

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de hormigones elaborados con cemento de bajo carbono en diferentes condiciones de agresividad de acuerdo a la Norma Cubana 120:2014.

Autora: Larianny Sánchez Medina

Tutores: Eylis Valdés Alemán

Yosvany Díaz Cárdenas

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Evaluation of concrete elaborated with low carbon cement on different conditions of aggressivity according to Cuba Standard 120:2014.

Author: Larianny Sánchez Medina

Thesis Director: Eylis Valdés Alemán

Yosvany Díaz Cárdenas

Santa Clara, June, 2019
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

PENSAMIENTO

Todos somos aficionados. La vida es tan corta que no da tiempo para más.

Charles Chaplin.

DEDICATORIA

A mi madre que es la razón de mis sacrificios, estuvo a mi lado en todos los malos y buenos momentos, me dio su confianza y siempre supo lo lograría.

AGRADECIMIENTOS

A lo largo de estos 5 años han existido personas que de una forma u otra han estado a mi lado, me han apoyado y han creído en mí, personas que han marcado mi vida y siempre llevare en mi corazón, a todos quiero agradecerles porque sin ellos no hubiera sido posible cumplir este sueño que en más de una ocasión creí imposible. Muchas gracias de todo corazón:

A mis padres Nancy y Juan por ser lo más importante en mi vida, por su cariño, por su comprensión, por apoyarme en cualquier circunstancia, y preocuparse por mí, sin ustedes hubiera sido muy difícil llegar hasta aquí. Les agradezco infinitamente su amor.

A mi hermana Arianny, por ser un gran ejemplo a seguir, por todo el apoyo que me brindo y consejos para poder superarme día a día.

A mi sobrina Alexa por darme fuerzas cuando creía que ya no podía más.

A mis abuelos Mace y Paprimo por su cariño y por estar siempre pendientes de mí.

A mi tutora por brindarme sus conocimientos, su tiempo, atención y apoyo en el logro de esta investigación.

A mi consultante Yosvany que me tuvo paciencia en la realización de los ensayos.

A Carlitos, Hansel, Lisbet, Ernesto y Adrian porque de una forma u otra me han ayudado a terminar a tiempo mi tesis.

A mis amigas Gennys, Liset y Ana Laura que han estado en las buenas y en las malas a mi lado y se han vuelto hermanas para mí.

A Arlet por estar siempre que la necesite, sin importar hora ella estaba para ser mi profesora particular.

A Robiel, Armando y Damian por convertirse en los hermanos varones que nunca tuve.

A todos los profesores que participaron y ayudaron en mi formación profesional, en especial a Luis Enrique.

A todos los que hace 5 años eran desconocidos y hoy tengo la dicha de llamar amigos.

A los técnicos de laboratorio por su paciencia y atención.

RESUMEN

En la presente investigación se efectúa un estudio de durabilidad en hormigones fabricados con cemento de bajo carbono (LC3), en diferentes condiciones de agresividad acorde a los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014 ‘‘Hormigón Hidráulico-Especificaciones’’, se realiza la toma de testigos de los hormigones H1, H2, y H4 elaborados en el año 2016. Se llevaron a cabo los ensayos de profundidad de carbonatación, permeabilidad al aire, migración de iones cloruro, resistividad eléctrica y absorción capilar para poder determinar los cambios que experimentó la serie 2 años frente a la serie 1.5 años y 6 meses y los hormigones elaborados con cemento bajo carbono (LC3) frente a los elaborados con Cemento Portland Ordinario (CPO).

Posteriormente al análisis de los resultados se puede constatar que los especímenes elaborados con LC3 presentan valores de carbonatación más altos que los de CPO y son más permeables que estos, a excepción de los expuestos a un ambiente de agresividad muy alta, los hormigones elaborados con cemento LC3 tienen mayor resistividad eléctrica y presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro con respecto a los elaborados con CPO. El paso del tiempo tiene una influencia favorable en los hormigones elaborados con LC3 en comparación con los elaborados con CPO, pues la serie 2 años muestra mejores resultados de permeabilidad al aire, resistividad eléctrica y penetración al ion cloruro, según la NC 120: 2014.

Palabras Clave: durabilidad, hormigón, cemento bajo carbono (LC3), norma cubana, sitios de exposición.

ABSTRACT

In the present investigation a durability study is carried out in concrete made with low carbon cement (LC3), in different conditions of aggressiveness according to the performance parameters established in the NC 120: 2014 "Hydraulic Hydraulic-Specifications". It makes the taking of witnesses of the H1, H2, and H4 concretes made in 2016. Carbonation depth tests, air permeability, migration of chloride ions, electrical resistivity and capillary absorption were carried out in order to determine the changes that experienced the series 2 years compared to the series 1.5 years and 6 months and the concretes made with cement under carbon LC3 compared to those made with Ordinary Portland Cement (CPO). After analyzing the results, it can be seen that the specimens made with LC3 have higher carbonation values than those of CPO and are more permeable than these, except for those exposed to an environment of very high aggressiveness, concretes made with cement LC3 have greater electrical resistivity and have greater resistance to penetration of the chloride ion with respect to those made with CPO. The passage of time has a more favorable influence on concretes made with LC3 than those made with CPO, since the 2-year series shows better results of air permeability, electrical resistivity and chloride ion penetration, according to NC 120: 2014.

Key words: durability, concrete, low carbon cement (LC3), Cuban norm, exhibition sites.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Estructura de la investigación	5
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE DURABILIDAD DE HORMIGONES	6
1.1 Hormigón. Generalidades.	6
1.1.1 Características.....	6
1.2 Ventajas e inconvenientes del hormigón armado	6
1.2.1 Ventajas del hormigón armado	7
1.2.2 Inconvenientes del hormigón armado	7
1.3 Componentes del hormigón	8
1.3.1 Los Aridos	9
1.3.2 Agua	9
1.3.3 Otros componentes minoritarios	10
1.3.4 Cementos	10

1.3.4.1 Cemento Portland	10
1.3.4.2 Cemento de bajo carbono.	12
1.4 Vida útil	13
1.5 Durabilidad del hormigón	14
1.6 Durabilidad vs desempeño.	15
1.7 Sitios de exposición	18
1.8 Estudios de durabilidad en función de la Norma Cubana 120:2014	18
1.8.1 Método Torrent	18
1.8.2 Resistividad	19
1.8.3 Carbonatación	19
1.8.4 Absorción de agua	20
1.8.5 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.	21
Conclusiones del Capítulo 1	21
 CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON CEMENTO DE BAJO CARBONO Y PORTLAND EN DIFERENTES CONDICIONES DE AGRESIVIDAD DE ACUERDO A LA NORMA CUBANA 120: 2014. 22	
2.1 Materiales y dosificaciones empleados	22
2.2 Sitios de exposición	23
2.2.1 Sitio de exposición Punta Matamoros (Cayo Santa María)	24
2.2.2 Sitio de exposición Sede Universitaria (Cayo Santa María).	24
2.2.3 Sitio de exposición Facultad de Construcciones (Universidad).	25
2.3 Extracción de testigos y preparación de las muestras	26
2.4 Métodos utilizados para realizar los ensayos.	27

2.4.1 Método de Torrent.....	27
2.4.2 Resistividad eléctrica.	28
2.4.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.	31
2.4.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004.	33
2.4.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011	34
2.6 Resultados obtenidos	36
2.6.1 Método de Torrent	36
2.6.2 Resistividad eléctrica	36
2.6.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.	37
2.6.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004. 37	
2.6.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011	38
Conclusiones Parciales Capítulo 2	39
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
3.1 Método Torrent	40
3.1.1 Comparación de resultados entre la serie 2 años, serie 1.5 años y serie 6 meses	41
3.2 Resistividad Eléctrica	42
3.2.1 Comparación de resultados entre la serie 2 años, 1.5 años y 6 meses 43	
3.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202. ...	44
3.3.2 Comparación de resultados entre las series 1.5 años con la serie 6 meses.	45

3.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004.	46
3.4.1 Comparación de resultados de carbonatación ente la serie 1.5 años y 6 meses	47
3.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011	48
3.5.1 Comparación de resultados de absorción de agua ente la serie 2 años y 1.5 años	49
Conclusiones Parciales Capítulo 3	49
CONCLUSIONES GENERALES.	51
Recomendaciones	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

INTRODUCCIÓN

La sociedad actual demanda de fuertes inversiones en la construcción de industrias, viviendas y centros turísticos para el desarrollo sustentable de cada región y país, lo que no está exento del uso del cemento como material constructivo en la materialización de estas necesidades sociales y el hormigón, principal destino del cemento, es hoy uno de los materiales más popularmente empleados en estas construcciones. (Labrada, 2014)

El Cemento Portland es uno de los materiales más empleados a nivel mundial, es uno de los principales contribuidores del desarrollo de la humanidad y es considerado como el material más usado en la industria de la construcción.

Inevitablemente en los procesos de fabricación del cemento grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) son liberadas a la atmósfera, se dice que la industria del cemento constituye una de las más contaminantes al medio ambiente ya que es responsable de entre el 5 y el 8 % de las emisiones globales de CO_2 (Contreras, 2015).

Con el incremento de la demanda y de la producción de cemento en años venideros, estas emisiones tenderán a crecer significativamente. La industria del cemento demanda grandes cantidades de energía, en la combustión de las materias primas en el horno, así como la molienda para reducir hasta polvo el clínker y es por esto que consume alrededor del 6 % del consumo de energía en el sector industrial (Agency, 2013).

Debido a estos factores que influyen de forma negativa en sus costos y sostenibilidad ambiental se hace necesario poner en práctica estrategias que contribuyan al crecimiento de su producción de manera sustentable. Entre estas

estrategias se encuentra la mejora en la eficiencia de los procesos, el uso de fuentes alternativas de combustibles y la reducción del factor de clínker. Siendo esta última la opción más viable para la industria cubana, pues requiere de menores inversiones a corto plazo.

Esta concepción ha sido parte esencial del trabajo que durante varios años ha desarrollado el Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas donde se han obtenido interesantes resultados en los últimos años ya que se ha desarrollado un producto consistente en un tipo de cemento mezclado a partir de la combinación de clínker, caliza y arcilla calcinada (cemento de bajo carbono). El cemento de bajo carbono (LC3) es un tipo de cemento ternario producido industrialmente en la planta de cemento Siguaney en Santi Spíritus y los resultados experimentales han ofrecido ventajas y bondades de tipo económico y ecológico a la innovación científica, contando en la actualidad con aplicaciones prácticas en Cuba (Vizcaíno, 2014)

Un comportamiento mecánico satisfactorio en los hormigones fabricados con LC3 no es un indicador suficiente para garantizar la disposición del mismo, ya que además de su resistencia, los hormigones fabricados con este aglomerante deben proporcionar propiedades físico-químicas que aseguren la durabilidad durante su vida útil, entendiendo según el (ACI, 2002) como durabilidad del hormigón a la habilidad del material para resistir las acciones del medioambiente, ataques físicos, químicos u otros procesos de deterioro durante el ciclo de vida para el cual fue proyectado con mínimo mantenimiento.

De manera simplificada se puede decir que la durabilidad del hormigón depende de tres factores fundamentales: de las condiciones de explotación, de las características de los materiales y de las condiciones ambientales en las que se encuentra expuesto. Partiendo del hecho de que las condiciones de explotación deben ser tenidas en cuenta en el diseño de los elementos, el problema queda en función de los restantes factores (Betancourt, 2014), en los cuales se establece una relación directa que expone que según sea la calidad de materiales utilizados

para la elaboración del hormigón, se obtendrán mejores o peores comportamientos del mismo frente a las acciones medioambientales a las que ha sido expuesta. (Licor, 2016)

El Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM) a partir del estudio de esta normativa se dio a la tarea de construir sitios de exposición para cada uno de estos niveles de agresividad, En estos sitios de exposición se desarrolla un trabajo de seguimiento con rondas de ensayos de durabilidad cada año, donde se determina la profundidad de carbonatación, migración de iones cloruro, permeabilidad de aire, porosidad efectiva y resistividad a los hormigones expuestos, con el objetivo de desarrollar hormigones a partir de la utilización del cemento LC3 (base Clinker-caliza-arcilla calcinada) en función de las especificaciones técnicas y ensayos establecidos en esta norma cubana. (González, 2018)

Dentro de este contexto, en la presente investigación se plantea como **problema científico**:

¿Cómo se comportan los hormigones elaborados con cemento de bajo carbono(LC3) bajo diferentes condiciones de agresividad de acuerdo a la (NC-120, 2014)?

Para dar cumplimiento a tal problemática se traza así la siguiente **hipótesis**:

Con la utilización del cemento LC3 se pueden producir hormigones que poseen un comportamiento más adecuado que los hormigones producidos con cemento Portland, los cuales pueden ser utilizados en zonas con diferentes niveles de agresividad según lo establecido por la (NC-120, 2014).

El **objetivo general** de la investigación es:

Evaluar el comportamiento de hormigones elaborados con LC3 bajo diferentes condiciones de agresividad según la (NC-120, 2014).

Objetivos específicos:

1. Realizar una búsqueda bibliográfica amplia que ofrezca una base teórica sobre sobre estudios de durabilidad en hormigones.
2. Determinar la permeabilidad al aire, resistividad eléctrica, resistencia a la penetración de iones cloruros, carbonatación y absorción de agua de hormigones fabricados con LC3 y con CPO para cada uno de los niveles de agresividad especificados en la NC 120:2014.
3. Evaluar testigos de hormigón de la serie 2 años fabricados con LC3 y con CPO.

Las **tareas científicas** a desarrollar son:

-Determinación de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón fabricados con LC3 y CPO para cada uno de los niveles de agresividad, usando el método de Torrent.

-Medición la resistividad eléctrica en especímenes de hormigón fabricados con LC3 y CPO para cada uno de los niveles de agresividad.

-Evaluación de la migración de iones cloruro y determinación de perfiles de cloruro en especímenes de hormigón fabricados con LC3 y CPO para cada uno de los niveles de agresividad, según la norma ASTM C 1202.

-Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la profundidad de carbonatación en especímenes de hormigón fabricados con LC3 y CPO para cada uno de los niveles de agresividad.

-Comparación de los resultados obtenidos con la serie 6 meses y 1.5 años.

La **novedad científica** de este trabajo se basa en la evaluación del desempeño de los hormigones elaborados con cemento de bajo carbono, lo que demuestra su efectividad de uso general para cualquiera de las condiciones de agresividad de nuestro país.

Aportes

Aporte Práctico:

El trabajo permitirá demostrar si los hormigones elaborados con Cemento de Bajo Carbono cumplen con los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Aporte Medio Ambiental:

Los resultados del trabajo facilitarán la introducción en la práctica social de nuestro país, de la producción y empleo de un cemento con menor costo de producción y menor impacto ambiental.

Estructura de la investigación

Resumen.

Introducción: Estructura y caracterización del diseño de la investigación.

Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre durabilidad de hormigones en función de las normativas vigentes.

Capítulo II: Evaluación de hormigones elaborados con cementos de bajo carbono y Portland en diferentes condiciones de agresividad de acuerdo a la Norma Cubana 120:2014.

Capítulo III: Análisis y discusión de resultados.

Conclusiones.

Recomendaciones.

Bibliografía.

Anexos.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE DURABILIDAD DE HORMIGONES

1.1 Hormigón. Generalidades.

1.1.1 Características

A simple vista nos podemos dar cuenta que el hormigón es una piedra artificial de color gris, que ha logrado endurecer después de un largo proceso, podemos percibir su resistencia a las cargas y también a los agentes agresivos del medio ambiente. La forma que adopta es variada, puede ser rectangular, cuadrada, en fin la que adquiera del molde. Si lo tocamos, nos damos cuenta de su dureza y si intentamos con nuestros brazos levantar una parte grande de él no podríamos, necesitaríamos equipos, ya que su peso promedio es de 2400Kg/m³. Debido a la avanzada tecnología desarrollada en su fabricación, desde el momento de realizar el diseño de la dosificación de los componentes, se pueden prefijar las propiedades que tendrá, como: la resistencia mecánica, peso e impermeabilidad. El hormigón una vez elaborado, al igual que los morteros, debe aplicarse en un plazo mínimo establecido, debido al fraguado rápido del cemento. (Franco, 2015)

1.2 Ventajas e inconvenientes del hormigón armado

El hormigón es el material de construcción más utilizado en todo el mundo pues las ventajas que este proporciona lo hacen ser el material de preferencia por sobre muchos otros, a pesar de que presenta desventajas. (Franco, 2015)

1.2.1 Ventajas del hormigón armado

Es un material con aceptación universal, por la disponibilidad de los materiales que lo componen.

Monolitismo y continuidad: las estructuras realizadas con hormigón armado forman un único cuerpo, evitando así los inconvenientes originados por todo tipo de enlaces. Esta característica, confiere a las estructuras de hormigón armado una gran seguridad frente a los efectos sísmicos y dinámicos.

Conservación: es un material cuyo mantenimiento a lo largo de los años tiene un coste muy bajo si lo comparamos con las estructuras de acero o madera.

Material con carácter formáceo: al tratarse de un material moldeable, podemos adaptarlo a infinidad de formas empleando un encofrado o molde. Esto supone una gran ventaja, ya que podemos adaptar la forma a casi cualquier tipo de obra.

Facilidad de construcción: presenta la ventaja de que su diseño no requiere de tanta precisión como las estructuras construidas con otros materiales, por ejemplo, acero.

Material económico: si lo comparamos con el acero, el hormigón armado es un producto más económico. Se estima que esta economía frente al acero se mantiene siempre y cuando la estructura no supere las nueve plantas. (Franco, 2015)

Durabilidad y resistencia al fuego: esta es una ventaja que se cumple siempre y cuando la puesta en obra del hormigón haya sido la correcta, respetando los recubrimientos y las exigencias mínimas de calidad acordes al medio que lo rodea. Como material, el hormigón armado es incombustible y es mal conductor del calor. También es cierto que, ante un incendio considerable, el hormigón armado puede sufrir fisuras por dilatación que terminen colapsando la estructura (A., 2017).

1.2.2 Inconvenientes del hormigón armado

Puesta en obra más lenta: la puesta en obra del hormigón armado está condicionada no sólo por la climatología sino por los tiempos de fraguado y

endurecimiento. Esto requiere de un mayor control y de un incremento de los tiempos de espera.

Requiere el uso de grandes secciones con grandes pesos: si comparamos el hormigón armado con el acero, nos encontramos que las secciones de la estructura son mayores, presentando así un mayor peso. El uso de encofrados y elementos auxiliares aumenta el coste y el peso de la estructura durante la puesta en obra.

Proceso de curado delicado que requiere de especial atención: la puesta en obra del hormigón armado incluye un proceso de curado muy cuidadoso, que requerirá de una especial atención y seguimiento.

Dependencia del clima: la puesta en obra del hormigón depende en gran medida de las condiciones meteorológicas durante la puesta en obra y curado. Esto tiene como consecuencia que las estructuras de hormigón armado son más vulnerables a los retrasos en la planificación y ejecución de la estructura (A., 2017).

1.3 Componentes del hormigón

El hormigón se fabrica esencialmente a partir de árido grueso, árido fino, cemento y agua, aunque ya en nuestro tiempo la gran mayoría de los hormigones que se producen en el mundo poseen un cuarto ingrediente, los “aditivos”.

Los materiales constituyentes del hormigón no pueden contener sustancias dañinas en cantidades tales que puedan tener una influencia negativa en la durabilidad del hormigón o provoquen la corrosión del acero de refuerzo y deberán ser adecuados para el uso previsto del hormigón. Aunque la aptitud general del uso de un material constituyente esté establecida, eso no significa que pueda ser empleado en todos los casos y para todo tipo de hormigones.

La composición del hormigón y los materiales constituyentes se elige para satisfacer los requisitos especificados para el hormigón fresco y endurecido, que incluyen la consistencia, densidad, resistencias mecánicas, durabilidad en general y más específicamente la protección del acero embebido contra la corrosión, teniendo en cuenta los procesos de fabricación y el método elegido para la ejecución.

1.3.1 Los Áridos

Clasificación en función de sus dimensiones.

- Áridos gruesos o gravas, con un diámetro superior a 5 mm.
- Áridos finos o arenas, que son los de un diámetro inferior a 5 mm.
- Limos, que son arenas muy finas, de tamaño inferior a 0,08 mm.
- Se denomina zahorra la mezcla natural o artificial de gravas y arenas, con diámetros comprendidos entre 0,08 y 40 mm.

Estos tienen como función aportar la resistencia mecánica a la mezcla y disminuir el consumo de cemento, disminuyendo los costos de fabricación. Es por esto que constituyen la mayor parte del volumen y masa del hormigón. (Ecured, 2017b)

1.3.2 Agua

El agua utilizada para el amasado del hormigón en obra no debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica.

Podrán emplearse aguas de mar o aguas salinas análogas para el amasado de hormigones que no contengan armadura alguna. Salvo estudios especiales, se prohíbe expresamente el empleo de estas aguas para el amasado del hormigón armado o pretensado. (Anónimo, 2017)

1.3.3 Otros componentes minoritarios

Los componentes básicos del hormigón son cemento, agua y áridos; otros componentes minoritarios que se pueden incorporar son: adiciones, aditivos, fibras, cargas y pigmentos.

Pueden utilizarse como componentes del hormigón los aditivos y adiciones, siempre que mediante los oportunos ensayos, se justifique que la sustancia agregada en las proporciones y condiciones previstas produce el efecto deseado sin perturbar excesivamente las restantes características del hormigón ni representar peligro para la durabilidad del hormigón ni para la corrosión de las armaduras.

Las adiciones son materiales inorgánicos que, finamente molidos, pueden ser añadidos al hormigón en el momento de su fabricación, con el fin de mejorar alguna de sus propiedades o conferirle propiedades especiales.

Los aditivos son sustancias o productos que se incorporan al hormigón, antes o durante el amasado, produciendo la modificación de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

1.3.4 Cementos

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí. Es considerado el conglomerante más importante en la actualidad.

1.3.4.1 Cemento Portland

Fabricación

El proceso consiste en tomar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto de la caliza (CaO) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3). El producto resultante denominado polvo crudo ingresa al horno y egresa como clínker. El proceso se completa con la molienda conjunta del clínker y yeso, obteniendo el cemento portland. Trituración primaria: Los bloques de rocas calcáreas y las arcillas provenientes de las canteras, ingresan a la

tritadora primaria quedando reducidas a tamaños inferiores a los 10 cm. Trituración secundaria: Ingresar el material proveniente de la trituradora primaria y salir con tamaños máximos inferiores a 2,5 cm. Molienda: El material resultante de la trituradora secundaria ingresa a un molino, resultando un producto impalpable, denominado polvo crudo. Homogeneización: Con el fin de alcanzar la unión íntima de los compuestos, se somete al polvo crudo a un mezclado intensivo, por medio de ciclones de aire. Calcinación: El polvo crudo ingresa al horno, elevándose la temperatura hasta alcanzar los 1450 °C, en donde se produce una fusión incipiente del producto resultante, denominado clínker. Molienda: Finalmente, el clínker conjuntamente con el yeso se muele hasta obtener el Cemento Portland.

Propiedades del cemento

Resistencia: la resistencia a la compresión es afectada fuertemente por la relación agua/cemento y la edad o la magnitud de la hidratación. **Durabilidad y flexibilidad:** ya que es un material que no sufre deformación alguna. El cemento es hidráulico porque al mezclarse con agua, reacciona químicamente hasta endurecer. El cemento es capaz de endurecer en condiciones secas y húmedas e incluso, bajo el agua. El cemento es notablemente moldeable: al entrar en contacto con el agua y los agregados, como la arena y la grava, el cemento es capaz de asumir cualquier forma tridimensional. El cemento (y el hormigón o concreto hecho con él) es tan durable como la piedra. A pesar de las condiciones climáticas, el cemento conserva la forma y el volumen, y su durabilidad se incrementa con el paso del tiempo. El cemento es un adhesivo tan efectivo que una vez que fragua, es casi imposible romper su enlace con los materiales tales como el ladrillo, el acero, la grava y la roca. Los edificios hechos con productos de cemento son más impermeables cuando la proporción de cemento es mayor a la de los materiales agregados. El cemento ofrece un excelente aislante contra los ruidos cuando se calculan correctamente los espesores de pisos, paredes y techos de concreto. (Franco, 2015)

1.3.4.2 Cemento de bajo carbono.

A medida que se desarrollan los países, la demanda de infraestructura y vivienda se incrementa. Ante la imposibilidad de disponer de las cantidades suficientes de cemento para acometer las variadas obras y la creciente demanda de materiales de construcción, la única elección factible en el corto plazo sería la producción del cemento de bajo carbono.

El LC3 es una formulación desarrollada por un equipo técnico del Centro de Investigaciones y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), adscrito a la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV) y del Instituto Federal de Tecnología de Lausana, Suiza, que permite sustituir una buena parte del clínker - uno de los componentes más costosos del cemento-, por una combinación de arcilla calcinada, conocida como metakaolín, y carbonato de calcio en forma de piedra caliza.

Una combinación entre investigación y aplicación directa en la práctica ha demostrado que las arcillas caoliníticas de bajo grado, de amplia abundancia en la naturaleza, podrían ser utilizadas como un material alternativo de bajo carbono. Los resultados iniciales de las pruebas industriales realizados en Cuba han sido validados por un proyecto más amplio que involucra a un grupo de organizaciones académicas y de desarrollo en la India.

Algunos proyectos de producción industrial han sido implementados en Cuba y la India, y en ambos países se han construido varias estructuras usando cemento de bajo carbono, además de ser empleado en lugares muy agresivos como la cayería norte de Villa Clara, demostrándose que el nuevo cemento es de similar resistencia que el Portland, y de una firmeza muy superior a la penetración de agentes como los cloruros. La producción a escala comercial de este cemento permitirá abastecer la creciente demanda sin tener que realizar grandes inversiones de capital, y con un reducido impacto ambiental. (Martirena, N.D)

El LC3, como se conoce este nuevo cemento, permite casi duplicar la cantidad de cemento producido a partir de la misma cantidad de caliza sustituyendo una gran parte del Clínker (principal componente del cemento) con arcilla calcinada.

El cemento de arcilla calcinada y caliza (LC3) permite reducir entre un 20-30% de las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento tradicional; una gran reducción si se considera que el cemento es responsable del 5-8% de las emisiones producidas por la actividad humana.(Martirena, N.D)

El cemento de bajo carbono, de bajo costo y bajo capital puede alcanzar propiedades similares o incluso superiores al cemento Portland. La mezcla puede ser producida fácilmente en las líneas de producción existentes en muchos de los países del mundo, con el único requerimiento de pequeñas inversiones capitales.(Martirena, N.D)

1.4 Vida útil

Se entiende por vida útil el período de tiempo durante el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada, sin necesidad de intervenciones no previstas. La tendencia actual es preocuparse por la durabilidad de las estructuras, pero ya no solamente en forma cualitativa, sino establecer un lapso como referencia, sino estableciendo desde el proyecto el mismo. A pesar de que esta preocupación es una constante en el medio técnico desde los inicios de los años 90 del siglo XX, la misma no se ha podido transformar en una metodología ampliamente aceptada, con resultados cuantitativos predeterminados. Incluso en las actualizaciones de las normativas de los países más avanzados, entre ellas la NBR 6118 (2003), si bien ya son más abarcales e incluyen tópicos antes ausentes, como garantía de calidad y durabilidad de las estructuras, y afirman que la estructura debe mantener la seguridad, estabilidad y aptitud en servicio durante el período correspondiente a su vida útil, pero sin especificar cuál debería ser esta vida útil. Lo mismo pasa con el ACI 201.2R (2001) que define como hormigón durable aquel que posee la capacidad de resistir el intemperismo, ataques químicos, desgaste por abrasión y cualquier otro proceso de degradación, reteniendo su forma original, calidad y capacidad de utilización, cuando expuesto al ambiente de trabajo. Tampoco se menciona el factor tiempo en la definición.

Evidentemente que la complejidad de los fenómenos de deterioro envueltos en la durabilidad de las estructuras de hormigón presenta una gran dificultad a la hora de consensuar acerca del modo de introducir el factor tiempo en la normativa técnica. Como consecuencia de esas falencias observadas en las normas, el medio técnico se ha movilizadado para avanzar en la conceptualización objetiva de la vida útil de las construcciones. Entonces se empiezan a definir varios tipos de vida útil o de servicio, como la vida útil desde el punto de vista técnico, funcional o económico. Asimismo, en el ACI 365.1R - 00, se habla de que se necesita un enfoque más holístico para el diseño de las estructuras cuando se basan en consideraciones relativas a la vida útil o de servicio, debiéndose considerar los efectos del medio ambiente sobre el hormigón, las consideraciones de diseño y de cargas, las interacciones entre los efectos del medio ambiente y de las cargas, aspectos relativos a la construcción y al mantenimiento a lo largo de su vida de servicio. (Yugovich, 2012)

1.5 Durabilidad del hormigón

La durabilidad del hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta. Evidentemente, las estructuras construidas con hormigón tienen que enfrentarse (en la mayor parte de los casos) a los efectos de estar a la intemperie, de forma que no se pueden obviar las causas que pueden provocar su degradación (dejando en este caso a un lado los efectos diferentes a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural).

Una estrategia correcta para la durabilidad debe tener en cuenta que es una estructura puede haber diferentes elementos sometidos a distintos tipos de ambiente, señalan en este trabajo. Así pues, el concepto de durabilidad puede ir de los 3 a 10 años de una estructura de carácter temporal, a los 100 años de vida útil nominal que debe tener los puentes de una longitud igual o superior a 10 metros, así como construcciones civiles de alta repercusión económica.

La durabilidad de hormigón, que es una de las características más destacadas de este material de construcción, ya debe venir determinada desde la fase de proyecto. Mucho antes de que, en nuestro caso, comencemos a fabricar piezas de hormigón, ya se han estudiado los agentes agresivos ambientes a los que está sometida una estructura y el “tipo de ambiente” en el que se proyecta cada elemento. Por supuesto, se debe detallar los mecanismos de degradación del hormigón a los que se expone cada proyecto constructivo y cómo se mantendrán y sustituirán las piezas que, a buen seguro, se estropean antes que la propia estructura. (Collepari, 2014)

1.6 Durabilidad vs desempeño.

Entre las principales causas de un desempeño insatisfactorio de las estructuras de hormigón se encuentran:

Crear que, a fin de lograr durabilidad extendida de estructuras expuestas a ambientes agresivos, es suficiente aplicar criterios tradicionales de diseño y especificación, así como niveles convencionales de ejecución e inspección.

La falta de conocimiento de los ingenieros civiles y arquitectos en el proceso de ataque y deterioro de las estructuras.

Falta de tecnologías para predecir la vida útil de materiales, componentes y estructuras.

No contar con bases sólidas para un eficaz plan de mantenimiento de las estructuras.

Aumento de la agresividad química del medioambiente. (Torrent, 2015)

La Norma Cubana 120:2014, exhibe cuatro tipos generales de exposición relativos a la corrosión de las armaduras, mostrados en la tabla 1.1, que se corresponden con las cuatro condiciones de agresividad a las que fueron expuestos los especímenes elaborados con cemento de bajo carbono y cemento Portland.

Tabla 11 NC 120: 2014 Tipos generales de exposición, relativos a la corrosión de armaduras.

Agresividad	Descripción	Ejemplos
Muy alta	<p>Elementos de estructura marinos por encima del nivel de la marea alta y en zonas de recorridos de mareas.</p> <p>Estructuras situadas en las proximidades de la línea costera hasta 500 m del mar en la costa norte y hasta 100 m en la sur.</p> <p>Estructuras no impermeabilizadas en contacto con aguas que presenten un contenido elevado de cloruros no necesariamente relacionados con el ambiente marino.</p>	<p>Edificaciones y otras estructuras situadas en las proximidades indicadas de las costas y cayos.</p> <p>Puentes en las proximidades indicadas de la costa y pedraplenes.</p> <p>Zonas aéreas de diques y otras obras de defensa del litoral.</p> <p>Instalaciones de los puertos.</p> <p>Piscinas, estanques de acuarios y tanques, con aguas de mar o salobres, etc.</p> <p>Edificaciones y otras estructuras situadas en las proximidades de zonas con altos contenidos de iones cloruros como salineras, plantas de tratamientos, etc.</p>
Alta	<p>Elementos de estructuras marinos sumergidos permanentemente.</p> <p>Estructuras situadas en la franja costera a más de 500 m y hasta 3 Km. del mar en la costa norte y a más de 100 m y hasta 1 Km. en la costa sur.</p> <p>Estructuras soterradas bajo la influencia total o parcial de agua</p>	<p>Edificaciones y otras estructuras situadas en las proximidades indicadas de las costas.</p> <p>Puentes en las proximidades indicadas de la costa. Zonas de diques y otras obras de defensa costera sumergidas permanentemente.</p> <p>Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.</p> <p>Cimentaciones y estructuras soterradas en general bajo las influencias agresivas</p>

	de mar o salobre.	indicadas.
Media	<p>Estructuras situadas en la franja costera a más de 3 Km. y hasta 20 Km. de la costa norte y a más de 1 Km. y hasta 20 Km. de la costa sur.</p> <p>Estructuras soterradas bajo la influencia total o parcial de aguas y suelos comunes.</p> <p>Interiores de edificaciones aisladas del medio exterior y sometidas a humedades altas o condensaciones.</p> <p>Estructuras situadas en zonas de humedades relativas medias anuales mayores de 65%.</p> <p>Depósitos de agua dulce</p>	<p>Edificaciones y otras estructuras situadas en las proximidades indicadas de las costas.</p> <p>Cimentaciones en general bajo los requerimientos indicados.</p> <p>Sótanos no ventilados.</p> <p>Locales destinados a saunas, lavanderías, fregados, etc. que posean altas humedades con altas frecuencias de ocurrencia.</p> <p>Todos los casos de estructuras situadas en las franjas costeras indicadas o a mayores distancias, pero sometidas a humedades relativas superiores al 65 %. Piscinas, cisternas, tanques, conductoras y otros depósitos en general que contengan agua dulce</p>
Baja	<p>Estructuras situadas a más de 20 km. de ambas costas.</p> <p>Interiores de edificaciones no sometidos a condensaciones.</p> <p>Estructuras soterradas no afectadas por las aguas subterráneas o freáticas en</p>	<p>Edificaciones y otras estructuras situadas en las franjas costeras y bajo las condiciones indicadas.</p> <p>Interiores de edificios protegidos de la intemperie. Sótanos y obras soterradas ventiladas o sometidas a humedades inferiores al 65 %.</p>

	suelos comunes. Estructuras situadas en zonas de humedades relativas medias anuales iguales o menores del 65 %.	Cimentaciones en general bajo los requerimientos indicados.
--	--	---

1.7 Sitios de exposición

Para la realización de este estudio se ejecutaron tres diseños de hormigón, los cuales han sido expuestos en diferentes condiciones de agresividad atendiendo a la NC 120:2014, el diseño de mezcla H1 se ubicó directamente en contacto con el agua de mar en el sitio de exposición de Punta Matamoros en Cayo Santa María, el diseño H2 fue expuesto a un ambiente de agresividad alta en el sitio de exposición de la Sede Universitaria de Cayo Santa María y la H4 fue expuesta en el sitio de la propia Facultad de Construcciones comprendido como una zona de agresividad baja.

La durabilidad de estos hormigones es evaluada cada año mediante la extracción de testigos y la ejecución de un protocolo de ensayos al cual han sido incorporados los ensayos y especificaciones establecidos en la Tabla 11 de la NC 120:2014.

1.8 Estudios de durabilidad en función de la Norma Cubana 120:2014

La norma cubana 120: 2014 regula una serie de ensayos que evalúan el comportamiento durable del hormigón. Entre estos ensayos se tiene: Absorción de agua, Resistividad eléctrica, Permeabilidad al aire, carbonatación y ASTM 1202.

1.8.1 Método Torrent

No existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del hormigón y relacionarla con su durabilidad. Sin embargo, diversas

investigaciones han indicado que la permeabilidad del hormigón, al aire o al agua, es una excelente medida de su resistencia al ingreso de medios agresivos en el estado gaseoso o líquido y así constituye una medida de la durabilidad potencial de un hormigón dado.

El llamado "Método Torrent" para medir, de modo enteramente no-destructivo, la permeabilidad al aire del recubrimiento, apunta exactamente a eso: a especificar y controlar la calidad del recubrimiento de la estructura terminada. (Gonzalez, 2017)

1.8.2 Resistividad

La resistividad eléctrica (también conocida como resistividad, resistencia eléctrica específica o resistividad de volumen) cuantifica la fuerza con la que se opone un material dado al flujo de corriente eléctrica. Una resistividad baja indica un material que permite fácilmente el movimiento de carga eléctrica. Los metales de resistencia baja, por ejemplo el cobre, requieren mayores corrientes para producir la misma cantidad de calor. Los materiales de resistencia baja también exhiben una baja resistencia constante.

1.8.3 Carbonatación

La carbonatación es una de las posibles patologías del hormigón. Es un proceso lento en el que la portlandita (cal apagada o hidróxido cálcico) del cemento hidratado y endurecido reacciona con el dióxido de carbono del aire formando carbonato cálcico. Esta reacción necesariamente se produce en medio acuoso, ya que el dióxido de carbono reacciona, en primer lugar, con el agua formando ácido carbónico, y este ácido es el que reacciona después con el hidróxido de calcio produciendo carbonato de calcio y agua. Este proceso produce un notable descenso del pH haciendo que la armadura del hormigón pierda su protección frente a la corrosión. Con el paso del tiempo, la corrosión de las armaduras (fenómeno expansivo) produce daños en el hormigón y merma la capacidad portante de los elementos estructurales afectados. La hidratación del silicato tricálcico del cemento produce bastante más portlandita que la hidratación del silicato bicálcico, por lo que los hormigones fabricados con cementos con altas

proporciones de SC3 son mucho más vulnerables a la carbonatación. (Ecured, 2017a)

1.8.4 Absorción de agua

La tasa de absorción, sorptivity o velocidad de ascensión capilar es una propiedad hidráulica fácilmente mensurable, que caracteriza la tendencia de un material poroso a absorber y transmitir agua a través de su masa por succión capilar. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por lo tanto a los agentes agresivos ambientales. La absorción capilar es un caso especial de transporte inducido por la energía (tensión superficial) del agua actuando sobre los capilares del hormigón. El hormigón ejerce acciones atractivas sobre las moléculas situadas en la superficie del líquido provocando con las mismas el llenado de los espacios existentes en su masa.

La succión capilar puede ser medida solamente en morteros y hormigones parcialmente saturados, no produciéndose el fenómeno de succión en los materiales saturados (capilares totalmente llenos de agua), mientras que en los materiales totalmente secos la absorción del agua se efectúa en los capilares y también en el gel, por lo cual los resultados no son comparables por encontrarse distorsionados. Por lo tanto la tasa de absorción capilar dependerá del contenido inicial de agua y de su uniformidad, por lo que el pre-acondicionamiento de las muestras constituye un factor determinante a la hora de comparar los resultados. Es necesario entonces seguir un procedimiento estandarizado en el secado de las muestras que garantice una distribución uniforme de la humedad en todo el espesor de las mismas. (Ichaso, 2014)

Además del contenido inicial de humedad y de su uniformidad, el transporte de líquidos en sólidos porosos está influenciado por las características del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial), por las características del sólido poroso (estructura de poros y energía superficial), tiempo y condiciones de curado, características de las mezclas y temperatura.

1.8.5 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.

El cloruro puede incorporarse al hormigón con los materiales componentes y/o por procesos de difusión, permeabilidad o capilaridad, cuando el material se encuentra expuesto a atmósferas, aguas o suelos húmedos que contengan cloruro. El porcentaje de cloruro que incorporan los materiales componentes del hormigón, en particular los agregados y aditivos, es fácilmente controlado. En cambio, la velocidad a la que el cloruro ingresa desde el ambiente al hormigón endurecido puede ser controlado solamente actuando sobre la porosidad y la conectividad de poro del hormigón de recubrimiento, o empleando alternativas de protección adicionales (membranas, revestimientos). Si en las cercanías de la barra la cantidad de cloruro en el líquido de poros supera una determinada concentración denominada umbral crítico, la película pasiva formada sobre la superficie del metal se altera. Esta alteración da origen a la formación de una celda electroquímica en la cual el área alterada actúa como ánodo, iniciándose el proceso de corrosión. (Traversa and Villagrán Zaccardi, 2010).

Conclusiones del Capítulo 1

- La durabilidad del hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta.
- El hormigón es el material de construcción más empleado en la industria constructiva gracias a la resistencia que alcanza y las condiciones de durabilidad que ofrece.
- Actualmente en la sustitución del Clinker se pueden emplear materiales puzolánicos, como las puzolanas naturales y las arcillas, que presentan una alta reactividad puzolánica una vez activadas térmicamente (Nazco, 2014)
- La NC 120: 2014 establece diferentes dosificaciones para hormigones en función de cuatro niveles de agresividad (muy alta, alta, media y baja).

CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON CEMENTO DE BAJO CARBONO Y PORTLAND EN DIFERENTES CONDICIONES DE AGRESIVIDAD DE ACUERDO A LA NORMA CUBANA 120: 2014.

Este capítulo describe los diferentes sitios de exposición donde han sido expuestas las diferentes series de probetas. Se argumentan de forma detallada los ensayos que se ejecutan como parte de esta investigación, haciendo énfasis en la descripción del equipamiento utilizado y el procedimiento llevado a cabo.

2.1 Materiales y dosificaciones empleados

Como parte de la investigación se expusieron tres dosificaciones de hormigón elaboradas con LC3 y cemento Portland para diferentes niveles de agresividad con el objetivo de establecer una comparación entre estos dos cementos y evaluar el comportamiento del cemento de bajo carbono en la producción de hormigones. Estas series de hormigón se distribuyeron por diferentes lugares de la región central del país que responden a cada uno de los niveles de agresividad atmosférica que describe la NC 120:2014

Esta investigación también pretende comparar el estado de estos hormigones con el paso del tiempo. Por un período de 2 años estuvieron los especímenes expuestos a la intemperie, los cuales fueron retirados y trasladados al Laboratorio de Materiales de la Facultad de Construcciones donde se le realizaron los ensayos correspondientes. Las dosificaciones de los hormigones elaborados con cemento Portland y LC3 fueron elaborados en el año 2016 y se muestran en la tabla 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Dosificación gravimétrica kg/m^3 de hormigón con CPO(Sánchez and Antonio, 2016).

Tipo mezcla	Agresividad NC 120:2014	f'c (Mpa)	Relación a/c	Cem (kg)	Aditivo SX-32 (kg)	A. fino (kg)	A. Medio (kg)	A. Grueso (kg)	Agua (kg)
H1	Muy Alta	35.0	0.40	430	3.87	634	352	775	172
H2	Alta	30.0	0.45	405	3.65	651	362	796	182
H4	Baja	20.0	0.55	345	3.1	690	384	844	190

Tabla 2.2. Dosificación gravimétrica kg/m³ de hormigón con LC3 (Sánchez and Antonio, 2016).

Tipo mezcla	Agresividad NC 120:2014	f'c (Mpa)	Relación a/c	Cem (kg)	Aditivo SX-32 (kg)	A. fino (kg)	A. Medio (kg)	A. Grueso (kg)	Agua (kg)
H1	Muy Alta	35.0	0.4	430	8.6	634	352	775	172
H2	Alta	30.0	0.45	405	8.1	651	362	796	182
H4	Baja	20.0	0.55	345	6.90	690	384	844	190

2.2 Sitios de exposición

Fueron seleccionados los tres sitios de acuerdo a la agresividad del ambiente en el cual estaban enmarcados, a continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de ellos, ubicación, nivel de agresividad, entre otros aspectos que podrían resultar de interés.

2.2.1 Sitio de exposición Punta Matamoros (Cayo Santa María)

El primer sitio de exposición experimental de hormigones se encuentra ubicado en la región central de nuestro país, en la cayería norte de Villa Clara, específicamente en Punta Matamoros, Cayo Santa María municipio de Caibarién mostrado en la Figura 2.1. Tiene dos plataformas de exposición con un área aproximada de 40 m² de superficie donde fueron expuestos bloques cilíndricos de hormigón de la serie H1. Esta zona corresponde a un nivel de agresividad muy alto.

Se escogió este sitio con el fin de lograr ensayos a largo y mediano plazos que nos permitan evaluar y reunir los elementos necesarios sobre la durabilidad del hormigón en ambiente marino en zonas de marea y salpicaduras.



Figura 2.1. Sitio de exposición de Punta Matamoros, Cayo Santa María (foto tomada por el autor)

2.2.2 Sitio de exposición Sede Universitaria (Cayo Santa María).

Está ubicado dentro de la propia Sede Universitaria en Cayo Santa María, en el municipio de Caibarién, Santa Clara mostrado en la Figura 2.2, tiene una plataforma de 20 m² de superficie y responde a la condición de agresividad alta,

allí están expuestos los bloques cilíndricos de la serie H2 tanto elaborados con cemento LC 3 como con cemento Portland.



Fig. 2.2. Sitio de exposición en Sede Universitaria Cayo Santa María (foto tomada por el autor)

2.2.3 Sitio de exposición Facultad de Construcciones (Universidad).

La Figura 2.3 muestra el sitio que se encuentra ubicado en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central “Marta Abreu de Las Villas” ubicada en la Carretera a Camajuaní km 5, Santa Clara. Allí se encuentran los especímenes que se elaboran en el propio laboratorio de materiales de la facultad con LC3 y cemento Portland, permitiéndonos obtener información de los especímenes allí expuestos (serie H4) los cuales están a un ambiente de agresividad baja.



**Figura. 2.3 Sitio de exposición Facultad de Construcciones, Universidad Central
Marta Abreu**

2.3 Extracción de testigos y preparación de las muestras

En la extracción de testigos se utilizó una broca para penetrar el hormigón y así obtener muestras de este, las muestras cilíndricas obtenidas presentan un diámetro de 100 y 50 milímetros, el equipo utilizado se muestra a continuación en la (Figura 2.4). Los testigos de 100 mm fueron segmentados de la siguiente manera (Figura 2.5) para su posterior utilización en los diferentes ensayos.



Figura 2.4 Equipo usado para la extracción de testigos. (Foto tomada por el autor)



Figura 2.5 Cortes realizados a los testigos de hormigón.

2.4 Métodos utilizados para realizar los ensayos.

2.4.1 Método de Torrent

El método se utiliza para medir el coeficiente de permeabilidad del hormigón de recubrimiento in situ, de un modo no-destructivo. Funciona y se opera del siguiente modo.

Se genera un vacío en la cámara concéntrica de doble celda, la cual se sella al hormigón mediante dos anillos de goma que se adhieren a la superficie. Después de un lapso de 35 a 60 s (con un vacío de 5 a 50 mbar dependiendo del hormigón, instrumento, etc.), la válvula 2 se cierra y la cámara interna queda aislada. El aire en los poros del material comienza a fluir a través del hormigón de recubrimiento hacia la cámara interna, aumentando la presión P_i . Este aumento de presión ΔP_i (medición comienza a los 60 s) se relaciona directamente con el coeficiente de permeabilidad del hormigón superficial.

Un regulador de presión mantiene la presión de la cámara externa permanentemente balanceada con la presión de la cámara interna ($P_e = P_i$). Así, se asegura un flujo unidireccional controlado hacia la cámara interna, un microprocesador almacena la información y calcula automáticamente el valor del

coeficiente de permeabilidad al aire kT , el cual se muestra digitalmente al terminar el ensayo. Esto sucede cuando el aumento de presión alcanza a 20 mbar, o en caso de permeabilidades muy bajas, después de 6 minutos de iniciado el ensayo [6, 7].

Consecuentemente, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, el ensayo puede tardar de 2 a 6 minutos (hasta 12 en modelos anteriores). El microprocesador puede almacenar información de varios ensayos a la vez, y ésta puede ser luego transferida a un PC para análisis adicionales. La función de la válvula 1 es restaurar la presión atmosférica en el sistema para un nuevo ensayo.

La profundidad que se ve afectada por el ensayo (típicamente entre 10 a 70 mm), la cual aumenta con el valor de kT , también es indicada por el instrumento.

La Figura 2.6 muestra el equipo utilizado para la realización de este ensayo.



Fig. 2.6 Permea-TORR, equipo utilizado para medir la permeabilidad al aire (foto tomada por el autor)

2.4.2 Resistividad eléctrica.

El equipo empleado para la medición de la resistividad es el Resipod que se muestra en la Figura 2.7, el cual es una sonda Wenner de 4 puntos

completamente integrada, concebida para medir la resistividad eléctrica de hormigón en un ensayo completamente no destructivo. Es el instrumento más exacto a disposición, extremadamente rápido y estable, protegido en una caja robusta y a prueba de agua, diseñado para funcionar en los entornos más difíciles. (Proceq, 2015)

Funcionando con el principio de la sonda Wenner, el Resipod se ha concebido para medir la resistividad eléctrica de hormigón o rocas. Se aplica una corriente a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas interiores. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. La resistividad calculada depende de la distancia entre las sondas.

La superficie de hormigón no deberá estar revestida de ningún recubrimiento eléctricamente aislante y debería estar limpia. La cuadrícula de barras debajo de la superficie debería haberse marcado con la ayuda de un detector de barras. Si el hormigón está completamente seco, no será posible realizar ninguna medición ya que la corriente es conducida por iones en el líquido de los poros. Por lo tanto, es posible que sea necesario humedecer la superficie.

Una buena conexión entre el instrumento y la superficie de hormigón es el factor más importante para obtener una medición fiable. Se sumerge los contactos en agua varias veces antes de ejecutar una medición; se usa un recipiente poco profundo, de modo que se pueda presionar contra el fondo, con lo cual se llenarán los depósitos. Se presiona el Resipod firmemente hacia abajo hasta que los dos capuchones de goma exteriores estén apoyados en la superficie que deberá ensayarse. La distancia entre sondas debería ser más grande que el tamaño de áridos máximo, ya que el material de áridos típicamente no es conductivo. (Proceq, 2015).

Este ensayo conlleva la preparación previa de los especímenes los cuales se sumergen en una solución de cal con un pH superior o igual a 14 por 48 horas para asegurar que la corriente sea conducida por los iones del líquido contenido en los poros. Al retirar las probetas de la solución se secan superficialmente y se procede a la medición con el aparato que debe ser humedecido antes de ponerse

en contacto con el hormigón para una mejor conducción de la corriente. Se recogen cuatro mediciones perpendiculares las cuales se promedian para obtener el resultado.

Las mediciones de resistividad podrán usarse para estimar la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica (ρ) del hormigón es baja, aumentará la probabilidad de corrosión. Si la resistividad eléctrica es alta (p. ej. en el caso de hormigón seco y carbonatado), se reducirá la probabilidad de corrosión. Mediante pruebas empíricas se han obtenido los siguientes valores típicos para la resistividad medida, los cuales pueden ser usados para determinar la probabilidad de corrosión. Estos valores son válidos para cemento Portland corriente a 20°C.

En caso de ≥ 100 k Ω cm (Riesgo de corrosión insignificante).

En caso de = 50 a 100 k Ω cm (Bajo riesgo de corrosión).

En caso de = 10 a 50 k Ω cm (Riesgo de corrosión moderado).

En caso de ≤ 10 k Ω cm (Alto riesgo de corrosión).



Fig. 2.7 Resipod, equipo utilizado para medir la resistividad eléctrica (foto tomada por el autor)

2.4.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.

El sistema PROOVE'it es usado para evaluar la resistencia en el concreto al ingreso de iones cloruros determinando que tan fácil es forzar a los cloruros dentro de concreto saturado por medio de la aplicación de un potencial eléctrico a través de un espécimen de prueba de acuerdo a la norma AASHTO T 277 o ASTM 1202. Esto es conocido como la "Prueba Coulumb" o la "Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros (Rapid Chloride Permeability Test, RCPT)".

El procedimiento para preparar las muestras de hormigón es muy sencillo, se utilizó un desecador de vacío, el aire en el sistema de poros fue extraído y el agua saturó el hormigón tanto como fue posible, primero se colocaron las muestras en el desecador y se utilizó una manguera que conecta este a la bomba de succión para inducir vacío durante 3 horas aproximadamente, luego se cubrió con agua todos los especímenes y se aplicó vacío una hora más y se dejan en remojo durante 20 horas, después de esto se preparó el ensamblado de las celdas.

Un espécimen saturado en agua, 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, es posicionado en una celda conteniendo una reserva de fluidos en ambos lados. Para el RCPT o Prueba Coulumb, una reserva es llenada con una solución de 3 % NaCl y la otra con solución 0.3N NaOH. Se aplica un potencial de 60 VCD a través de la celda. La terminal negativa se conecta en la reserva con NaCl y la terminal positiva se conecta a la reserva con NaOH. Los iones cloruros cargados negativamente migrarán hacia la terminal positiva. Entre más permeable sea el concreto, más iones cloruro viajarán a través del espécimen, y una mayor corriente será medida. La corriente es medida por 6 horas. Se determina el área bajo la curva contra el tiempo, la cual representa la carga total o los Coulombs que pasaron a través del espécimen. Los valores de la cantidad de Coulombs se utilizan para caracterizar el concreto como sigue (ASTM C 1202).

Durante el ensayo se determina la totalidad de la carga pasada, utilizándose ésta para la clasificación del hormigón según el criterio indicado en la Tabla 2.4, propuesto por Whiting.

Tabla 2.4 Rangos RCPOT (ASTM C1202)

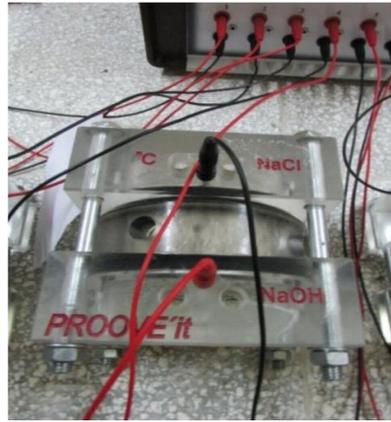
Carga pasada (coulombs)	Permeabilidad al Ion Cloruro
>4.000	Alta
2.000-4.000	Moderada
1.000-2.000	Baja
100-1.000	Muy Baja
<100	Insignificante

Para preparar las celdas el empaque se coloca en las caras de la muestra de hormigón y se unta algo de silicón donde el empaque está en contacto el acrílico, esto permitirá que el empaque se expanda y selle la muestra completamente. La celda es sellada al apretar los cuatro pernos de las esquinas, lo cual presiona a los empaques contra el espécimen.

La unidad de verificación PR-1055 es usada para verificar que la unidad de poder controlada por microprocesador este trabajando correctamente. La unidad es conectada a la línea de poder, 110 VCA o 220 VCA. Cada canal de la unidad de poder PROOVE'it es habilitada para ejecutar una prueba a un voltaje seleccionado y se conecta a la unidad de verificación. Cuando el sistema PROOVE'it está trabajando correctamente, la ventana "Current_Actual" debe registrar 30 ± 0.1 mA o $300 \text{ mA} \pm 0.1 \text{ mA}$ para las dos modalidades de la unidad de verificación. (PROOVE'it, 2010). La Figura 2.8 muestra la preparación y realización del ensayo.



a



b

Figura 2.8: Preparación y realización del ensayo ASTM. a) Preparación de la muestra. b) Realización del ensayo

2.4.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004.

La carbonatación es la reducción de la alcalinidad del hormigón por acción de los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2).

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones se basa en la determinación de la reducción de la alcalinidad que provocan las transformaciones químicas derivadas del proceso de carbonatación, la cual puede comprobarse visualmente mediante los cambios de coloración que sufre un indicador. Se utilizará como indicador una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%. Así para preparar 100 cm^3 de disolución de indicador, se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm^3 de alcohol etílico del 99 por 100 de pureza y se adicionan después 30 cm^3 de agua destilada.

La fenolftaleína toma un color rojo- púrpura para valores de pH superiores a 9.5 (hormigón no carbonatado) y se vuelve incolora en valores inferiores a 8 (hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 cm toma tonalidades entre rosa y rojo púrpura.

La disolución del indicador puede aplicarse con pulverizador, o cualquier otro medio que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la

superficie en cuestión. No deberá aplicarse cantidades excesivas de indicador o el mismo sobre superficies mojadas. Si interesa estabilizar la coloración temporalmente, puede recurrirse a cubrir la superficie, ya seca, con una resina o barniz incoloro.

Luego de la aplicación, pasado 1 o 2 minutos y antes de transcurrir 15 minutos, se efectuará la medición de la profundidad de carbonatación, es decir la longitud de la zona incolora medida desde la superficie, determinándose los valores máximos, mínimos y la media aritmética. El procedimiento no debe tardar más de 20 min. Las medidas se realizarán con una regla u otro instrumento de medición capaz de garantizar una precisión de 0,5 mm.(NC-355, 2004).



a



b

2.8 Procedimiento para la determinación de la profundidad de carbonatación.

a) Realización del ensayo b) Resultados.

2.4.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011

Se toma una probeta cilíndrica de 150 mm x 300 mm (que haya sido curada como mínimo 28 días) o un testigo de hormigón de un elemento constructivo de una edificación (extraído de acuerdo al interés del cliente), este es aserrado como una lámina delgada de hormigón o mortero de 25 mm \pm 0,5 mm de espesor tomada del centro de la probeta o del testigo y siempre garantizando que exista paralelismo

en sus caras, preacondicionada a equilibrio de humedad constante. Este equilibrio se logra con un secado a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ por aproximadamente 48 horas (hasta peso constante y posterior enfriamiento en un desecador). La superficie de succión de la muestra será la parte aserrada, esta debe estar libre de carbonatación y otras impurezas. Se recomienda cubrir previamente las áreas laterales curvas del espécimen con resina epoxi o parafina. Las probetas ya preacondicionadas se colocan sobre los extremos de unos cintillos de madera, plásticos finos o de cualquier otro material (como se muestra en la Figura 1), dentro de un recipiente estanco que contenga una altura de agua por encima de los cintillos de aproximadamente 5 mm. Para mantener el nivel del agua en el recipiente se llena una probeta de agua y se coloca en posición invertida a 5 mm, de manera tal que la misma quede introducida en el agua, tal como se muestra en la Figura 2.9,

Para la realización de este ensayo se empleará agua potable.(NC-345, 2011).



Figura 2.9 Esquema de bandejas con el ensayo de absorción y la probeta invertida para garantizar una altura constante de agua en la bandeja

Las probetas son pesadas antes de ser colocadas en el agua y se volverán a pesar a las edades de (1/12; 1/6; 1/4; 1/2; 1; 2; 3; 4; 6; 24; 48; 72; 96) horas contadas a partir de que comienza el ensayo o su contacto con el agua, estas pesadas se

realizan cada 24 horas a partir de las 96 horas hasta que el peso de las mismas sea aproximadamente constante o que el agua ascienda por la capilaridad de la probeta hasta su superficie. Antes de cada pesada se debe secar con un paño (húmedo, limpio, libre de grasas y suciedades) el agua superficial. Este ensayo se debe realizar a temperatura de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y humedad relativa de $65\% \pm 5\%$. (NC-345, 2011)

2.6 Resultados obtenidos

2.6.1 Método de Torrent

Los resultados del ensayo de permeabilidad al aire por el método de Torrent se recogen en la tabla 2.6.1 tanto para los especímenes con LC3 como para los de CPO.

Tabla 2.6.1: Resultados del ensayo de permeabilidad al aire.

Probeta	KT	humedades			bromedio	L(mm)	Temp.
H1 LC3	0.058	4.1	4.3	4.1	4.2	17	23
H1 CP	0.072	3.7	3.7	3.5	3.6	29	26
H2 LC3	0.61	4	3.9	4.1	4.0	38	24
H2 CP	0.17	3.6	3.9	3.8	3.8	30	27
H4 LC3	0.38	3.9	4.1	4	4.0	35	32
H4 CP	0.018	3.3	3.4	3.6	3.4	19	30

2.6.2 Resistividad eléctrica

Los resultados del ensayo de resistividad eléctrica se recogen en la tabla 2.6.2 tanto para los especímenes con LC3 como para los de CPO.

Tabla 2.6.2: Resultados del ensayo de resistividad eléctrica.

probeta	temp.	mediciones de la serie de 2 años				promedio de las mediciones
		1ra	2da	3ra	4ta	
H1 LC3	21	710	621	646	705	670.5
H1 CP	21	36.5	37.7	40.2	36	37.6

H2 LC3	21	544	623	617	571	588.75
H2 CP	21	36.3	36.2	36.3	36.3	36.3
H4 LC3	21	196.2	215	224	211	211.6
H4 CP	21	16.3	12.9	14.4	15.2	14.7

2.6.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.

Los resultados del ensayo de resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202 se recogen en la tabla 2.6.3 tanto para los especímenes con LC3 como para los de CPO.

Tabla 2.6.3: Resultados del ensayo de resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.

Especímenes	H1 CP	H1 LC3	H2 CP	H2 LC3	H4 CP	H4 LC3
Voltage (V)	60	60	60	60	60.0	60
Corriente (mA)	196.3	11.2	143.9	9	243.0	13.2
Temperatura (°C)	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
Tiempo de ensayo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.3	0.25
Pred. Coulombs	3448	216	3015	142	3060.0	146
Coulombs	3448	216	3015	142	3060.0	146
Permeabilidad	Mod.	V.Low	Low	V.Low	High	V.Low

2.6.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004.

Los resultados del ensayo de carbonatación según la NC 355: 2004 se recogen en la tabla 2.6.4 tanto para los especímenes con LC3 como para los de CPO.

Tabla 2.6.4: Resultados del ensayo de carbonatación.

	Puntos						
muestras	1	2	3	4	5	6	Promedio
H1 LC3	0.30	0.70	0.40	0.50	0.60	0.50	0.50
H1 CP	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H2 LC3	0.90	0.90	0.90	1.00	1.00	1.00	0.95
H2 CP	0.40	0.30	0.20	0.30	0.70	0.30	0.37
H4 LC3	1.60	1.20	1.10	1.00	1.30	1.60	1.30
H4 CP	0.40	0.90	0.50	0.20	0.60	0.40	0.50

2.6.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011

Los resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011 se recogen en la tabla 2.6.5 y 2.6.6 tanto para los especímenes con LC3 como para los de CPO.

Tabla 2.6.5: Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

TIEMPO	H1 CP	H1LC3	H2 CP	H2 LC3	H4 CP	H4 LC3
SECO	0.5673	0.6379	0.558	0.5253	0.5263	0.5358
5 MIN	0.5713	0.6421	0.5632	0.5297	0.529	0.5397
10 MIN	0.5724	0.6432	0.5644	0.5307	0.53	0.5406
15 MIN	0.5734	0.6441	0.5657	0.5315	0.5306	0.5414
30 MIN	0.5754	0.6457	0.568	0.5333	0.5317	0.5432
1 H	0.5783	0.6481	0.5709	0.5357	0.5329	0.5456
2 H	0.5823	0.6509	0.5742	0.5392	0.5343	0.5491
3 H	0.5857	0.6527	0.5756	0.5412	0.5349	0.5514
4 H	0.5879	0.6548	0.5776	0.5439	0.5368	0.554
6 H	0.5922	0.6573	0.5798	0.547	0.5383	0.5578
1 D	0.6001	0.6689	0.588	0.561	0.5448	0.5738
2 D	0.606	0.6736	0.5901	0.5629	0.5459	0.5759
3 D	0.608	0.6745	0.5908	0.563	0.5459	0.5761
4 D	0.608	0.6745	0.5908	0.563	0.5459	0.5761

Tabla 2.6.6: Resultados del ensayo de absorción de agua por capilaridad.

Tipo de mezclas	Dens. (Kg/m ³)	Porosidad Efectiva (%)
H1 CP	2407.69	12.84
H1 LC3	2707.33	12.80
H2 CP	2368.22	12.38
H2 LC3	2229.44	15.10
H4 CP	2233.68	7.82
H4 LC3	2274.00	16.10

Conclusiones Parciales Capitulo 2

-Los sitios de exposición a los que fueron expuestos los hormigones de esta investigación nos permiten realizar ensayos a largo y mediano plazo para evaluar, según la NC 120:2014, la durabilidad de hormigones.

-Para la evaluación de la durabilidad de los hormigones objeto de estudio es necesario llevar a cabo un correcto procedimiento para la extracción de testigos.

-Los métodos utilizados para realizar los diferentes ensayos de esta investigación son: Método de Torrent, resistividad eléctrica, resistencia a la penetración del ion cloruro, absorción de agua según la NC 345 y carbonatación.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se establecen los resultados de las comparaciones para los ensayos de durabilidad realizados a las series extraídas a los 6 meses, 1.5 años y 2 años. El objetivo perseguido es poder analizar el cambio que experimentan los hormigones expuestos en los diferentes grados de agresividad a medida que se incrementa el tiempo de exposición.

3.1 Método Torrent

En la figura 3.1 se muestran los resultados de permeabilