de área se puede representar por medio de expresiones no lineales que permiten ajustar

el comportamiento experimental mostrado por las estructuras expuestas en la atmósfera marina, obteniéndose una expresión en la que la concentración superficial es dependiente del tiempo y de los parámetros utilizados en la elaboración del hormigón mismo, como la relación a/c y los días de curado. El aumento de la concentración superficial de cloruros en el hormigón se desarrolla esencialmente cuando están expuestos a ciclos de secado y humedecimiento en lugar de los que están inmersos en una solución salina de forma continua. Esto se debe a la concentración superficial del hormigón expuesto al agua de mar que permanece constante debido al equilibrio químico. (Bioubakhsh, 2011)

1.4.2.2 Métodos de ensayos de difusión

González (2014) plantea que los métodos de ensayos iniciales propuestos y estandarizados para determinar la facilidad con que se transportan los iones a través del conjunto de poros en el hormigón fueron los ensayos de difusión AASHTO 1980 y NordTest 1995. El procedimiento general del ensayo consiste en introducir la muestra de hormigón saturada en una solución con determinada concentración de cloruros y se deja que la difusión actué por el gradiente de concentración de las soluciones en el exterior e interior de la muestra. En un período de dos o tres meses se suspende la exposición de la muestra, se les mide el perfil de penetración de la solución de cloruro, la concentración a diferentes profundidades mediante otro procedimiento estandarizado (AASHTO 1994) y se calcula el coeficiente de difusión mediante la solución analítica de la segunda Ley de Fick.

Los ensayos de difusión natural que se realizan en celdas de difusión son más lentos que los ensayos de difusión acelerada, esto se debe que al aplicarle un campo eléctrico externo existe una fuerza de conducción adicional para el transporte de iones y por tanto la evaluación de las propiedades del transporte en la muestra de hormigón se obtiene en base a la ecuación (5) de Nernst Planck. (González, 2011)

Los ensayos de difusión se dividen en tres categorías ensayos de estado estacionario, ensayos de estado no estacionario y ensayos eléctricos. Los ensayos eléctricos pueden subdividirse en dos grupos, los de estado estacionario o ensayos eléctricos de estado no estacionario. La desventaja que presentan los ensayos eléctricos es que miden la conductividad del hormigón no

su difusividad, lo que conlleva a que exista una interpretación de los resultados dudosa y complicada, por lo que se recomienda evitar el empleo de los ensayos eléctricos si se dispone de tiempo para realizar los ensayos de difusividad, ya que los ensayos de estado estacionario y no estado estacionario necesitan de mucho tiempo. (Bioubakhsh, 2011)

1.4.2.3 Factores influyentes en la difusión del cloruro en el hormigón. Factor de formación

Existen varios factores que influyen en la difusión del cloruro en el hormigón que pueden ser la porosidad, dada a la relación agua – cemento, el tipo de cemento, el régimen de curado y la compactación, ya que el transporte de iones es a través de los poros; el tiempo, ya que a mayor tiempo existirá mayor concentración del ion en la superficie y la saturación del hormigón que posibilita los gradientes de concentración del ion.

La porosidad es un término que describe el volumen de poros en el sistema y la conectividad caracteriza cómo estos poros están conectados a través del sistema tridimensional, estos dos parámetros microestructurales influyen en la resistividad del material. Comúnmente el inverso del producto de estos dos parámetros es denominado factor formación, esta relación se muestra en la siguiente ecuación:

$$\phi * \beta = \frac{1}{F} \qquad (4)$$

Donde ϕ es la porosidad del material, β es la conectividad de los poros y el factor formación.

1.4.2.4 Efecto del ion cloruro sobre la difusión

El aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF) son las dos fases en el cemento responsables de la unión química del cloruro. Estas dos fases constituyen las de sales cloro férricas y de Friedel mencionada anteriormente. El grado de unión depende de la cantidad de aluminato y las fases de ferrito aluminato tetracálcico presentes en el cemento. En la mezcla los cloruros son adsorbidos por el gel de hidrato (CSH) de silicato de calcio amorfo, que depende del volumen de los productos de hidratación, en particular de la cantidad de (CSH) producido. La presencia de cloruros en el hormigón se ve afectada por muchos factores, como el tipo de cemento, tipo y proporción del material de sustitución de cemento, la relación a /c, tiempo de curado,

temperatura, concentración de cloruro y así sucesivamente. (Sumranwanich y Tangtermsirikul, 2004 citado en Bioubakhsh, 2011)

1.4.3 Absorción

La succión capilar se produce en el hormigón seco o seco parcialmente, cuando está en contacto con agua (los iones disueltos), debido a la tensión superficial en los capilares. (Bertolini et al. 2004). De forma tal que la capacidad de absorción está influenciada por los poros capilares y su grado de continuidad. Es muy sensible a la hidratación de la superficie externa del hormigón y por consiguiente del curado ya que el hormigón se mantiene semi saturado. La capacidad de absorción depende también de la compactación de la mezcla, orientación y distribución de los áridos y de la composición de la mezcla. (González, 2011)

La succión capilar puede propiciar el fenómeno de transporte en estado estacionario, si las condiciones de límite son mantenidas convenientemente en un tiempo constante. El agua asciende producto de la succión capilar en un elemento de hormigón en contacto con ella, mientras la evaporación del agua en el lado opuesto está en equilibrio con la toma superior de agua, la succión capilar transporta el agua encima de una cierta sección del miembro de hormigón en un proceso estacionario. (Cement Concrete & Aggregates Australia, 2009)

1.4.3.1 Factores que influyen en la sorptividad del hormigón

Dentro de los factores que influyen en la capacidad de absorción o sorptividad del hormigón están: la estructura de poros del hormigón y su estado de humedad. La estructura de poros del hormigón depende de una variedad de factores tales como el diseño de mezcla del hormigón (relación a/c, contenido de cemento, tipos de agregado y su granulometría), el régimen de curado y la compactación. La humedad del hormigón depende de las condiciones del entorno y la estructura de poros. La Tabla 1.4 muestra valores recomendados de relación a/c máxima, contenido de cemento mínimo, entre otros, a emplear en mezclas de hormigón según el nivel de agresividad del medio donde se desarrolle la estructura.

Tabla 1.4 Valores límites de relación a/c máxima, contenido mínimo de cemento, mínima resistencia característica a compresión del hormigón f'_{ck}, porosidad efectiva ξ máxima y velocidad de absorción de agua *S* máxima.

Parámetro	Tipo de hormigón	Nivel de agresividad (Ver Tabla 1 en la norma)			
		Muy alta	Alta	Media	Baja*
Máxima relación a/c	Simple sin refuerzo	0,5	0,55	0,65	0,65
	Armado	0,4	0,45	0,5	0,55
	pretensado	0,4	0,4	0,45	0,50
Contenido mínimo de cemento (Kg/m^3)	Simple sin refuerzo	200	200	200	200
	armado	350	325	300	275
	Pretensado	350	325	325	300
f_{ck} mínima (MPa)	Simple sin refuerzo	20	15	15	15
	Armado	35	30	25	20
	Pretensado	35	35	30	30
Máxima porosidad efectiva ξ (%) determinada según la Norma Cubana NC 345	Armado y pretensado	10	10	15	15
Máxima velocidad de absorción capilar (Sorptividad) *S* ($m/s^{1/2}$) determinada según la NC 967	Armado y pretensado	5×10^{-5}	5×10^{-5}	10^{-4}	10^{-4}
(*) Incluye el nivel de agresividad nulo Los elementos de hormigón simple con refuerzo serán tratados a los efectos de esta tabla como elementos de hormigón armado					

Fuente: NC: 120 2014

La variación del contenido de cemento determina la cantidad de pasta de cemento a agregar y las características de la interface de la pasta de cemento con el agregado, dependiendo esto del diseño de la mezcla. Kolias y Geargio (2005) demuestran que la capacidad de absorción se reduce a medida que el contenido de cemento disminuye con el uso del ensayo de absorción inicial de la superficie (ISAT). (Bioubakhsh, 2011)

Estudios realizados por Gonen y Yazicioglu (2007) sobre el efecto de la compactación en la capacidad de absorción del hormigón, variando los niveles de compactación en pobre, medio y alto demostraron que tiene un efecto muy importante sobre la capacidad de absorción. (Bioubakhsh, 2011)

Dias (2004) concluye en su investigación que la resistencia a compresión del hormigón influye en la capacidad de absorción de este ya que al obtener un hormigón compacto y resistente disminuye la capilaridad. (Bioubakhsh, 2011)

Con el fin de evitar la salida de agua en el hormigón por exudación, y así los poros provocados por esta, es necesario mantener la humedad y temperatura adecuada para que se desarrolle los procesos de fraguado y endurecimiento;

para lograrlo se emplea el curado del material que consiste básicamente en regarle agua o taparlo con mantas húmedas. La duración mínima del curado puede ser de:

- 3 días cuando se emplean cementos Pórtland de Alta Resistencia Inicial
- 7 días cuando se emplean cementos Pórtland ordinarios
- 15 días cuando se emplean cementos Pórtland con adiciones activas o se emplean adiciones activas directamente en el hormigón. (NC 120: 2014)

El efecto de la unión de cloruros en estudios experimentales sobre la absorción de agua por el hormigón, contaminada de cloruro demuestra que el frente de cloruro se mueve en el hormigón a un ritmo ligeramente más lento que en el agua donde se disolvieron los cloruros, sugiriendo que la unión de cloruro afecta a la cantidad de iones cloruros que se transportan por el flujo de la humedad. McCarter et al (1996) usando el ensayo de absorción inicial de la superficie mostró que, aunque el agua penetró a una profundidad de entre 40 a 50 mm de la superficie del hormigón, el cloruro avanzó solamente de 20 a 25 mm durante un período de 24 horas, lo que demuestra que la unión de cloruro influye en la absorción. (Bioubakhsh, 2011)

1.6 Técnicas de medición del ingreso del ion cloruro en el hormigón.

Son múltiples la cantidad de ensayos y estudios que se desarrollan en el tema de la explicación y caracterización de los fenómenos y procesos que intervienen en los mecanismos de transporte de iones cloruros a través del hormigón hidráulico, ya que es una de las principales causas que desencadena la corrosión del acero de refuerzo. Existen los métodos de evaluación in situ de cloruros, destructivos y no destructivos como se muestra en la Fig. 1.1 “Métodos y técnicas para medir la concentración de ion cloruro en el hormigón”, también existen los métodos de laboratorio, siendo los ensayos de migración de cloruros por potencial eléctrico uno de los más empleados, ya que permite obtener resultados de la penetración de iones cloruros a través de especímenes de hormigón en períodos de tiempo corto.

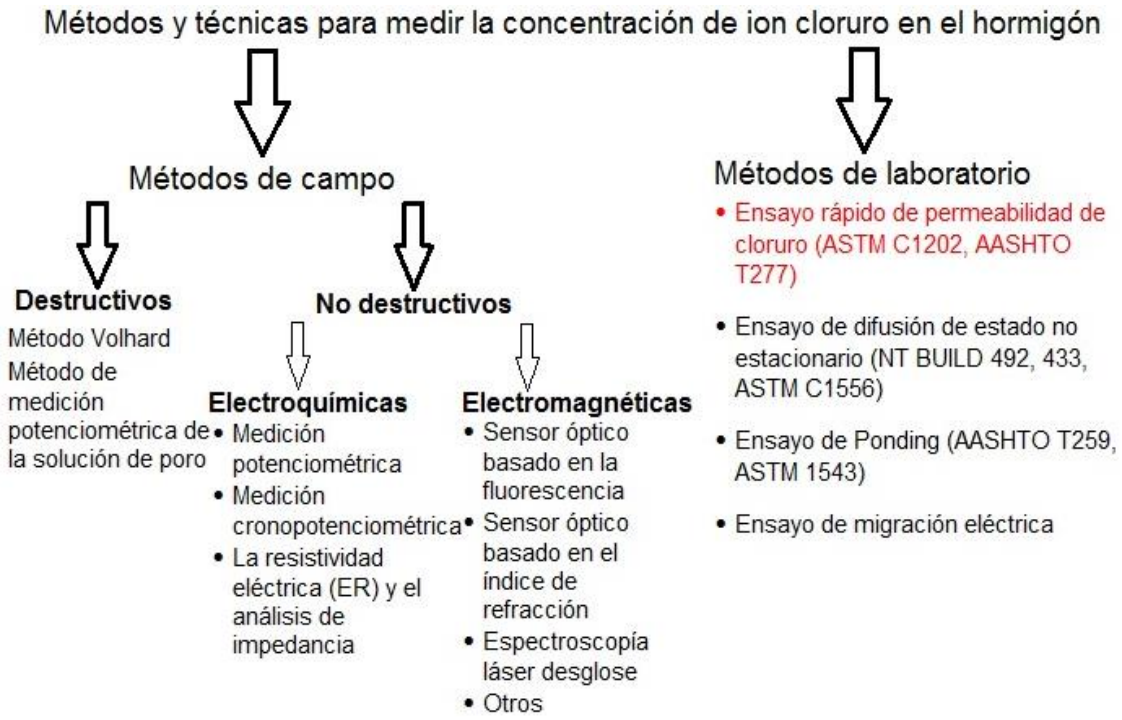

Fig. 1.1 Métodos y técnicas para medir la concentración de ion cloruro en el hormigón basado en Abbas (2015)

1.6.1 Métodos no destructivos para la evaluación in situ de cloruros

En las últimas dos décadas son diversos los estudios y los avances que se han alcanzado en las técnicas no destructivas de medición in situ de la penetración de iones cloruros en el hormigón, obteniendo resultados de la concentración del cloruro. Dentro del campo de aplicación de las técnicas de medición no destructivas in situ, se utilizan dos técnicas fundamentales las electroquímicas y las electromagnéticas.

1.6.1.1 Técnicas electroquímicas

Medición potenciométrica

La medición potenciométrica, usa un electrodo de Ag/AgCl. El electrodo de Ag/AgCl es un ion cloruro de electrodo selectivo (ISE), cuyo medio molecular potencial está en función de la concentración de iones cloruros. (Angst, 2010 citado en Abbas, 2015)

Medición cronopotenciométrica

Una alternativa para la medición potenciométrica clásica es la medición cronopotenciométrica. Esta es un método electroquímico dinámico, donde la respuesta del sistema es medida a un estímulo aplicado, reportando este enfoque para contrarrestar los problemas que se deriva de la respuesta potenciométrica. Cuando un impulso de corriente se aplica a un Ag/AgCl

electrodo de trabajo (WE), se muestra un cambio de potencial en función de la concentración de cloruro en el electrolito. El cloruro es consumido durante el pulso actual aplicado, debido a la reacción faradaic ($Ag+Cl^{-}\rightarrow AgCl$). Este cambio en la concentración cambia el medio molecular potencial del electrodo de trabajo. Después de algún tiempo el cloruro se agota completamente cerca de la superficie del electrodo de Ag/AgCl, seguido de un marcado aumento de su potencial. (Abbas et al. 2014 citado en Abbas 2015)

Resistividad eléctrica (ER) y análisis de impedancia

La resistividad eléctrica (ER) es una medición de iones y del contenido de humedad de una muestra de hormigón. En la medición de ER, un potencial (V) se aplica entre dos electrodos y la corriente (I) se mide. Con estos datos se puede calcular la resistencia eléctrica y la resistividad. Un aumento de la concentración de iones cloruros en el hormigón disminuye su resistividad, siempre que otros factores se mantengan constantes. (Polder, 2001 citado en Abbas, 2015) El análisis de impedancia utiliza la resistividad y cambios capacitivos en el hormigón debido al ingreso de cloruros. Una alternativa es aplicarle corriente al electrodo con un intervalo de barridos de frecuencia, y la impedancia es medida en el complejo. La curva se compara entonces con el modelo equivalente del electrodo en el hormigón, manteniendo otros parámetros constantes los perfiles de cloruros son calculados. (Vedalakshmi, 2009 citado en Abbas, 2015)

1.6.1.2 Técnicas electromagnéticas

Sensor de fibra óptica

El objetivo del sensor de fibra óptica es medir el contenido de cloruro libre en el hormigón. El principio del ensayo es cambiarle las propiedades ópticas de un transductor opto-químico en función de la concentración de cloruro. Existen dos formas de enfocar esta técnica: mediante el sensor óptico basado en la fluorescencia y mediante el sensor óptico basado en el índice de refracción. (Abbas, 2015)

Sensor óptico basado en la fluorescencia

Este mecanismo de detección se basa en la extinción por colisión de la molécula de fluorescencia por iones cloruros. La determinación de la concentración con las investigaciones opto-químicas se hace posible por el reciente desarrollo de fluoróforos. La extinción de colisión es un reversible proceso en el que la

intensidad emitida de moléculas de fluorescencia aumenta no linealmente con el aumento de la concentración de inhibidor, en este caso de iones cloruros. (Abbas, 2015)

Sensor óptico basado en el índice de refracción

El sensor óptico basado en el índice de refracción se basa en la modificación de la porción de una rejilla de fibra de período largo (GLP). Este sensor es extremadamente sensible a cualquier cambio del índice de refracción (RI) de la rejilla circundante, por lo tanto, la selectividad hacia el cloruro se ve reforzada por la incorporación de una monocapa de coloides de oro autoensambladas con el GLP. (Abbas, 2015)

Espectroscopía láser desglose

El método es capaz de detectar el contenido total de cloruro en una muestra de hormigón. Espectroscopía de plasma inducido por láser (LIBS) permite la medición de los elementos en la superficie de sólidos, líquidos y gases. En esta técnica primero un pulso láser, evapora una pequeña cantidad de elementos de la superficie de formación de una estela de plasma, esta radiación de plasma es entonces analizada mediante la técnica espectroscópica para detectar su composición. (Gehlen et al. 2009 citado en Abbas, 2015).

Infrarrojo cercano, milímetro y espectroscopía de microondas

El principio del ensayo de onda milimétrica (MMW) es similar al del ensayo infrarrojo cercano y espectroscopía de microondas. El MMW es enfocado a una muestra de hormigón a través de un prisma, la onda reflejada es entonces recogida en un oscilador Gunn, formando una reflexión total atenuada (ATR) del sistema de medición para medir los iones cloruro en el hormigón. El índice de refracción del medio reflectante debe ser mayor que la muestra de hormigón. (Tripathi et al. 2012 citado en Abbas, 2015).

Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

El ensayo de resonancia magnética nuclear (RMN) se utiliza para el análisis detallado de muestras de hormigón a escala atómica. La técnica de RMN es capaz de determinar la presencia y concentración de diferentes núcleos debido al comportamiento magnético de los núcleos de cada átomo. La posibilidad de detección de cloruro con RMN, además de la posibilidad casi simultánea de la medición de la humedad, del cloruro y el sodio hace al RMN un método adecuado

para obtener perfiles de cloruro en función del tiempo y la posición. (Petkovic et al. 2010 citado en Abbas, 2015).

Análisis de difracción de rayos X

La fluorescencia de rayos X es un método general para analizar la composición química de materiales inorgánicos. El haz de rayos X producido por micro ópticas capilares excita los diferentes átomos en el material designado, el tránsito de átomos excitados decae a un estado de energía menor mediante la emisión de una característica de rayos X que es detectada por un detector de rayos X. El análisis de los resultados con los datos tomados de las condiciones favorablemente controladas determina la proporción de cada elemento en el material. (Proverbio y Carassiti, 1997 citado en Abbas, 2015)

1.6.2 Técnicas destructivas para la evaluación in situ de cloruros

El método de Volhard y el método potenciométrico son métodos destructivos para la determinación de iones cloruros, ya que requieren de la extracción de la solución de poros del hormigón, en estos pueden resultar significativos los errores de medición, con resultados por debajo o por encima de lo estimado. Esto puede llevar a una decisión equivocada en el mantenimiento, también causan costos indirectos adicionales debido a los cierres de la vía y las demoras en el tránsito, en caso de que se trate del estudio de los elementos de un puente. Estas técnicas son usadas principalmente para decisiones a corto plazo con respecto al mantenimiento y actualización del modelo. (Torres et al. 2014 citado en Abbas, 2015)

1.6.2.1 Método de Volhard

La NC 344: 2005 “Hormigón endurecido — Determinación del perfil de penetración de iones cloruros” plantea que el ensayo se basa en la determinación de iones cloruro en muestras de hormigón obtenidos por medio de un corte en torno eléctrico con 0,2 cm de separación entre ellas. La muestra del hormigón tiene que obtenerse en seco ya que si se moja puede afectar en la determinación de cloruros, los cuales son solubles en agua. El procedimiento a seguir es tomar la probeta de hormigón endurecido y seco, colocarla en el torno de tal forma que la cuchilla del mismo corte la probeta de afuera hacia dentro en espesores de 2 mm, las muestras pulverizadas son clasificadas, pasándolas por el tamiz 160 µm, y lo que pasa es la muestra que se toma, la cual es almacenada

independiente. Se obtienen tantas capas en profundidad como sea necesario, hasta que dicha muestra de hormigón no posea iones cloruro. Cada muestra, por triplicado es sometida a análisis químico para determinar el contenido de cloruros.

1.6.2.2 Método de medición potenciométrica de la solución de poro

El método de Gran consiste en una valoración potenciométrica que se sigue con un electrodo selectivo iónico. Esta valoración se basa en una reacción de precipitación entre el analito A y el valorante V: A (ac)+V (ac) → P (s)

Existen dos variantes del método dependiendo de que la adquisición de datos (volumen-potencial) se realice antes o después del punto de equivalencia. Se representa gráficamente la función de Gran frente al volumen añadido de valorante. Esta función es proporcional al número de moles de analito en disolución si trabajamos antes del punto de equivalencia o proporcional al número de moles de valorante en disolución tras el punto de equivalencia. Tanto el número de moles de analito como el de valorante se anularán en el punto de equivalencia, por lo que la extrapolación de la función de Gran hasta que corte al eje de abscisas nos proporciona el volumen equivalente, del cual calculamos la concentración de analito. Si se utiliza el método de Gran antes del punto de equivalencia se deberá usar un electrodo selectivo del analito, mientras que tras el punto de equivalencia se deberá usar un electrodo selectivo del valorante. Si no se realiza de esta manera, la concentración del ion indicado será muy baja y las lecturas de potencial no serán suficientemente estables. (Sánchez, 2004)

1.6.3 Ensayo de migración de cloruros en el hormigón

En estos métodos de migración, se introducen artificialmente iones adicionales en la solución de poros, por la aplicación de un potencial eléctrico adecuado entre la fuente de iones y el hormigón. Los iones preferidos son los iones cloruro. Un campo eléctrico puede en gran medida acelerar el movimiento de iones a través del hormigón sin cambiar en lo fundamental el proceso de difusión. Esta aceleración es llamada migración y está gobernada por los mismos parámetros básicos de difusión: la movilidad iónica o difusividad. Whiting en 1981 fue el primer investigador en aplicar un campo eléctrico para acelerar el ensayo de penetración de cloruros en el hormigón y propuso el ensayo de permeabilidad rápida de cloruro, que ha sido estandarizado por la norma ASTM C1202 y por el

Organismo Regulador de las Obras Viales en los Estados Unidos. (González, 2011)

El término migración es usualmente empleado para el flujo iónico generado por una diferencia en el potencial eléctrico. Dependiendo de la variación de la concentración en el tiempo, estos ensayos se suelen dividir en dos tipos: estacionarios y no estacionarios. En estos ensayos conocidos como ensayos de migración, la muestra es saturada y sometida a una diferencia de potencial constante. Aunque desde hace años se proponen diversos tipos de montajes en general, desde hace un par de décadas se puede reconocer que el montaje recurrente para el propósito de determinar el coeficiente de difusión, es colocar una probeta de concreto o mortero de sección circular de 100 mm de diámetro y de 50mm de espesor, entre dos celdas en las que en la primera existe una solución de cloruros y en la otra una solución con concentración de elementos como sodio, potasio e hidróxidos. La diferencia de potencial hace que se presente el flujo iónico desde la celda con la solución de cloruros hasta la otra celda, a través del espécimen de hormigón. La duración del ensayo depende del espesor de la probeta. De igual forma la cantidad de diferencia de potencial aplicado es una variable que está vinculada a la propiedad de la muestra de resistirse al flujo de los iones. (González, 2014)

1.6.3.1 Ensayo rápido de permeabilidad de cloruros (Rapid Chloride Permeability Test (ASTM C1202)

El ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruro o ensayo rápido de permeabilidad al cloruro (RCPT) o la prueba de Coulomb, es desarrollado por primera vez por Whiting en 1981, es especificado por la norma ASTM C1202 (equivalente AASHTO T-277) es uno de los tantos ensayos que tienen por objeto estudiar los mecanismos de transporte de los iones cloruro dentro del hormigón. El método presentado en la norma consiste en generar un flujo no estacionario de iones cloruro a través de muestras de hormigón con diámetro de 100 mm y espesor de 50 mm (obtenidos por aserrado de la parte central de 100 × 200 mm de cilindros de hormigón) mediante la aplicación de un potencial eléctrico externo de 60 V. La muestra se coloca en una cámara de vacío durante 3 horas, vacío saturado con agua (desairada) por 1 hora y empapado durante 18 horas (después de apagar la bomba), después la muestra de hormigón saturada en

agua se coloca en el aparato de ensayo entre dos celdas, una de las celdas se llena con una solución de NaCl al 3 % y la otra celda se llena con solución de 0,3 M de NaOH. El sistema está conectado (el electrodo de NaCl es el cátodo y el electrodo NaOH es el ánodo) y un voltaje constante de 60 V se aplica a través de los dos lados de la muestra durante 6 horas. La cantidad de carga que pasa a través de la muestra se mide por registro de la corriente como una función del tiempo, después de 6 horas de carga total (en coulomb) es determinada calculando el área bajo la gráfica de la corriente vs el tiempo. (Zych, 2014)

La Fig. 1.2 muestra el esquema general del ensayo rápido de permeabilidad de cloruros (ASTM C1202):

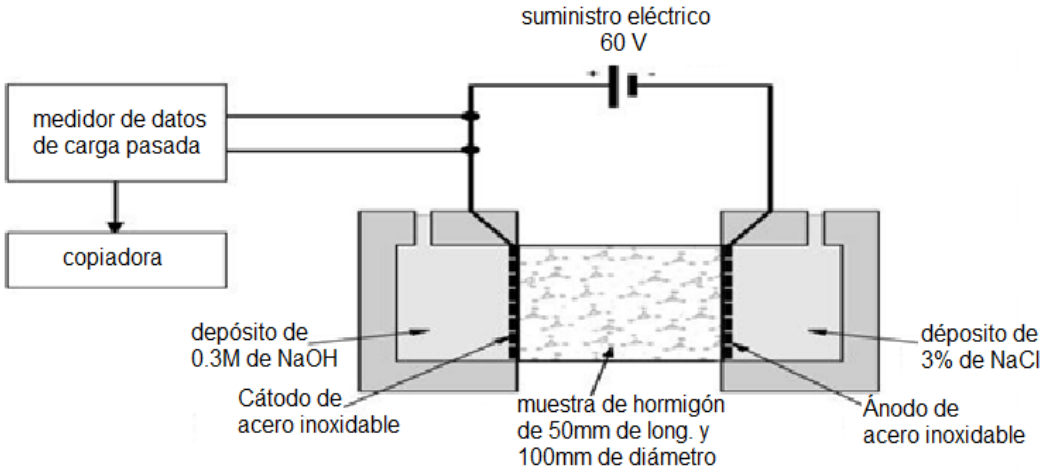

Fig. 1.2 Esquema general del ensayo de RCPT tomado de Stanish et al. 1997

El instrumento del RCPT que se emplea actualmente se muestra en la Fig. 1.3 “Instrumento del RCPT actual”.

Fig. 1.3 Instrumento del RCPT actual, tomada de GERMANN INSTRUMENTS, Inc. 2015

La Tabla 1.5 hace una estimación de la magnitud de penetración del ion cloruro según la carga pasada por el espécimen de hormigón en el ensayo.

Tabla 1.5 Valoración de la penetración de ion cloruro en la muestra de hormigón, según la cantidad de Coulomb pasados en el ensayo de RCPT

Carga pasada (coulombs)	Penetración de ion cloruro
> 4,000	Alta
2,000-4,000	Moderada
1,000-2,000	Baja
100-1,000	Muy Baja
< 100	Insignificante

Fuente: Stanish et al. 1997

1.6.3.2 Ensayo de difusión de cloruros (NT BUILD 492)

NT Build 492 (Nordtest) - Prueba de migración del estado no estacionario, también conocido como la migración de cloruro de prueba rápida (RMT), propuesto inicialmente por en Tang y Nilsson 1991, es una prueba muy simple y fiable. La prueba puede ser usada en diferentes tipos de hormigones. Para determinar el coeficiente de migración de cloruro bajo un estado no estacionario, se mide la profundidad de penetración de cloruro en el hormigón. El espécimen de hormigón saturado con CaOH está sometido a un voltaje eléctrico externo de 10 V a 60 V y los iones cloruro son forzados a moverse en el hormigón, debido a la diferencia de potencial entre los electrodos, los iones cloruro migran de la solución de NaCl 10 %, a través de la muestra de hormigón, hacia el 0,3 M solución de NaOH, por un período de tiempo definido. Posteriormente, la muestra se divide y rociado con $AgNO_3$ (nitrato de plata) - un indicador de cloruros - y por lo tanto la profundidad de penetración del cloruro es medida. El coeficiente de migración de cloruro es calculado sobre la base del valor obtenido por la medición. El método requiere muestras cilíndricas con un diámetro de 100 mm y espesor de 50 mm. Tres especímenes deben ser utilizados en el ensayo después del aserrado, lavado, secado y el tratamiento de vacío como se muestra en la Fig. 1.4 “Instrumental del ensayo de la resistencia del hormigón al cloruro NT Build 492”. (Zych, 2014)

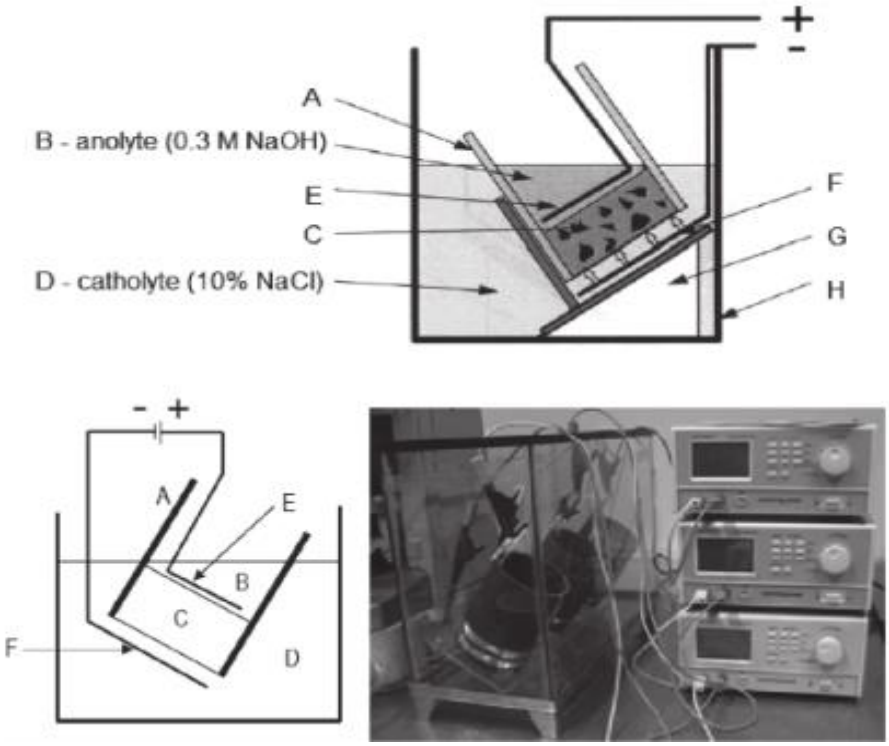

Fig. 1.4 Instrumental del ensayo de la resistencia del hormigón al cloruro NT Build 492
Fuente: Zych 2014

La Fig. 1.5 “Celda del NT Build 492” muestra la celda usada también en el ensayo NT Build 492.

Fig. 1.5 Celda del NT Build 492, tomado de GERMANN INSTRUMENTS, Inc. 2015

1.6.3.3 Método estándar de prueba para la resistencia del hormigón a la penetración de iones de cloruro (Salt Ponding Test) (AASHTO T259, ASTM 1543)

La prueba AASHTO T259 (comúnmente conocido como la prueba de encharcamiento de sal) es una prueba a largo plazo para la medición de la penetración de cloruro en el hormigón. La prueba requiere tres losas de al menos 75 mm de espesor y tienen un área superficial de 300 mm^2. Estas losas son curadas en humedad durante 14 días y después se almacenó en una cámara de

secado a 50 % de humedad relativa durante 28 días. Los lados de las losas se sellan pero no la parte inferior y superior. Después del período de acondicionamiento, una solución de 3 % de NaCl se machaca en la superficie superior durante 90 días, mientras que la cara inferior se deja expuesto al ambiente de secado. Se muestran detalles en la Fig. 1.6 “Esquema general del ensayo del Ponding”.

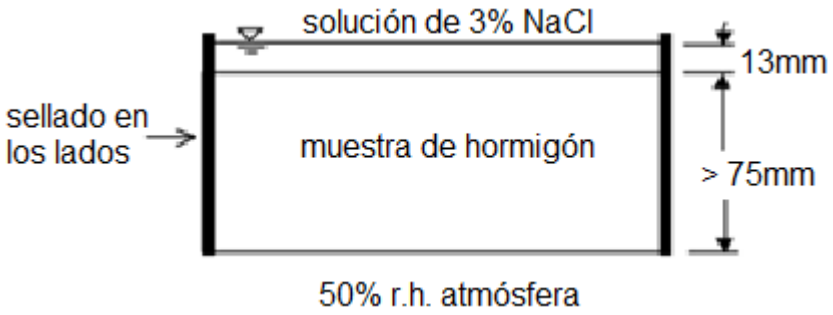

Fig. 1.6 Esquema general del ensayo del Ponding, tomado de Stanish et al. 1997

Al final de este tiempo las losas se retiran del entorno de secado y la concentración de cloruro se determina de rodajas gruesas 0,5 pulgadas (AASHTO T259). (Stanish et al. 1997)

1.6.3.4 Ensayo de migración eléctrica

El movimiento de cloruros se acelera a través del uso de un campo eléctrico que es de una intensidad menor que la utilizada en la RCPT. Los datos también se pueden recoger de manera diferente para evaluar mejor el movimiento real de iones cloruro (en lugar de simplemente la medición de la carga pasada). El movimiento de iones en una solución bajo un campo eléctrico se rige por la ecuación de Nernst-Planck que se muestra a continuación. (Andrade, 1993 citado en Stanish et al. 1997):

$$-\mathrm{J}i = \mathcal{D}i\,\frac{\partial \mathrm{Ci}\,(\mathrm{x})}{\partial \mathrm{x}} + \frac{\mathrm{z}i\,\mathrm{F}}{\mathrm{RT}}\,\mathrm{DC}i\,\frac{\partial \mathrm{E}\,(\mathrm{x})}{\partial \mathrm{x}} + \mathrm{C}i\,\mathrm{v}i(\mathrm{x}) \qquad (5)$$

Los ensayos de migración eléctricas se realizan en una celda de dos cámaras con la muestra de hormigón en la división entre las dos cámaras, como se muestra en la Fig. 1.7. La muestra de hormigón puede ser de cualquier tamaño, pero generalmente es un disco de 100 mm de diámetro y la longitud de 15 a 50 mm. El espesor del disco afectará a la duración de la prueba, pero se requiere un tamaño suficiente para evitar las influencias de la interfaz de agregado. Si el tamaño del agregado es comparable con el espesor de la muestra, a

continuación, puede existir una zona de transición débil alrededor del agregado que se extiende la mayor parte del camino a través de la muestra. Inicialmente, la cámara catódica contiene iones cloruro, pero la cámara del ánodo está libre de cloruro. La solución anfitrión varía, pero es normalmente o bien agua destilada o agua de cal. El cambio de concentración de cloruro con el tiempo permite el cálculo de los coeficientes de difusión. (Stanish et al. 1997)

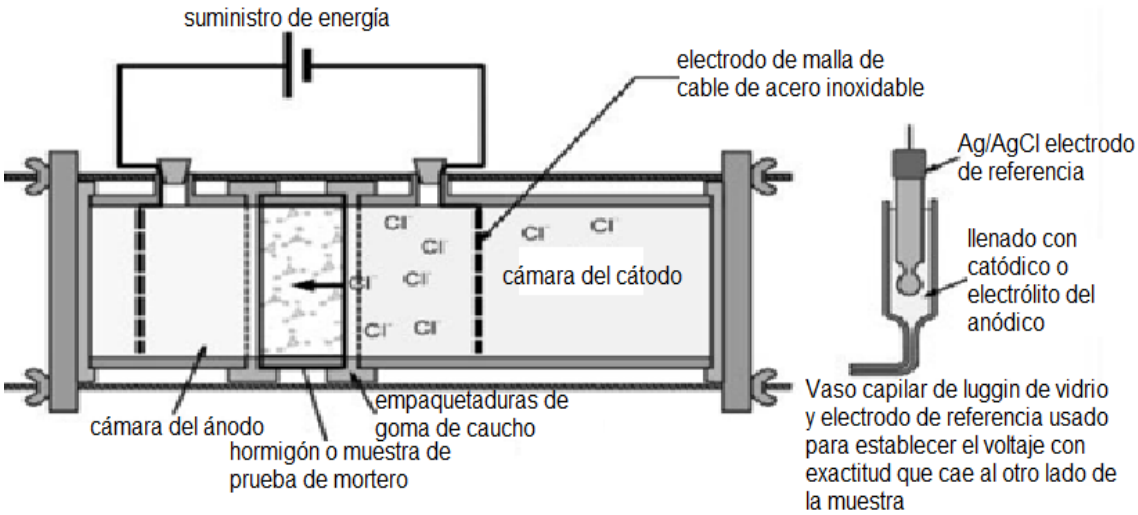

Fig. 1.7 tomado de Stanish et al. 1997

1.6.3.5 Software para el Transporte y la Degradación de Materiales no Saturados (STADIUM®).

Peraza (2014) plantea que SIMCO Technologies, Inc. desarrolló en Quebec, Canadá un modelo numérico que puede usarse en la predicción del transporte de iones y de líquidos en un medio poroso, llamándose Software para el Transporte y la Degradación de Materiales no Saturados (STADIUM®). (Marchand et al. 2002); (SIMCO, 2008). El principio del método de ensayo STADIUM está basado en los ensayos de la determinación de la resistencia a la penetración de iones cloruro o ensayo rápido de permeabilidad al cloruro (RCPT) o la prueba de Coulomb de la ASTM C1202, los cuales aplican un potencial eléctrico de 0-30V para agilizar el proceso del transporte de iones cloruro a través del espécimen de hormigón, prediciendo así la respuesta que puede tener el hormigón sometido al entorno agresivo, como el ambiente marino. STADIUM está formado por dos módulos principalmente, uno es que toma en cuenta la interacción entre el transporte de iones y el transporte de humedad sin tener presente las reacciones químicas que se desatan en el proceso y el otro módulo

es teniendo en cuenta las reacciones químicas, que cuando se combinan se predice con exactitud el daño químico que ocurre en la estructura de hormigón.

El método STADIUM percibe tres procedimientos experimentales diferentes:

✓ Porosidad: Prueba estándar de la (ASTM C642), para densidad, absorción y vacíos en el hormigón endurecido.

✓ Migración de iones: Versión modificada de la prueba de la ASTM C1202.

✓ Secado: Versión modificada de la ASTM C1585.

El ensayo de migración de iones brinda resultados sobre la resistencia que alcanza el espécimen de hormigón a la penetración de iones cloruro. Se toman muestras de la diferencia de potencial que ocurre en ambas caras del espécimen y la intensidad de la corriente que se genera en la celda de abajo por el transporte de iones.

1.7 Perspectiva de la durabilidad del hormigón hidráulico en el Siglo XXI

El deterioro progresivo y comúnmente veloz de las estructuras de hormigón armado, conlleva a problemas en el campo de la ingeniería y en el económico. La corrosión del acero de refuerzo es la principal causa de deterioro de las estructuras de hormigón, seguidamente siendo la penetración del ion cloruro el proceso que ataca más al acero. Por tal razón modelos que predicen la penetración del ion cloruro en la vida útil de las estructuras de hormigón armado durante el final del siglo XX y lo que va del XXI se han desarrollado con el objetivo de aportar elementos que ayuden a comprender mejor este fenómeno de deterioro. (González, 2014)

Actualmente en el mundo es tema de estudio la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, ya que se pretende lograr estructuras estables durante su vida útil. Hoy en día son múltiples las alternativas e investigaciones que se promueven con tal objetivo, una alternativa determinante en la durabilidad del hormigón es el empleo de nuevos materiales constituyentes, que aportan nuevas propiedades. Existe varias alternativa en cuanto al empleo de materiales novedosos en nuestro país como la utilización de cemento de bajo carbono (LC^3) en la fabricación de hormigón, el uso de materiales cerámicos en la fabricación de cementos para morteros, el reciclaje de áridos procedentes de hormigones, la evaluación para el posterior empleo de arcillas de bajo grado de caolín, entre

otros que permitan mejorar las propiedades del hormigón, el ahorro del propio cemento Pórtland y de los áridos.

Conclusiones parciales del Capítulo I

- El comportamiento de la durabilidad del hormigón hidráulico en ambientes marinos es afectado principalmente por la corrosión del acero de refuerzo, que a su vez es causa fundamental de los mecanismos de penetración o transporte del ion cloruro: permeabilidad, difusión o absorción.
- Los ensayos de laboratorio como RCPT, *NT Build 492, Salt Ponding Test* y el ensayo de migración eléctrica emplean iones cloruros en las soluciones empleadas, para obtener el coeficiente de difusión, de una forma rápida mediante la aplicación de un potencial eléctrico de 10 a 60 voltios, excepto en el caso del ensayo de Salt Ponding Test que requiere un período de duración de 90 días sin presencia de potencial eléctrico.
- El ensayo de laboratorio de migración de iones aplicado en el protocolo STADIUM se basa en el principio del ensayo de RCPT de la norma ASTM C1202, ofrece resultados útiles para evaluar la durabilidad de hormigones hidráulicos, tomando en cuenta el transporte o penetración de iones cloruros.

Capítulo II: Aplicación del protocolo STADIUM para la evaluación de la migración de iones cloruros en hormigones fabricados con cementos de bajo carbono LC^3

En este capítulo se expone el desarrollo experimental empleado en la obtención de los resultados para evaluar la durabilidad de los hormigones hidráulicos ante la transportación del ion cloruro. Para lograr este objetivo se describe las características de los materiales constituyentes, la metodología desarrollada en el ensayo de migración de iones cloruros por el protocolo STADIUM, los equipos e instrumentos empleados en el mismo.

Para el cumplimiento de este objetivo se extrajeron testigos de hormigón de diferentes elementos prefabricados ubicados en el sitio de exposición #1 Cayo Santa María, posteriormente fueron trasladados al laboratorio de materiales de construcción de la Facultad de Construcciones en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, donde se prepararon los especímenes para el ensayo de migración de iones cloruros.

2.2 Diseño experimental de mezclas de hormigón para elementos estructurales y especímenes

En el presente trabajo de diploma se tiene en cuenta el análisis de hormigones previamente producidos, a partir del diseño experimental que evalúa la influencia del tipo de cemento, la relación agua/cemento, contenido de cemento en la composición del hormigón producido con cemento LC^3 y P-35 en las propiedades durables ante el transporte del ion cloruro, para lograrlo se siguieron varias acciones:

1. Extracción de testigos en los elementos estructurales expuestos en el sitio de exposición #1 de Cayo Santa María con un nivel de agresividad marina muy alta durante dos años.
2. Conservación y preparación de los especímenes de hormigón.
3. Preparación de las celdas de ensayo, soluciones de hidróxido y cloruro de sodios.
4. Ensamblaje de las celdas con el espécimen y llenado de celdas.
5. Conexión de un voltaje de corriente directa de 20 V a las celdas.
6. Toma de mediciones de voltaje (Ve), diferencia de potencial (Vc) e intensidad de la corriente (I).

2.3 Caracterización de los materiales constituyentes del hormigón

2.3.1 Cementos

Se emplearon dos tipos de cementos: cemento Pórtland P-35 de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos y el cemento de bajo carbono LC^3 de la fábrica de cemento Siguaney, de Sancti-Spíritus. Los datos del análisis químico del LC^3, realizado en la fábrica de cemento Siguaney, se muestran en la Tabla 2.1 "Análisis químico del cemento LC^3".

Tabla 2.1 Análisis químico del cemento LC^3

Compuesto químico	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	RI	PPI	CaO_{libre}
%	27.33	4.58	4.58	49.80	1.30	3.65	12.59	7.11	0.90

Fuente: Pérez 2015

Los aglomerantes empleados se caracterizaron según los ensayos estandarizados en la NC 95: 2011 "Cemento Pórtland. Especificaciones" para evaluar su conformidad. En la Tabla 2.2 se muestra las características físico-mecánicas fundamentales de los aglomerantes empleados.

Tabla 2.2 Características físico-mecánicas de los cementos

Ensayo	Unidad	Cemento	
		P-35	SIG-B45
Tiempo de Fraguado Inicial	min	140	135
Tiempo de Fraguado Final	h	4.51	2.9
Consistencia Normal	%	25.4	25.0
Peso Unitario Suelto	kg/m^3	—	—
Finura de Molido Tamiz 170	%	0.1	—
Peso Específico Real del Cemento		—	2.92
Resistencia a Compresión a 7 días	MPa	35.2	17.5
Resistencia a la Flexo-tracción a 7 días	MPa	6.1	—
Resistencia a Compresión a 28 días	MPa	44.1	30.3
Resistencia a la Flexo-tracción a 28 días	MPa	9.8	—

Fuente: Pérez 2015

2.3.2 Áridos

El árido grueso empleado producto de la trituración de rocas calizas, procede de la cantera Raúl Cepero Bonilla (Palenque), de fracción 19 -10 mm. Se emplearon dos áridos finos: polvo de piedra de la propia cantera de Palenque y arena procedente de la cantera Mariano Pérez (El Purio). Para la caracterización físico-mecánica de los áridos, la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas (ENIA) de Villa Clara realizo ensayos teniendo en cuenta las normas cubanas: NC 251: 2013 "Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos", la NC 178: 2002 "Áridos-Análisis granulométrico", la NC 179: 2002 "Áridos-Determinación del contenido de partículas de arcilla-Método de ensayo", la NC 187: 2002 "Árido

grueso-Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo" y la NC 182: 2002 "Áridos-Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)-Método de ensayo". La caracterización de estos materiales se muestra en las Tablas 2.3 y 2.4. (Pérez, 2015)

Tabla 2.3 Características físico-mecánicas de árido grueso

Ensayos	UM	Cantera Palenque
Material más Fino que el Tamiz 200	%	0.28
Partículas de arcilla.	%	0.06
Partículas planas y alargadas	%	2.7
Peso específico corriente		2,52
Peso Específico Saturado		2,57
Peso Específico Aparente		2,67
Absorción	%	2,3
Masa Volumétrica Suelta	kg/m^3	1387
Masa Volumétrica Compactada	kg/m^3	1530

Fuente: Pérez 2015

Tabla 2.4 Características físico-mecánicas de áridos finos

Ensayos	UM	Cantera Palenque	Cantera Purio
Material más Fino que el Tamiz 200	%	0.5	0.5
Partículas de arcilla.	%	0.8	0.8
Partículas planas y alargadas	%	-	-
Peso específico corriente		2.52	2.52
Peso Específico Saturado		2.59	2.59
Peso Específico Aparente		2.72	2.72
Absorción	%	3.0	3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m^3	1563	1563
Masa Volumétrica Compactada	kg/m^3	1709	1709

Fuente: Pérez 2015

2.3.2.1 Granulometría de los áridos

Los resultados del proceso granulométrico estipulado por la NC 178: 2002 se muestran en la Tabla 2.5 "Granulometría de los áridos".

Tabla 2.5 Granulometría de los áridos

Tamiz(mm)	% Pasado		
	Gravilla	Polvo	Arena Purio
25.4	100	-	-
19.1	58	-	-
12.7	1	-	-
9.52	0	100	1
4.76	-	99	9
2.38	-	70	7
1.19	-	46	5
0.595	-	28	3
0.297	-	17	1
0.15	-	11	5
0.08	-	7	-

Fuente: Pérez 2015

2.3.3 Aditivo

Se empleó un aditivo superplastificante, Dynamon SX32, este aditivo es producido a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehido, posee como propiedades el aumento en la trabajabilidad del hormigón, logra reducir la relación agua- cemento en el hormigón, proporcionándole una adecuada permeabilidad y una alta resistencia mecánica. Es suministrado por MAPEI (Materiales Auxiliares para la Construcción y la Industria) una empresa italiana, los datos técnicos ofrecidos por el fabricante se muestran en la Tabla 2.6 "Características del aditivo Dynamon SX32". La dosificación para el empleo del aditivo en volumen puede variar entre 0.5 y 1.5 litros por cada 100 kg de cemento. (Pérez, 2015)

Tabla 2.6 "Característica del aditivo Dynamon SX-32"

Composición química	Base de polímeros acrílicos no sulfonados
Densidad (g/cm^3)	1.08 ± 0.02 a 20° C
pH	6.5 ± 1
Residuo seco (%)	22.1 ± 1.1
Contenido de Cloruro (%)	<0.1
Contenido de Álcali (Na_2O) equivalente (%)	<3.5
Clasificación	Superfluidificante

Fuente: Pérez 2015

2.3.4 Agua de amasado

Se empleó agua potable según la NC 353: 2004 "Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones". Esta especifica que se considera apta para el amasado y curado de los hormigones y morteros el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos, con materiales análogos y uso semejante.

2.4 Dosificación de las mezclas de hormigón empleadas

La dosificación elegida para los hormigones de esta investigación responden a una resistencia de diseño de 20 y 25 MPa, con una proporción de árido grueso/árido fino de 57:43 y la inclusión de aditivos (MAPEI) para lograr un asentamiento en planta y en obra de 12 ± 3 cm por el Cono de Abrams clasificado según la NC 120: 2014 "Hormigón hidráulico. Especificaciones" como consistencia fluida. La Tabla 2.7 muestra los valores de las dosificaciones para los hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC^3 y la Tabla 2.8

"Dosificaciones empleadas en elementos de la Empresa de Producción Industrial (EPI) Villa Clara" muestra datos como la resistencia a compresión, el contenido de cemento en la mezcla, la relación agua/cemento, la cantidad de aditivo, el asentamiento obtenido, la fecha en que fueron fabricados y el lugar de procedencia de los áridos.

Tabla 2.7 Dosificación empleada en los hormigones con cemento LC^3

Materiales	Dosificación gravimétrica kg		Dosificación volumétrica m^3		Gasto de materiales/m^3	
	20MPa	25MPa	20MPa	25MPa	20MPa	25MPa
Cemento LC^3	330	360	1	1	0.33	0.360
Polvo 0-5mm Palenque	807	780	1.841	1.633	0.538	0.520
Gravilla 19-10 mm Palenque	1069	1034	2.716	2.346	0.793	0.747
Agua	155	169	0.531	0.53	155 L	169 L
Aditivo Dynamon SX-32	3.7	4.037	---	---	3.701 L	4.037 L
R. a/c Amasada	0.47	0.47	---	---	---	---
R. a/c Efectiva	0.4	0.4	0.4	---	---	---

Fuente: Pérez 2015

Tabla 2.8 Dosificaciones empleadas en elementos de la EPI Villa Clara.

Ident.	Dosif.	Resist.	Cem. kg/m^3	a/c	A.fino	A.grueso	Aditivo L/m^3	Fecha
M25	D4-LCC	25MPa	360(LC^3)	0,47	Palenque	Palenque	4.04	6/2/2014
M30	D3-LCC	20MPa	330(LC^3)	0,47	Palenque	Palenque	3.7	8/2/2014
M32	D10-P35	25MPa	300(P35)	0,40	Palenque	Palenque	2.8	10/2/2014
M35	D9-P35	20MPa	270(P35)	0,59	Palenque	Palenque	2.8	11/2/2014
M381	DA-LCC	25MPa	360(LC^3)	0,47	Palenque	Palenque	4.04	2/11/2013

2.5 Método experimental

En esta sección se describe el método y el procedimiento empleado en el experimento de migración de iones cloruro por el protocolo STADIUM.

2.5.1 Protocolo STADIUM. Metodología aplicada

El protocolo STADIUM cuenta con tres métodos experimentales:

- Porosidad, estandarizado por la ASTM C642, ofrece resultados de densidad específica, absorción y el volumen de vacíos en el hormigón endurecido.
- Secado, versión modificada de la norma ASTM C1585, permitiendo obtener el coeficiente de transporte de humedad de los materiales cementicios, midiendo la pérdida masiva de agua debido a la evaporación y al transporte de humedad en los especímenes de hormigón.
- Migración de iones cloruro, versión modificada de la norma ASTM C1202.

Este último método experimental nos permite obtener el coeficiente de difusión y por tanto evaluar la resistencia del espécimen de hormigón ante la transportación de iones cloruros, midiendo la intensidad de la corriente que llega al electrodo positivo de la celda y la diferencia de potencial que ocurre en las caras del espécimen, mediante un voltímetro digital por más de 3días, el equipamiento consiste en dos celdas acopladas mecánicamente por tornillos que le dan el ajuste que las impermeabiliza, ya que dentro de la celda de arriba está la solución de 0.5 moles de cloruro de sodio (NaCl) + 0.3 moles de hidróxido de sodio (NaOH) y 0.3 moles de NaOH en la celda de abajo. En el centro entre estas dos celdas se encuentra el espécimen de hormigón sellado con silicona epóxica. En los extremos derecho e izquierdo de las celdas se encuentra la conexión de los electrodos con los cables que transmiten la carga de 19-21 V, es posible obtener la estabilidad en el voltaje del sistema por una fuente que convierte la corriente alterna en directa. En la Fig. 2.1 “STADIUM Migración de iones” se muestran detalles de las celdas acopladas con el espécimen en el centro.

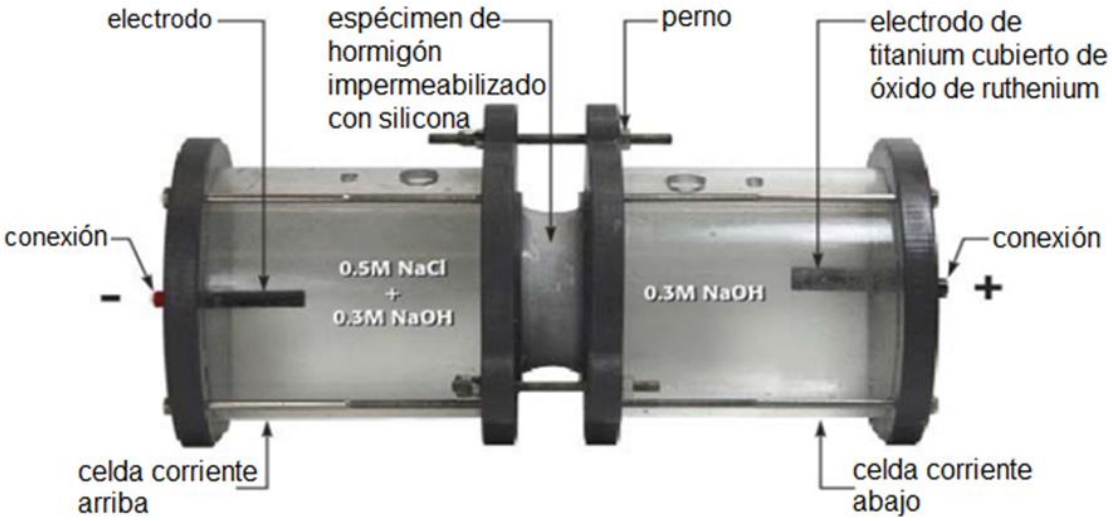

Fig. 2.1 STADIUM migración de iones tomada de SIMCO Technologies Inc. 2011

2.5.2 Equipos, instrumentos y materiales empleados en la migración de iones

2.5.2.1 Equipos y materiales empleados en la extracción de testigos

1. Taladro fijo con broca de 100 mm de diámetro.
2. Pinza para sacar los testigos.
3. Agua para enfriar la broca en el proceso de taladrado
4. Naylon retráctil, para envolver los testigos, manteniendo las condiciones originales de exposición.

2.5.2.2 Equipos empleados en los cortes de los especímenes

1. Sierra inglete para el corte, marca Maraga, con disco diamantado de corte de 2.4 mm de espesor y 180 mm de diámetro marca HUNTER.
2. Pie de rey, para medir los espesores y diámetros con precisión de 0.001 mm.
3. Lápiz para marcar.

2.5.2.3 Equipos empleados en la saturación y en la saturación al vacío de los especímenes

1. Recipiente de vidrio para almacenar los especímenes en NaOH (saturación).
2. Recipiente de vidrio (hermético) con boquilla para la saturación al vacío de los especímenes en NaOH.
3. Bomba de vacío, conectada por una manguera a la boquilla del recipiente anterior

2.5.2.4 Equipos empleados para el ensayo de migración de iones cloruros

1. Celda de migración ensamblada.
2. Fuente para el suministro constante de voltaje, de potencia 0-30 V, intensidad de corriente 0–2 A.
3. Voltímetro digital: medición de potencial en el intervalo de 12–24 V, intervalo de intensidad de corriente de 0.1 mA, precisión en el orden de 0–200 mA y hasta 0.01 A, con precisión de 0.2-1 A.
4. Alambres conductores de electricidad que conecten la fuente de energía con los electrodos conectados a las celdas. La resistencia eléctrica de cada alambre debe ser de al menos de 0.01 ohm.
5. Pie de rey, equipo para medir el espesor y el diámetro de los especímenes de hormigón, precisión de 0.02 mm.
6. Balanza, precisión: 0.01g.
7. Embudo y envases (fabricados de un material resistente al producto químico).

2.5.2.5 Materiales y reactivos

1. Solución acuosa de NaCl, con una concentración de 0.5 moles, mezclado con NaOH, con una concentración de 0.3 moles.
2. Solución acuosa de NaOH con una concentración de 0.3 moles.
3. Sellantes: silicona epóxica para los especímenes y grasa especial para las celdas

4. Agua destilada para la preparación de las soluciones.

Tabla 2.9 Composición química en g/litro de las soluciones.

Sal/Base (pureza 99%)	Solución Celda (arriba) 0,5M(NaCl)+0,3M(NaOH)	Solución Celda(abajo) 0.3M(NaOH)
NaOH (g/litro)	12.121	29.515
NaCl (g/litro)	29.515	0

Fuente: SIMCO Technologies Inc. 2011

2.5.2.6 Medios de protección utilizados

Resulta adecuado el empleo de diversos medios tales como gafas protectoras, guantes de goma y protectores de las vías respiratorias para evitar inhalar gases tóxicos y polvos generado por el corte de los especímenes.

2.5.3 Ensayo de migración de iones cloruro. Procedimiento desarrollado

2.5.3.1 Extracción de testigos

Los testigos de aproximadamente 100 mm de diámetro fueron extraídos por el taladrado con broca a elementos prefabricados de hormigón ubicados en el sitio de exposición #1 en Cayo Santa María como muestra la Fig. 2.2. Se extrajeron dos testigos por cada elemento para un total de diez.

Fig. 2.2 Extracción de testigos

2.5.3.2 Preparación de los especímenes

- Se cortó dos especímenes por cada testigo a 31 mm de espesor para un total de 10 especímenes por 5 testigos como se muestra en la Fig 2.3. los primeros 40 mm se emplearon en los ensayos de carbonatación.

Fig. 2.3 Corte de especímenes

- Se introdujo en solución de NaOH a 0.3 moles durante 3 días.
- Se extrajo los especímenes, se rebajaron, se pulieron sus caras a 27 mm de espesor.

- Se introdujo en solución de NaOH a 0.3 moles por 7 días.
- Se sacó los especímenes M 381-A, M 381-B, M 32-A y M 32-B y fueron colocados en saturación al vacío por 3 días. La Fig. 2.4 muestra la actividad de saturado al vacío.

Fig. 2.4 Saturación al vacío

Una vez extraídas se sacaron de saturación al vacío los especímenes mencionados, fueron colocados los M 25-A, M 25-B, M 35-A y M 35-B en saturación al vacío, estableciendo un ciclo continuo.

2.5.3.3 Procedimiento experimental desarrollado en el ensayo de migración de iones

1. Secado de las superficies de los especímenes saturados con una tela de algodón limpia o un tejido fino y suave.

2. Medición de la geometría de cada espécimen. El diámetro y el espesor deben se midieron con una precisión de 0.001 mm. Cada parámetro se determinó por el promedio de las tres medidas del espesor y dos medidas del diámetro (como mínimo). También se pesó el espécimen con la superficie seca con una precisión de 0.1 g.

3. Montado y sellado de cada espécimen encima de los dos anillos de conexión, usando la silicona, y fue completada la capa de todas las superficies laterales con silicona (2–3 mm de espesor).

4. Colocación de los especímenes en un área bien ventilada y se cubrió las superficies expuestas con papel mojado por alrededor de 2 horas, hasta que la silicona estuviese lo suficientemente seca y fuerte como para manipularla.

5. Se removió cualquier cantidad de silicona excedente de la superficie interior del espécimen a lo largo de los bordes del anillo, para obtener una máxima superficie de exposición. Se tomó en cuenta minimizar la contaminación de las superficies expuestas por la silicona.

6. Medición de los diámetros de las áreas efectivas de los especímenes, usando dos mediciones en posiciones diferentes de forma radial (dos mediciones a cada celda). Estos diámetros deben ser aproximadamente iguales pero no más grandes que el diámetro de la boca del anillo.

7. Montaje del espécimen con los dos anillos encima de las dos celdas. Se evitó la fuga de la solución, aplicando grasa de vacío donde el anillo ensamblado está en contacto con las celdas. Se garantizó que los pernos estén bien apretados manteniendo unidas las dos celdas. Se llenaron las celdas con agua para comprobar que no haya fugas. Después de este paso de control, se vació el agua de las celdas y se quitó el agua excedente con un tejido fino y suave.

8. Relleno de la primera celda con la solución de NaOH, con una concentración de 0.3 moles. (Ver Tabla 2.9 Composición química de las soluciones). La Fig. 2.5 muestra el llenado de las celdas.

Fig. 2.5 Llenado de celdas

9. Relleno de la otra celda con una mezcla de la solución de NaCl a una concentración de 0.5 moles, con una solución de NaOH a una concentración de 0.3 moles. Como se muestra en la Tabla 2.9 “Composición química de las soluciones”.

10. Cuando el sistema estuvo colocado y conectado a todos los electrodos de las celdas se conectó el sistema a la fuente de electricidad como se muestra en la Fig. 2.6 “Migración de iones STADIUM”.

Fig. 2.6 Migración de iones STADIUM.

11. Encendido de la fuente de electricidad. Ajustar la salida de potencial para obtener una diferencia de potencial de 16–20 V a través de todos los especímenes. Registrar el potencial en los electrodos (Ve) y la diferencia de potencial a través del espécimen (Vc) como se observa en la figura 2.7 “Diferencia de potencial”.

Fig. 2.7 Diferencia de potencial

12. Medición de la corriente que pasa a través de cada espécimen por más de 3 días como se representa en la Fig. 2.8.

Fig. 2.8 Intensidad de la corriente

- Si la corriente está entre 5-100 mA entonces el nivel de potencial ha sido correctamente colocado. Registrar las lecturas iniciales de intensidad de corriente (para una precisión de 0.1 mA), y el potencial a través del espécimen (con una exactitud de 0.1 V). Registrar la fecha, la hora, la temperatura en ºC y la humedad relativa en cada medición.

14. Durante el primer día de pruebas, se tomó las medidas de la intensidad de corriente (I) que pasa a través de los especímenes y los potenciales (Ve: en el electrodo y Vc: la diferencia de potencial de cada espécimen), en la hora cero (comienzo de la prueba) y después cada 1 hora.

15. Después del primer día, las medidas del paso de corriente a través de cada espécimen y la diferencia potencial se hicieron cada 2, 4 y 12 horas respectivamente.

Una vez realizados todos los ensayos con los datos que se obtuvieron del paso de corriente a través de los especímenes, el programa es capaz de predecir el tiempo de vida de las estructuras de hormigón a través del ensayo de migración, mediante equipamiento desarrollado por STADIUM®-IDC.

2.6 Resultados obtenidos en el ensayo de migración de iones por el protocolo STADIUM

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de diferencia de potencial (Vc en Volts) e intensidad de la corriente (I en mili-Amperes) en el tiempo, para los especímenes de los testigos M 381, M 32, M 25, M 35 y M 30.

Tabla 2.10 Medición de diferencias de potencial Vc e Intensidad de la corriente en especímenes M 381-A y M 381-B

Tiempo (min)	M 381			
	M 381-A		M 381-B	
	Vc(V)	I(mA)	Vc(V)	I(mA)
0	18.23	30.2	18.25	32.8
110	18.19	27.9	18.18	29.6
170	18.17	27.4	18.15	29.1
230	18.14	27	18.18	28.7
290	18.19	26.7	18.16	28.3
350	18.18	26.3	18.17	27.7
410	18.18	26	18.19	27.6
470	18.24	25.8	18.22	27.4
530	18.22	25.7	18.18	27.4
590	18.23	25.7	18.23	27.4
650	18.26	25.7	18.24	27.3
710	18.26	25.5	18.24	27.4
770	18.26	25.5	18.23	27.2
830	18.29	25.2	18.26	27.1
890	18.24	25	18.26	26.9
950	18.22	25	18.25	26.7
1010	18.05	24.8	18.05	26.6
1070	18.07	24.7	18.03	26.5
1130	18.3	24.6	18.28	26.3
1190	18.27	24.4	18.21	26.3
1250	18.07	24.1	18.08	26
1310	18.03	24.2	18.08	26
1430	18.1	24	18.12	25.7
1550	18.33	24	18.29	25.6
1670	18.16	24	18.16	25.5
1910	18.15	23.7	18.14	24.9
2150	18.12	24.4	18.13	25.5
2390	18.1	24.5	18.12	25.5
2630	18.1	25.4	18.15	26.2
2870	18.48	26.3	18.54	27
3110	18.46	26.5	18.52	26.8
3350	18.5	26.4	18.54	26.6
3590	18.49	27.5	18.31	27.6
3830	18.45	28	18.5	28.1
4070	18.49	28.6	18.48	28.6
4310	18.51	28.8	18.51	28.6
4550	18.45	29.3	18.42	29.2
4790	18.41	29.5	18.41	29.2
5030	18.39	30.8	18.39	30.2
5750	18.36	33.2	18.38	32.2
6470	18.35	34.2	18.47	33

La Fig. 2.9 muestra la trayectoria de la diferencia de potencial en función del tiempo, donde la diferencia de potencial en los especímenes M 381-A y M 381-B oscila entre 18.51-18.03 V, y 18.54-18.03 V respectivamente en un tiempo total de 6470 minutos.

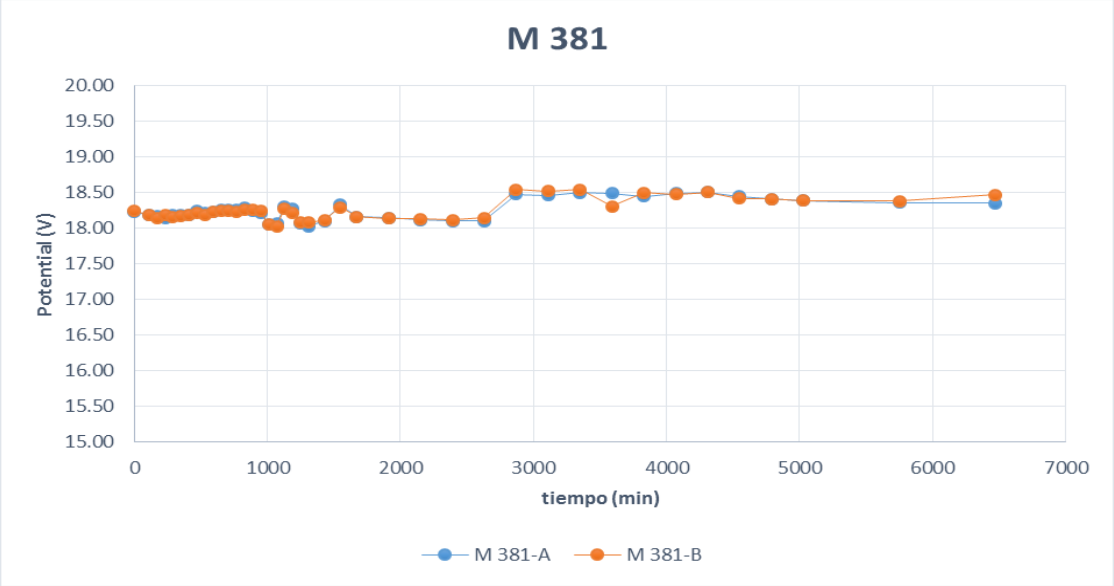

Fig. 2.9 Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min) en los especímenes M 381-A y M 381-B

La Fig. 2.10 representa el comportamiento de la intensidad de la corriente en función del tiempo en los especímenes M 381-A y M 381-B alcanza un mínimo de 23.7 mA y 24.9 mA respectivamente a los 1910 minutos de iniciado el ensayo.

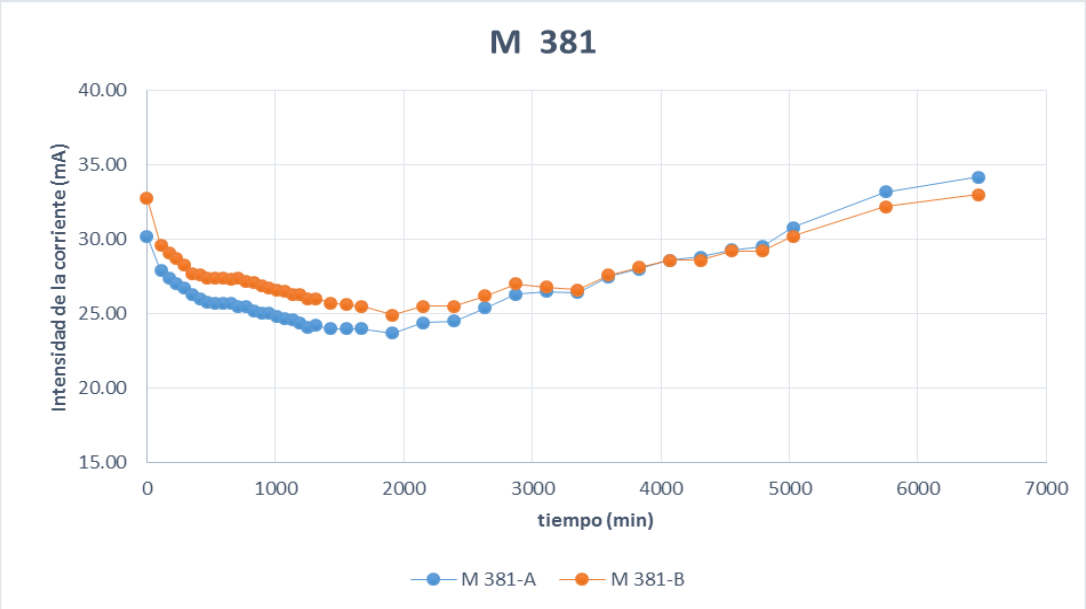

Fig. 2.10 Intensidad de la corriente (mA) vs tiempo (min) en los especímenes M 381-A y M 381-B

Tabla 2.11 Medición de los especímenes M 32-A y M 32-B

Tiempo (min)	M 32			
	M 32-A		M 32-B	
	Vc(V)	I(mA)	Vc(V)	I(mA)
0	17.38	106	17.15	118.7
110	17.3	97.5	17.37	110
170	17.24	96.4	17.44	109.3
230	17.18	94.8	17.28	105
290	17.1	93.7	17.32	104.4
350	17.14	93.5	17.37	103.5
410	17.17	92.9	17.38	102.4
470	17.25	93.9	17.44	102.6
530	17.25	94.8	17.49	102.8
590	17.19	95.3	17.48	103.5
650	17.04	96.3	17.48	104.1
710	17.23	96.7	17.45	105.4
770	16.73	96	17.43	105.3
830	17.62	101.9	17.74	107.9
890	17.59	102.7	17.71	108.5
950	17.5	103.3	17.65	109
1010	17.51	105.1	17.68	109.7
1070	17.15	105.3	17.43	109.6
1130	17.39	106	17.62	110.8
1190	17.4	107	17.66	111.1
1250	17.35	108	17.6	111.8
1310	17.34	109.1	17.63	112.6
1430	17.61	112.4	17.7	114.8
1550	17.88	114.8	18.02	117
1670	17.44	114.8	17.95	118.8
1910	17.71	119.4	17.85	120.1
2150	17.58	124.5	17.83	126.5
2390	17.55	127.7	17.67	128.4
2630	17.53	132.4	17.78	134.6
2870	17.64	134.2	17.78	136.1
3110	17.4	137.2	17.49	139.1
3350	17.58	139.2	17.74	142.8
3590	17.47	145.1	17.72	148.9
3830	17.39	148.1	17.52	151.5
4070	16.99	147.7	17.48	153.4
4310	16.08	144.6	17.5	154.8
4550	15.85	142.4	17.28	158.2
4790	16.69	146.8	17.25	157.4
5030	15.83	150.5	17.28	163
5750	16.96	160.6	17.25	172.5
6470	16.01	161.3	17.08	173.2

Se observa en la Fig. 2.11 la trayectoria de la diferencia de potencial en función del tiempo, resulta no significativa la diferencia de potencial en los especímenes M 32-A y M 32-B oscila entre 17.88-15.83 V, y 18.02-17.08 V respectivamente en un tiempo de 6470 minutos.

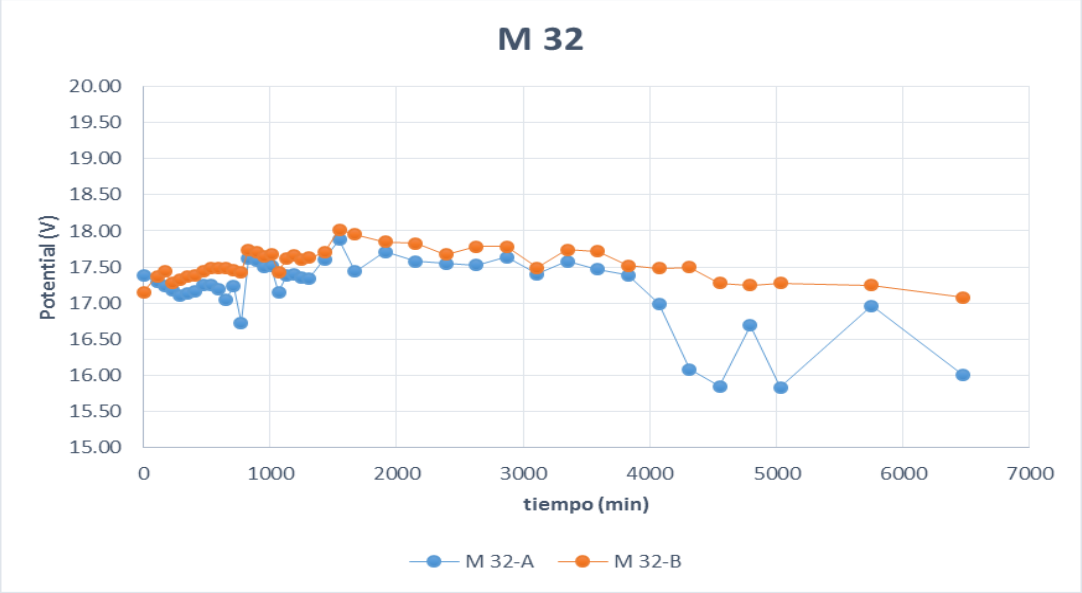

Fig. 2.11 Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min) en los especímenes M 32-A y M 32-B

La Fig. 2.12 muestra la conducta la intensidad de la corriente en función del tiempo en los especímenes M 32-A y M 32-B, donde alcanza un mínimo de 92.9 mA y 102.4 mA respectivamente a los 410 minutos de comenzado el ensayo.

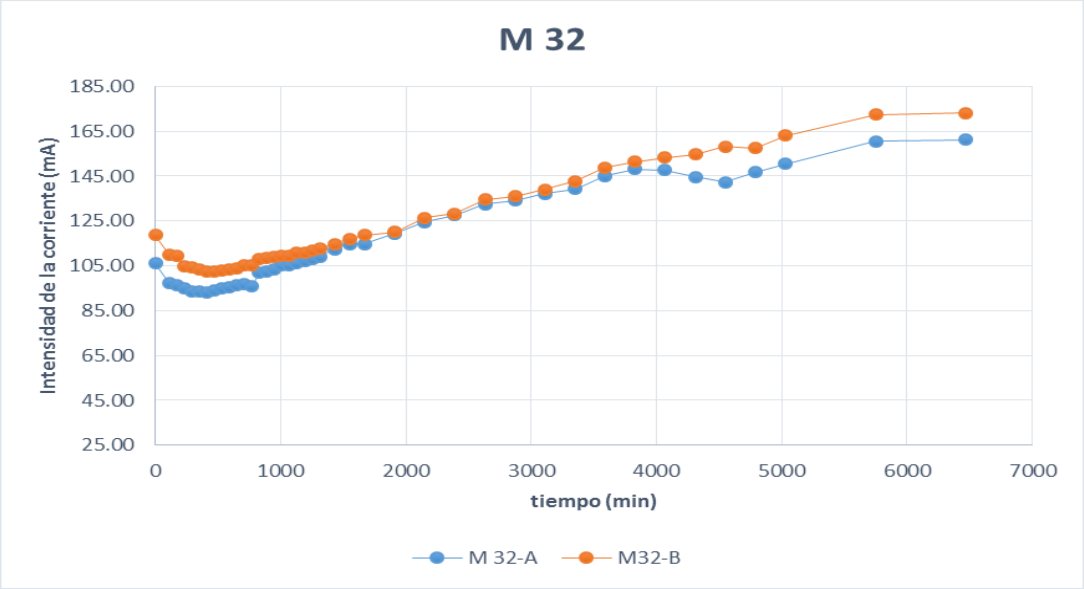

Fig. 2.12 Intensidad de la corriente (mA) vs tiempo (min) en los especímenes M 32-A y M 32-B

Tabla 2.12 Medición de los especímenes M 25-A y M 25-B

Tiempo (min)	M 25			
	M 25-A		M 25-B	
	Vc(V)	I(mA)	Vc(V)	I(mA)
0	17.44	36.7	17.77	32.5
60	17.63	35.8	17.77	30.8
120	17.9	34.8	17.97	30.4
180	17.83	34.4	17.85	30.2
240	17.83	33.3	17.89	29.7
330	17.76	32.4	17.73	29.1
360	17.69	32.3	17.73	28.8
420	17.77	32.1	17.81	28.7
480	17.77	32.5	17.85	29
540	17.75	32.2	17.71	28.5
660	17.71	31.3	17.69	27.8
780	17.73	31.6	17.71	27.9
900	17.65	32	17.81	28.3
1020	17.4	32.3	17.88	28.4
1140	17.18	32.2	17.93	28.5
1260	17.44	32.4	17.88	28.5
1380	17.35	32.8	17.89	28.5
1500	17.42	33.5	17.87	29
1620	17.44	33.5	17.89	29.3
1740	17.47	33.5	17.85	29.1
1860	17.5	34.1	18.03	29.5
1980	17.68	34.2	18.05	29.7
2100	17.66	34.5	18.04	29.7
2280	17.35	33.9	18.06	29.5
2340	17.2	33.4	18.03	29.3
2460	17.23	33.8	18.03	29.7
2580	17.47	34.8	17.95	30
2700	17.59	35.8	17.99	30.4
2940	17.55	36.6	17.93	30.7
3180	17.44	36.4	17.99	30.8
3420	17.22	35.6	17.98	30.8
3660	17.29	37.9	18	32.2
3900	17.36	38.2	17.99	32.5
4140	17.48	42.6	17.99	35.8
4380	17.1	40.5	17.91	34.3
4620	17.39	38.8	17.93	33.7
4860	17.4	38.9	17.93	34.2
5100	17.05	40.3	17.88	35.8

La Fig. 2.13 representa la gráfica del comportamiento de la diferencia de potencial en función del tiempo, demostrando la diferencia de potencial en los especímenes M 25-A y M 25-B, donde oscila entre 17.83-17.05 V, y 18.06-17.69 V respectivamente en un tiempo de 5100 minutos.

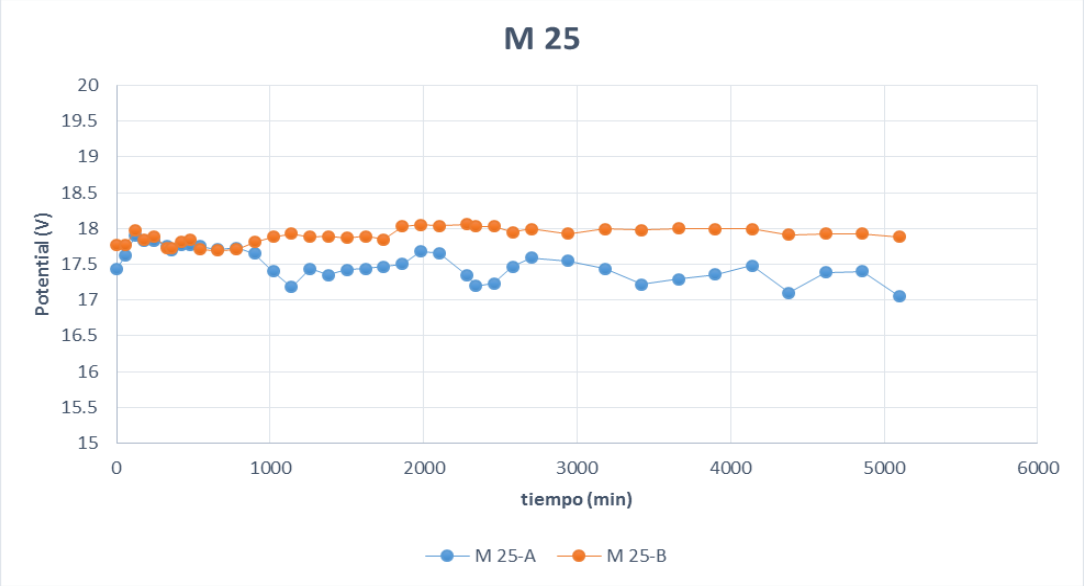

Fig. 2.13 Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min) en los especímenes M 25-A y M 25-B

Se observa en la Fig. 2.14 la trayectoria de la intensidad de la corriente en función del tiempo. La intensidad de la corriente en los especímenes M 25-A y M 25-B alcanza un mínimo de 31.3 mA y 27.8 mA respectivamente a los 660 minutos de comenzado el ensayo.

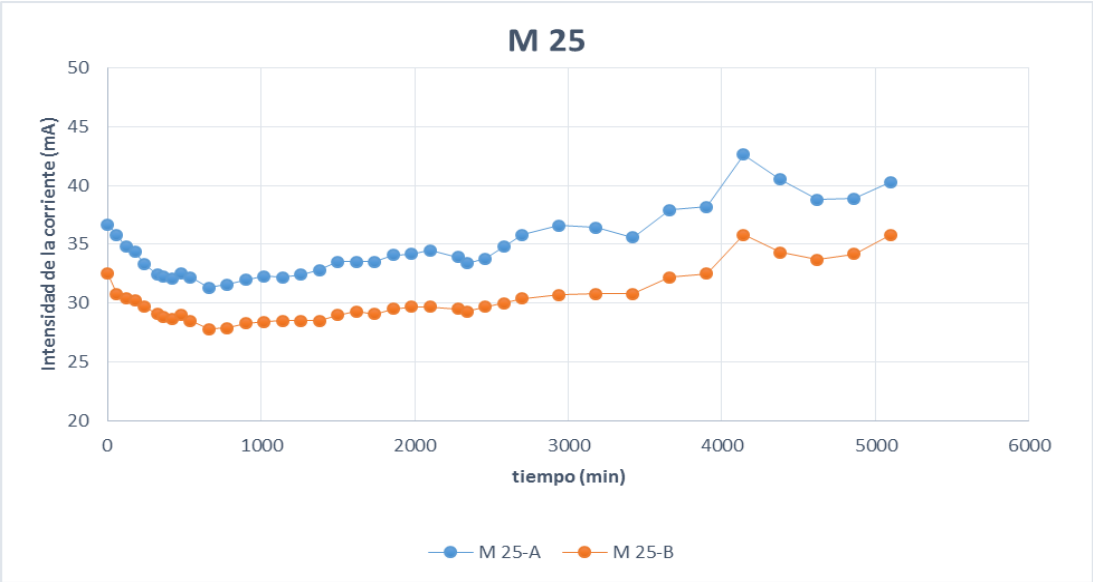

Fig. 2.14 Intensidad de la corriente (mA) vs tiempo (min) en los especímenes M 25-A y M 25-B

Tabla 2.13 Medición de los especímenes M 35-A y M 35-B

Tiempo (min)	M 35			
	M 35-A		M 35-B	
	Vc(V)	I(mA)	Vc(V)	I(mA)
0	17.57	76.6	16.58	68.9
60	17.92	75.3	17.44	69.5
120	17.81	70.4	17.7	67.3
180	17.65	73.7	17.61	70.3
240	17.56	67.6	17.63	65.2
330	17.93	66.7	18	64.3
360	17.93	66.1	18.03	63.8
420	17.99	65.1	18.08	63.2
480	17.95	65.5	17.95	62.6
540	17.43	63.4	17.49	60.5
660	17.75	63.4	17.84	59.9
780	17.91	64.7	18.04	60.5
900	17.93	65.9	18.07	61.2
1020	17.77	67.4	17.88	62
1140	17.54	67.4	17.67	61.7
1260	17.6	69.2	17.72	63.2
1380	17.67	70.1	17.61	60.1
1500	17.83	72.7	17.93	66.1
1620	17.67	73.4	17.74	66.1
1740	17.4	73.1	17.53	73.3
1860	17.6	75.4	17.75	67.7
1980	17.61	77.1	17.71	68.7
2100	17.56	78	17.59	70
2280	17.56	79.1	17.63	70.3
2340	17.55	79.2	17.63	71.2
2460	17.5	81.1	17.52	72.4
2580	17.14	81.5	17.16	72.7
2700	17.16	83.6	17.29	74.6
2940	17.32	87	17.34	77.5
3180	17.41	90.6	17.52	82.3
3420	17.57	76.6	16.58	68.9
3660	17.92	75.3	17.44	69.5
3900	17.81	70.4	17.7	67.3
4140	17.65	73.7	17.61	70.3
4380	17.56	67.6	17.63	65.2
4620	17.93	66.7	18	64.3
4860	17.93	66.1	18.03	63.8
5100	17.99	65.1	18.08	63.2

La Fig. 2.15 representa la conducta de la diferencia de potencial en función del tiempo, donde la diferencia de potencial en los especímenes M 35-A y M 35-B fluctúa entre 17.99-17.14 V, y 18.08-16.58 V respectivamente en un tiempo de 5100 minutos.

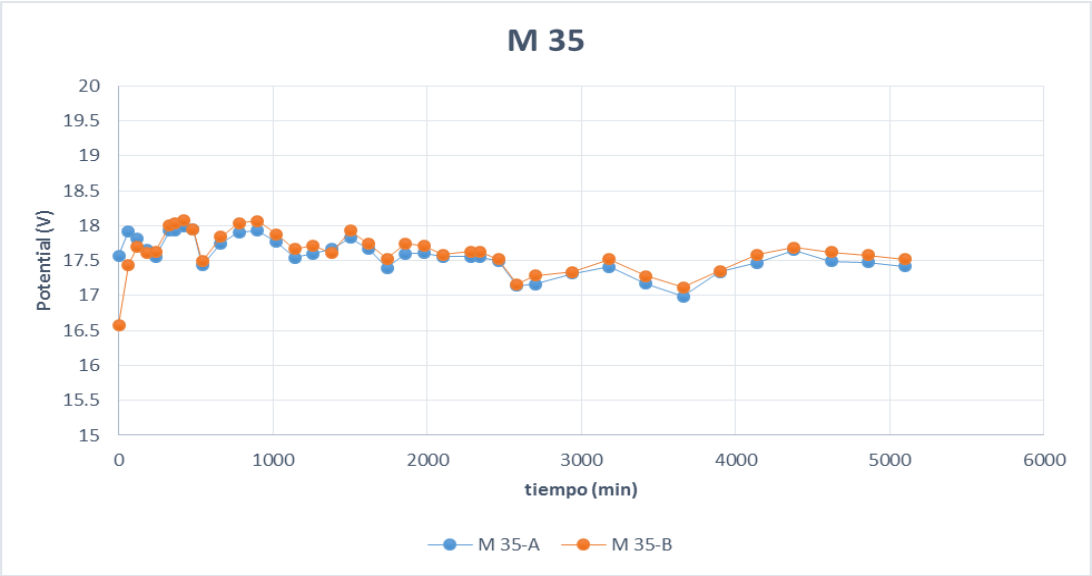

Fig. 2.15 Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min) en los especímenes M 35-A y M 35-B

La Fig. 2.16 simboliza en la gráfica el comportamiento de la intensidad de la corriente en función del tiempo en los especímenes M 35-A y M 35-B, donde se alcanza un mínimo de 63.4 mA y 59.9 mA respectivamente a los 660 minutos de iniciado el ensayo.

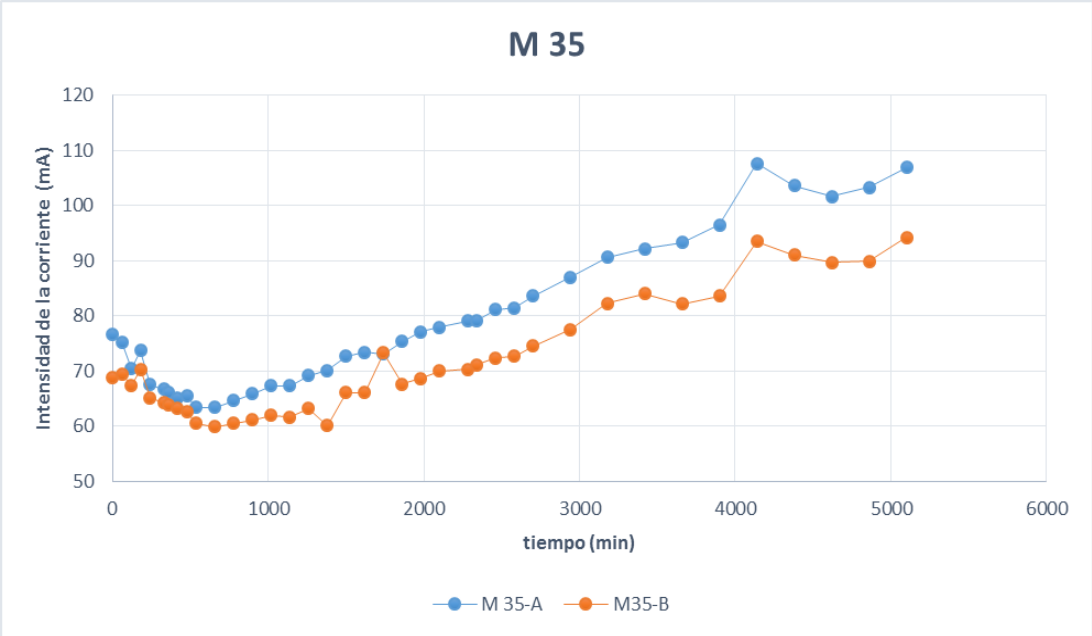

Fig. 2.16 Intensidad de la corriente (mA) vs tiempo (min) en los especímenes M 35-A y M 35-B

Tabla 2.13 Medición de los especímenes M 30-A y M 30-B

Tiempo (min)	M 30			
	M 30-A		M 30-B	
	Vc(V)	I(mA)	Vc(V)	I(mA)
0	18.2	55.5	18.03	49
60	18.07	50.90	17.93	46.40
120	18.20	48.40	18.12	44.00
180	18.24	46.80	18.12	43.40
240	18.14	45.50	18.03	42.20
300	18.28	44.10	18.05	41.40
360	18.21	43.30	17.95	40.60
420	18.22	42.20	17.97	40.10
480	18.23	41.30	17.98	39.60
540	18.21	40.70	17.97	38.80
600	18.16	40.10	17.81	37.90
660	18.16	39.70	18.01	38.00
720	18.23	39.30	17.84	37.40
780	18.30	39.00	17.93	36.90
840	18.18	38.60	17.82	36.50
900	18.21	38.80	17.61	36.90
960	18.02	38.80	17.77	37.00
1020	17.72	39.70	17.49	37.40
1080	18.13	39.20	17.44	37.50
1140	18.14	39.60	17.05	36.00
1200	18.02	39.00	16.96	36.70
1260	17.91	39.40	17.01	36.40
1320	18.12	39.60	17.30	36.40
1440	18.22	39.50	17.52	36.70
1560	18.18	39.40	17.77	37.70
1680	18.30	39.50	17.96	37.20
1800	17.95	39.30	17.58	37.70
1920	18.03	39.30	17.57	37.50
2040	18.15	39.6	18.03	38.4
2160	18.12	39.7	18	38.6
2280	18.54	40.8	18.38	39.7
2400	18.59	40.8	18.03	40.1
2520	18.5	42.1	18.4	40.9
2640	18.18	42.6	18.27	41.4
2880	18.4	43.1	18.28	41.8
3120	18.07	43.4	18.19	42.2
3360	18.14	44.1	18.03	42.4
3600	18.18	44.6	18.2	43
3840	18.23	46.7	18.18	45

La Fig. 2.17 muestra el recorrido de la diferencia de potencial en función del tiempo, donde la diferencia de potencial en los especímenes M 30-A y M 30-B oscila entre 18.59-17.72 V, y 18.38-16.96 V respectivamente en un tiempo de 3840 minutos.

Fig. 2.17 Diferencia de potencial (V) vs tiempo (min) en los especímenes M 30-A y M 30-B

La Fig. 2.18 presenta la trayectoria de la intensidad de la corriente en función del tiempo. La intensidad de la corriente en el espécimen M 30-A alcanza un mínimo de 38.60 mA a los 840 minutos y el M 30-B alcanza un mínimo de 36.00 mA a los 1140 minutos de comenzado el ensayo. Se alcanza por un ajuste entre las dos curvas un mínimo de 37.55 mA a los 840 minutos de iniciado el ensayo.

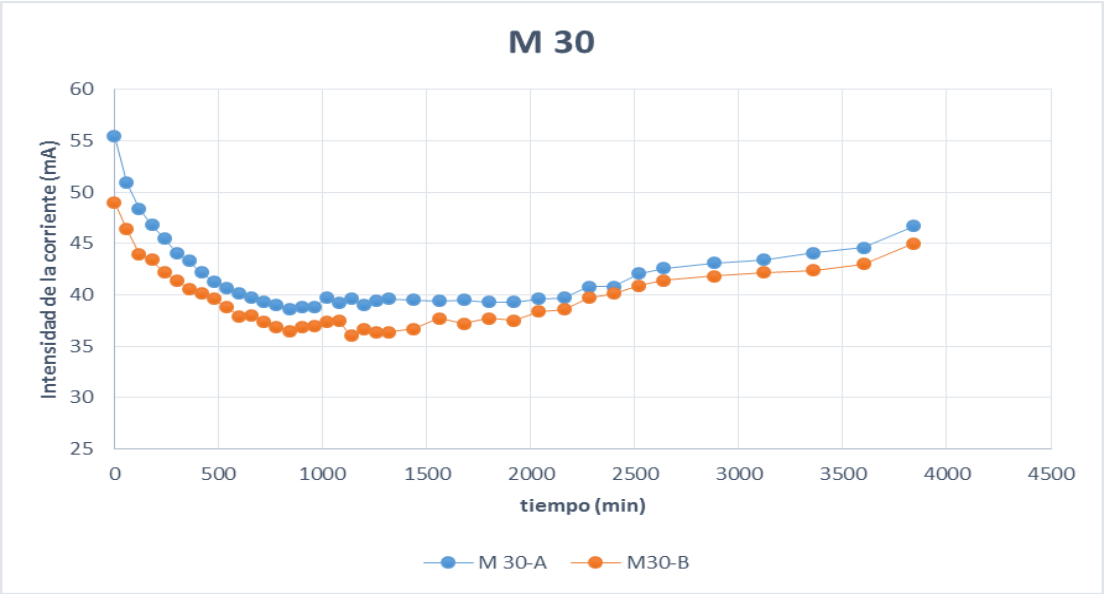

Fig. 2.18 Intensidad de la corriente (mA) vs tiempo (min) en los especímenes M 30-A y M 30-B

Conclusiones parciales del Capítulo II

- La diferencia de potencial e intensidad de la corriente se corresponden con los resultados esperados en el ensayo de migración de iones cloruros teniendo en cuenta la trayectoria mostrada en las curvas para los diferentes tipos de hormigón.
- Las mediciones del potencial e intensidad de la corriente muestran una adecuada constancia, apreciándose en las mediciones obtenidas para la evaluación de la migración de iones cloruros, teniendo en cuenta la limitada dispersión de los valores obtenidos para los diferentes tipos de hormigón lo cual da fe de la precisión de los ensayos.
- El empleo del equipamiento exigido, soluciones químicas, condiciones de humedad relativa y temperatura junto al procedimiento acertado contribuyo a la exactitud de los resultados.

Capítulo III: Análisis de los resultados del transporte de iones cloruros en hormigones hidráulicos producidos con cemento de bajo carbono LC^3

El capítulo presenta a continuación el análisis de los resultados de los ensayos realizados en el hormigón, los cuales se muestran en el capítulo anterior. Se realiza la comparación de los resultados obtenidos y con respecto a los del año 2015.

Se presentan además los gráficos de intensidad de la corriente, factor formación y coeficiente de difusión del ion cloruro en las diferentes muestras de hormigón producidas con cementos de bajo carbono LC^3 y cemento Pórtland P 35.

3.1 Análisis de los resultados del ensayo de migración de iones cloruros

A continuación se insertan los gráficos que muestran el comportamiento en el tiempo de la intensidad de la corriente, el factor de formación y el coeficiente de difusion en el hormigón hidráulico, a partir de muestras de especímenes de hormigón M 381 y M 25 con respecto al M 32, y finalmente el M 30 con respecto al M 35. La comparación se realiza en testigos al tener en cuenta el diseño de las mezclas, en especial la evaluación de la resistencia a compresión, 25,0 MPa para los tres primeros y 20,0 MPa para el M 30 y el M 35, se considera la resistencia mecánica a compresión por ser la principal característica que lo distingue. En ocasiones varía en las muestras de hormigón el contenido de cemento, la relación agua/cemento, cantidad de aditivo, asentamiento y la edad de fabricación del hormigón. La Tabla 2.8 muestra las dosificaciones empleadas en los elementos producidos en la EPI Villa Clara".

3.1.1 Análisis de la intensidad de la corriente en función del tiempo en especímenes de hormigón

En la Fig. 3.1 se observa la variación de la intensidad de la corriente en función del tiempo en los especímenes de testigos M 381, M 32 y M 25, apreciándose la existencia de una mayor intensidad de la corriente pasada en el hormigón M 32 con un mínimo en la curva de 97.65 mA en un tiempo de 410 minutos de iniciado el ensayo, el cual figura la rapidez en que demoran los cloruros en atravesar completamente el espécimen, mientras que el testigo M 381 y M 25 presentan mínimos de 24.3 mA y 29.55 mA, a los 1910 minutos y 660 minutos respectivamente cada uno. Todo lo anterior denota la existencia de un mayor flujo iónico a través de la matriz porosa del espécimen M 32. Esta diferencia

experimentada del transporte pudo deberse según criterios del autor a la variación del tipo de cemento, contenido de cemento y relación a/c, teniendo en cuenta que el hormigón del testigo M 32 se fabricó con un cemento Pórtland P-35, 300 kg del mismo y una relación a/c de 0.40, mientras los hormigones de la muestras M 381 y M 25 se obtuvieron con los mismos tipo de cemento de bajo carbono LC^3, contenido (300 kg) y relación a/c de 0.47. Este cemento de bajo carbono LC^3 está compuesto por alrededor de 30 % de arcilla calcinada.

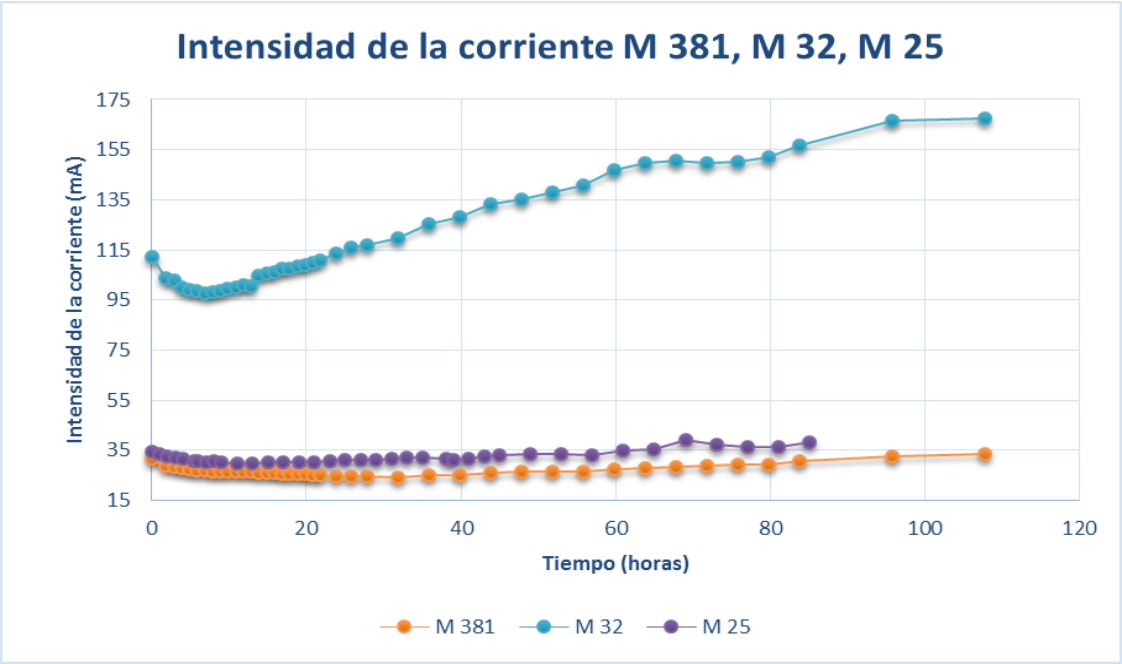

Fig. 3.1 Intensidad de la corriente M 381 vs M 32 vs M 25

La presencia de la arcilla calcinada en el cemento de bajo carbono LC^3, confiere nuevas propiedades al hormigón dado por el incremento del volumen de sólidos en la matriz cementicia a través de la formación adicional de compuestos del tipo silicato de calcio hidratado (Vizcaíno, 2014), dada la reacción del hidróxido de calcio con la alúmina y la sílice proveída por la arcilla calcinada, además de la formación de otras fases estables como la strätlingita, que provoca la densificación de la matriz cementicia, el refinamiento de la porosidad capilar y un incremento de la resistencia mecánica.

La Fig. 3.2 evidencia el comportamiento de la intensidad de la corriente en el tiempo de ensayo para los especímenes de los testigos M 30 y M 35. El valor mínimo de intensidad de la corriente que alcanza el testigo M 30 es de 37.55 mA en un tiempo de 840 minutos, mientras que el testigo M 35 alcanza su valor mínimo de 61.65 mA a los 660 minutos de comenzado el ensayo, lo que significa

el tiempo en que los cloruros han atravesado completamente los especímenes de cada testigo como se abordó anteriormente.

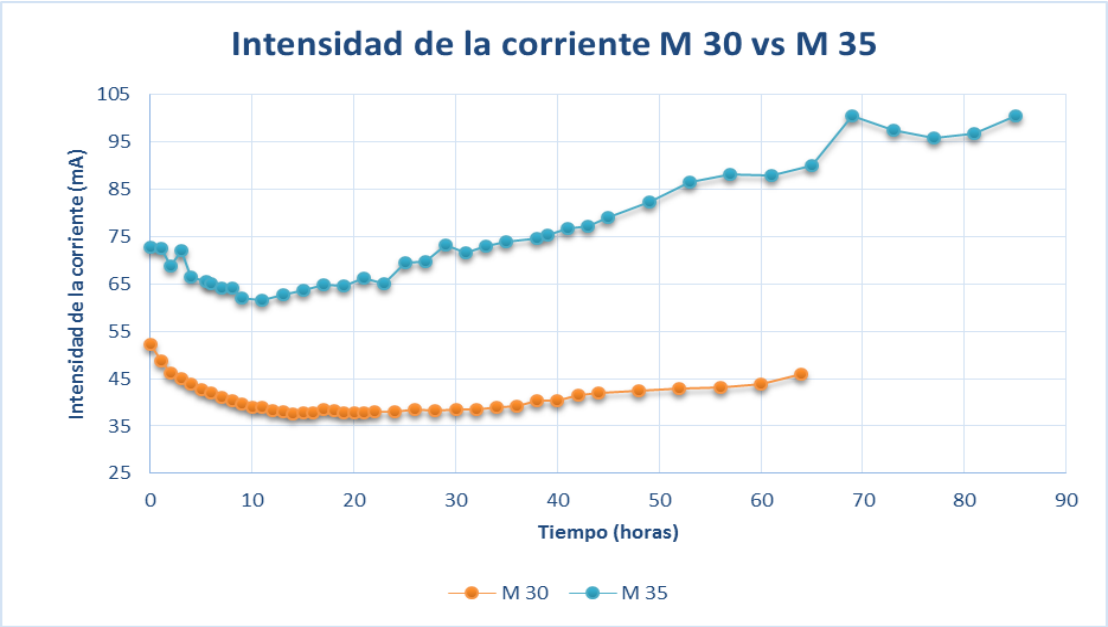

Fig. 3.2 Intensidad de la corriente M 30 vs M 35

Con este resultado se pude afirmar que los hormigones de los testigos M 381, M 25 y M 30 con respecto al hormigón de los testigo M 32 y M 35 son más resistentes en cuanto al transporte o penetración de iones cloruros, ya que el ion cloruro es el que predomina y se obliga a transportar en el ensayo de migración del protocolo STADIUM.

A tono con lo planteado por Vizcaíno, 2014, esta resistencia al transporte por penetración de iones cloruro se debe en primer lugar a la contribución del cemento de bajo carbono LC^3 y su contenido en la mezcla.

3.1.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de difusión en especímenes de hormigón

La Fig. 3.3 muestra la variación del coeficiente de difusión en el tiempo para los especímenes de los testigos M 381, M 32 y M 25, donde se aprecia una notable diferencia entre los mínimos de las curvas del M 381 y M 32 de 1.10252×10^{-10} m^2/s, donde el coeficiente de difusión del testigo M 381 logra ser 5.5 veces menor que el del M 32. Como también existe diferencia entre los valores mínimos de los testigos M 32 y M 25 de 1.07779×10^{-10} m^2/s, llegando a ser el coeficiente de difusión del testigo M 32 5 veces mayor.

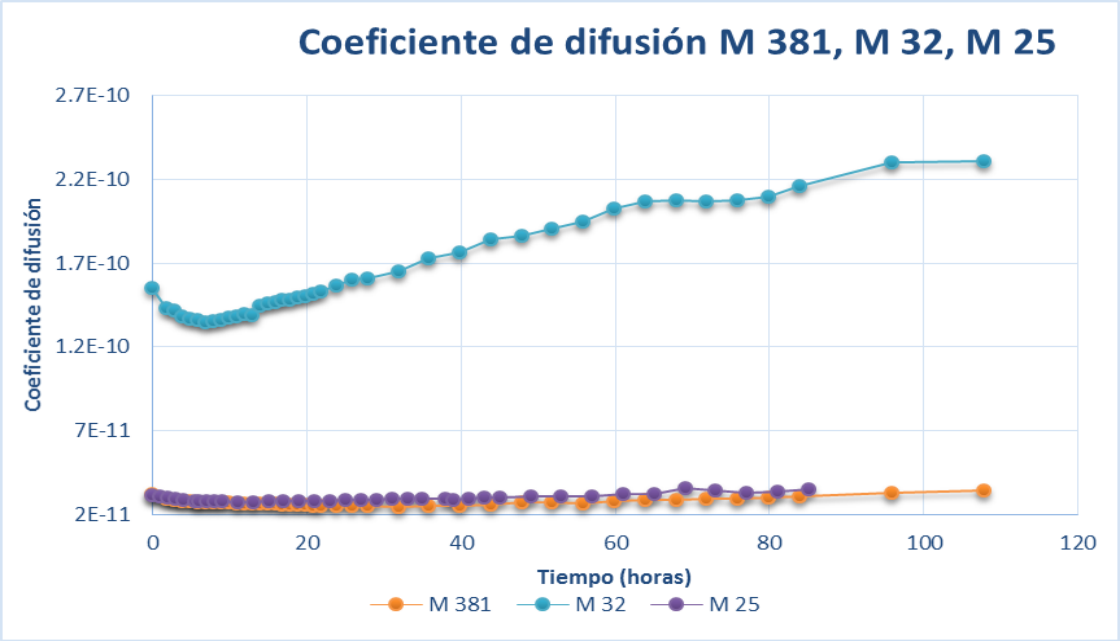

Fig. 3.3 Coeficiente de difusión M 381 vs M 32 vs M 25

Este resultado se justifica a criterios del autor, producto del empleo del tipo de cemento, contenido y relación a/c, como ya se mencionó.

Por todo lo anterior los resultados obtenidos a la edad de 2 años de producido el hormigón, concuerda con los estudios realizados de caracterización de la estructura de poros a mezclas binarias de cemento Pórtland y adiciones de metacaolín, microsílice y escorias al 10 % donde se muestra que ciertas adiciones minerales manifiestan un impacto positivo en el refinamiento de la estructura de poros y el reforzamiento de la zona de transición interfacial. (Duan et al 2013 citado en Vizcaíno, 2014)

También Vizcaíno (2014) refiere que “el desarrollo de la resistencia a la compresión y de la zona de transición interfacial es consistente con la evolución de la estructura de poros, esto juega un papel fundamental en la impermeabilidad de la matriz cementicia, y mejor resistencia ante el transporte y difusión de iones dañinos como el cloruro, es lógico que la mayor impermeabilidad lograda a través del empleo de materiales cementicios suplementarios y en particular de metacaolín, contribuirá de manera efectiva a la durabilidad de la estructuras ante el ataque de cloruros”.

La Fig. 3.4 muestra el comportamiento del coeficiente de difusión de los especímenes del testigo M 30 con los del M 35. Se observa que existe una diferencia entre los valores mínimos de cada testigo de 1.4739×10^{-11} m^2/s, resultando el coeficiente de difusión del testigo M 35 1.5 veces mayor.

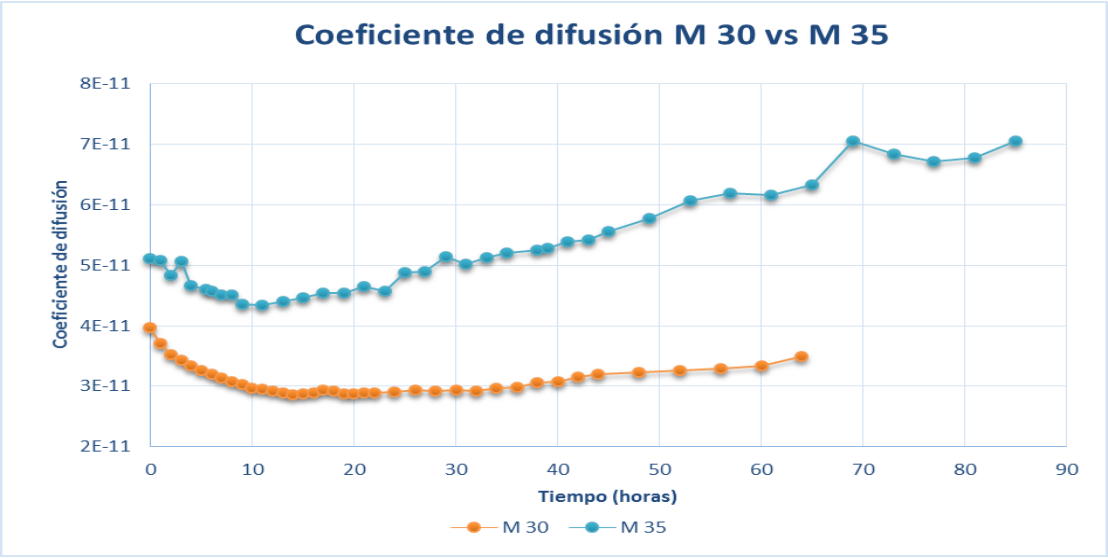

Fig. 3.4 Coeficiente de difusión M 30 vs M 35

Por los resultados de las dos comparaciones anteriores se afirma que el hormigón producido con cemento de bajo carbono LC^3 es más resistente el transporte de cloruros que el producido con cemento Pórtland P-35. Este resultado permite tener una evaluación o medida de cuan durable puede ser las estructuras sometidas a un ambiente marino, donde se emplee un cemento de bajo carbono LC^3. El uso de arcilla empleado en sustitución de un parte del clínquer provee al cemento y al hormigón mayor estabilidad química y menor permeabilidad por la disminución de la liberación del calor de hidratación.

3.1.3 Análisis del factor formación en función del tiempo para especímenes de hormigón ensayados

La Fig. 3.5 evidencia la trayectoria del factor formación para los especímenes del testigo M 381, M 32 y M 25. El gráfico afirma y concuerda con los resultados mostrados en los epígrafes 3.1.1 de intensidad de la corriente y 3.1.3 del coeficiente de difusión, ya que el factor formación depende del inverso del producto de la porosidad del material y la continuidad de los poros, es decir, al tener el hormigón mayor porosidad y continuidad entre sus poros será menor el factor formación.

La diferencia que presenta el factor formación entre los máximos de los testigos M 381 y M 32 es de 845.2215. El valor del producto de la porosidad y la continuidad de poros del testigo M 381 en su factor formación máximo es de

$103.3586x10^{-5}$, del M 25 es de $123.5703x10^{-5}$ y del M 32 es de $817.7716x10^{-5}$, siendo el valor del M 32 mayor en 7.9 y 6.6 veces respectivamente.

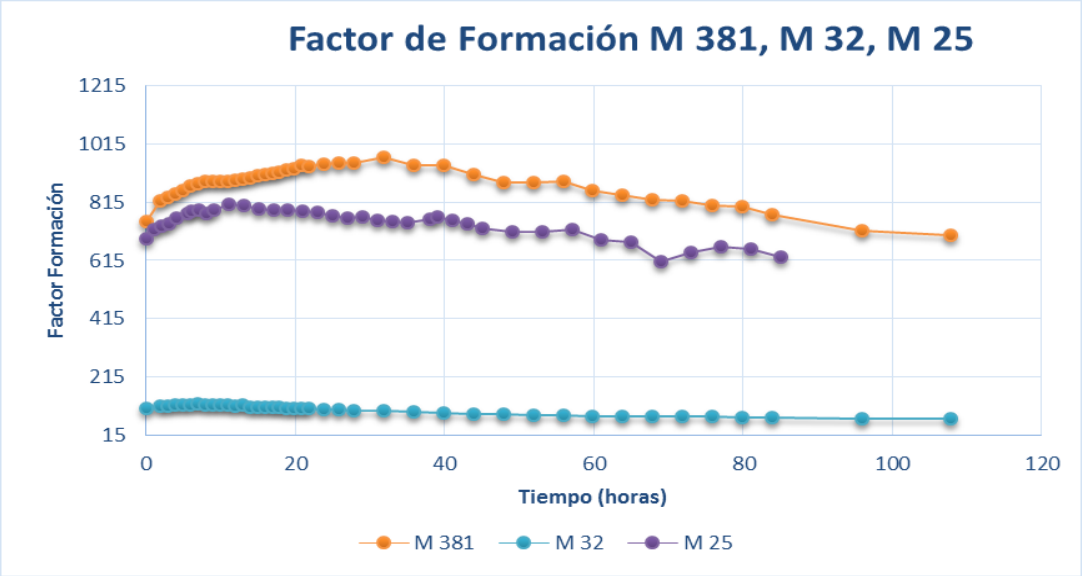

Fig. 3.5 Factor formación M 381 vs M 32 vs M 25

La Fig. 3.6 muestra la trayectoria alcanzada por el factor formación en los especímenes de los testigos M 30 y M 35 durante el tiempo de ensayo, donde se observa que el testigo M 30 obtiene un mayor factor formación, lo que significa que presenta una menor porosidad y continuidad entre sus poros. El valor del producto de estos parámetros microestructurales cuando es máximo el factor formación es $161.6262x10^{-5}$ para el M 30 y $255.6058x10^{-5}$ para el M 35.

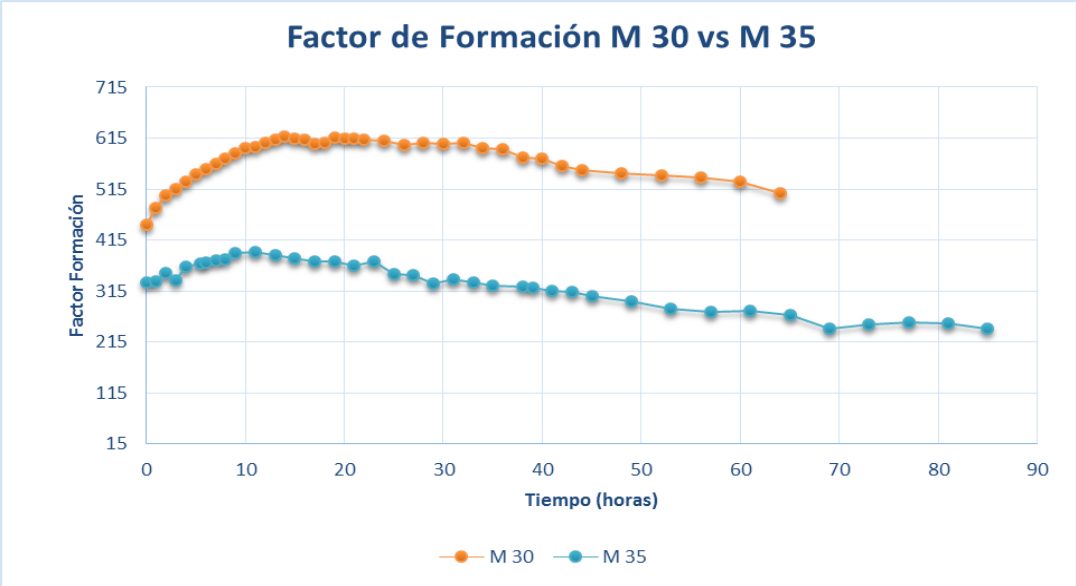

Fig. 3.6 Factor formación M 30 vs M 35

Por los resultados mostrados anteriormente se puede afirmar que los hormigones de los testigos M 381, M 25 y M 30 producidos con cemento de bajo

carbono LC^3 son más resistentes al transporte y difusión de iones cloruros, al presentar menor porosidad y continuidad entre sus poros.

Por lo que se concluye que el hormigón fabricado con un aglomerante de cemento de bajo carbono LC^3 alcanzará mayor vida útil de servicio que un hormigón producido con cemento Pórtland P-35.

3.2 Análisis del comportamiento del coeficiente de difusión en especímenes de los testigos M 381, M 25, M 32, M 35 y M 30 entre los años 2015 y 2016

La Fig. 3.7 representa mediante un gráfico de barras el comportamiento del coeficiente de difusión en los testigos M 381, M 32, M 25, M 30 y M 35. Se observa en los resultados de los valores mínimos del coeficiente de difusión obtenido por la formulación de las mediciones del ensayo de migración de cloruros, que después de un año de realizados los primeros ensayos, ha decrecido el coeficiente de difusión de los testigos M 381, M 25, M 30 y M 35, pero ha aumentado en el testigo M 32. Esta pequeña disminución que presentan los testigos M 381, M 25 y M 30 se debe principalmente al uso de un cemento de bajo carbono LC^3, ya que este cemento compuesto por aproximadamente 30 % de arcilla calcinada, le confiere propiedades puzolánicas, estas a su vez le proporcionan al hormigón un fraguado y endurecimiento a edades mayores.

Por tanto el autor concuerda con lo expresado por León y Oróstegui (2009) y Tang & Nilsson (1992) que el coeficiente de difusión en las primeras edades del hormigón reduce con el tiempo producto a la hidratación del cemento.

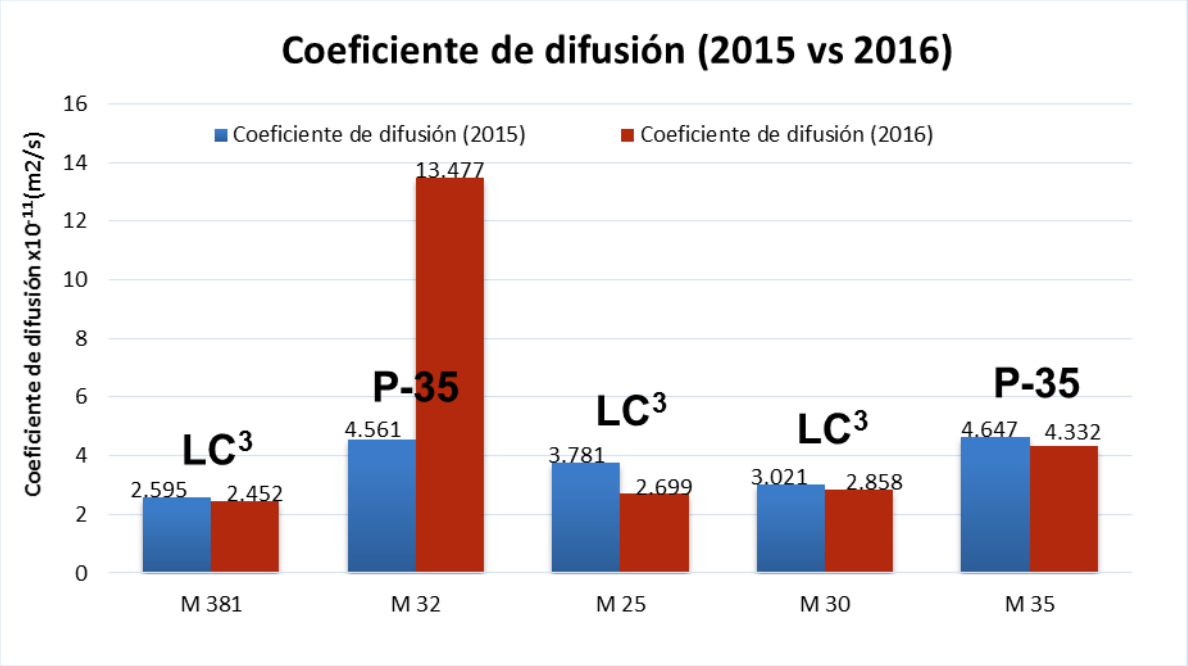

Fig. 3.7 Coeficiente de difusión (2015 vs 2016)

Conclusiones parciales de Capítulo III

- Los resultados de intensidad de la corriente demuestran la capacidad que presenta el hormigón de los especímenes M 381, M 25 y M 30 de disminuir la transportación o penetración de iones cloruros.
- El valor mínimo del coeficiente de difusión alcanzado en el ensayo para los testigos M 381, M 25 y M 30 evidencia la propiedad que presenta este material de atenuar la difusión del ion cloruro.
- Los valores de factor formación demuestran que los testigos M 381, M 25 y M 30 presentan menor porosidad y mejor refinamiento en la estructura porosa que los testigos M 32 y M 35.
- Los valores de los resultados del coeficiente de difusión en los testigos M 381, M 25, M 30 y M 35, del año 2015 al año 2016 disminuyen levemente, lo que representa un comportamiento favorable en la durabilidad del material, a lo contrario del M 32 que aumenta significativamente.

Conclusiones generales

- Los resultados obtenidos en la intensidad de la corriente demuestran la capacidad que presenta el hormigón de especímenes M 381, M 25 y M 30 fabricados con un cemento de bajo carbono LC^3 para disminuir el transporte o penetración de iones cloruros.
- Los componentes del cemento de bajo carbono LC^3 contribuyen a densificar la matriz y la nucleación heterogénea de silicatos y aluminatos de calcio hidratados, lo que muestra el valor del coeficiente de difusión en los testigos M 381, M 25 y M 30, y por tanto la concentración de cloruros en estos elementos resulta menor al estar expuestos en ambientes marinos tropicales.
- El transporte de cloruros en hormigones de cemento de bajo carbono LC^3 resulta inferior que en hormigones de cemento Pórtland, atribuido al refinamiento de la estructura de poros y mayor tortuosidad producto de la reacción puzolánica, lo que avala el valor del factor de formación en testigos M 381, M 25 y M 30 en comparación con los testigos M 32 y M 35.

Recomendaciones

- Se recomienda realizar un diseño de experimento robusto en futuros trabajos de investigación que permita mediante el análisis estadístico, evaluar el efecto de la influencia de las variables: relación a/c, contenido de cemento, condiciones del entorno construido en la resistencia a la compresión, transporte de iones cloruros y demás ensayos que avalen la durabilidad de los hormigones sometidos a ambientes agresivos marinos.
- Se recomienda comparar los resultados obtenidos con otros métodos que evalúan el transporte y concentración de iones cloruros, para así establecer comparaciones entre los valores obtenidos y llegar a un resultado de mayor precisión.
- Se recomienda iniciar los ensayos en estudiantes preseleccionados de los grupos de trabajos científicos de la línea de investigación desde 4to año, para así evitar limitaciones en el tiempo y demás contratiempos propios de la investigación.

Referencias bibliográficas

ABBAS, Y. 2015, *In-situ measurement of chloride ion concentration in concrete*, Doctoral Tesis, The Netherlands.

ACI 201-2R.01, 2001 Guía para la durabilidad del hormigón.

AHLSTRÖM, J. LUND UNIVERSITY and SWEREA/KIMAB. 2015*, Corrosion of steel in concrete at various moisture and chloride levels*. The Division of Building Materials, Lund University, and partly at Swerea Kimab, Stockholm

ASTM-C-1202 2010. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. Estados Unidos.

BERTOLINI, L. ELSENER, B. PEDEFERRI, P. and POLDER, R. 2004, *Corrosion of steel in concrete - prevention, diagnosis and repair*, 1st edition, Wiley-VCH, Weinheim, Germany.

BETANCOURT, S. 2013, *Otras propiedades del hormigón endurecido,* Conferencia 6, Asignatura Tecnología del hormigón, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

BETANCOURT, S. 2013, *La resistencia mecánica del hormigón*, Conferencia 5, Asignatura Tecnología del hormigón, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

BIOUBAKHSH, S. 2011, *The penetration of chloride in concrete subject to wetting and drying: measurement and modelling*. Doctoral thesis, UCL (University College London).

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA. 2009, *Chloride Resistance of Concrete*, Australia.

CÁMARA DE COMERCIO DE CUBA, 2016. https://es.wikipedia.org/wiki/**Geografía_de_Cuba**

DEL TORO, H. 2012, *Sitio experimental de pruebas y ensayos del hormigón hidráulico sometido a diferentes condiciones de agresividad marina,* Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

GONZÁLEZ, JE. 2014, *Modelos de penetración del ion cloruro orientados a la predicción de la vida útil de las estructuras de concreto*, Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá.

GONZÁLEZ, AM. 2011, *Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro.* Memoria para optar el título de ingeniero civil Universidad de Chile.

GERMANN INSTRUMENTS, Inc. 2015, *Chloride Penetration in Concrete, Short Overview and Available Instruments*, Alemania. http://www.germann.org/

LEÓN, C. y ORÓSTEGUI, SA. 2009, *Determinación del coeficiente de difusion aparente del ión cloruro en concreto expuesto a ambientes con cloruros*, Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Químico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.

LÓPEZ, T. P., & VARGAS, J. C. (2015). *Diagnóstico de estructuras de concreto armado. Uso de herramientas electroquímicas para el análisis de elementos metálicos en inmuebles.* Publicaciones Digitales ENCR y M.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 2006. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. Chapter 5. Durability.

MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 2006. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. Chapter 7. Aggregates.

MEDEIROS, M. H. F., REAL, L. V., QUARCIONI, V. A., & HELENE, P. (2015). *Concrete with treated surface and exposed to chlorides solution: thickness of equivalent coatings*. Revista ALCONPAT, 5(3), 209-223.

MEDEIROS, M. H. F., REAL, L. V., QUARCIONI, V. A., & HELENE, P. (2015). Revista ALCONPAT. Revista ALC NPAT, 5(3), 219-233.

MUÑOZ, E. P., AGUIRRE, A. M., & DE GUTIÉRREZ, R. M. (2015). *Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros.* Revista Informador Técnico, 79(2), 137-145.

MUÑOZ, D. R. 1988, *Permeabilidad del hormigón al aire. Efecto de la edad del hormigón en la permeabilidad.* Informes de la Construcción. Vol. 40, # 398.

MONTAÑA, C.C, CARMONA, R.A, 2015. *Impacto de las adiciones para concreto en la reducción de la permeabilidad al ion cloruro vs la relación agua cemento.* Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá.

NC 120: 2014. Hormigón Hidráulico. Especificaciones, Cuba.

NC 228-1: 2005 Aditivos para hormigones, morteros y pastas- Parte 1: Aditivos para hormigón-requisitos, Cuba.

NC 250: 2005 Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural, Cuba.

NC 344: 2005 Hormigón endurecido — Determinación del perfil de penetración de iones cloruros, Cuba.

NC 95: 2011 Cemento Pórtland. Especificaciones, Cuba.

NC 251: 2013 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos, Cuba.

NC 178: 2002 Áridos-Análisis granulométrico, Cuba.

NC 179: 2002 Áridos-Determinación del contenido de partículas de arcilla-Método de ensayo, Cuba.

NC 187: 2002 Árido grueso-Peso específico y absorción de agua-Método de ensayo, Cuba.

NC 182: 2002 Áridos-Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)-Método de ensayo, Cuba.

NC 353: 2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones, Cuba.

ORTIZ, A. V. (2016). *Método de perfiles de difusión de cloruros para la estimación de la corrosión en ambientes marinos*. Prospectiva, 14(1), 23-27.

PERAZA, L. 2014, *Aplicación del protocolo STADIUM® a hormigones producidos con cemento de bajo contenido de carbono (LCC)*, Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

PÉREZ, E. 2015, *Primera ronda de evaluación de durabilidad de los elementos colocados en el sitio de exposición de Cayo Santa María (cloruros y permeabilidad al aire)*, Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

SÁNCHEZ DE ROJAS, MJ. 2004, *Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Escuela Politécnica Superior de Alicante.

STANISH, K.D. HOOTON, R.D. and THOMAS M.D.A. 1997, *Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review.* Department of Civil Engineering University of Toronto, Toronto, Ontario, Canadá.

SIMCO Technologies Inc. 2011, STADIUM. UNIFIED FACILITIES GUIDE SPECIFICATIONS, Quebec, Canadá.

TAYLOR, PC. JOHANSEN, VC. y KLEMM, WA. 2002, *Porqué la química interesa en el hormigón*, ACI Concrete International, http://www.icpa.org.ar/files/aciquim.doc

VARSHNEY, A. SINGH, P. and PRAJAPATI, K. 2013, *Development of new age cost effective superplasticizer for ready mixed concrete: A study on physic-chemical and mechanical property*, Pelagia Research Library Department of Chemistry, D.G. (P.G.) College, Kanpur, India; Singhania University, Rajasthan, India; Department of Chemistry, G.G.I.C., Singhpur, Kanpur, India.

VEGA K., T. P. (2015). *Permeabilidad a cloruros en hormigones marítimos evaluación comparativa de métodos Nordtest NT BUILD 492 y ASTM C 1202*.

VIZCAÍNO, LM. 2014, *CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA – CALIZA*, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

ZYCH, T. 2014, *TEST METHODS OF CONCRETE RESISTANCE TO CHLORIDE INGRESS*, Institute of Building materials and structures, Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology.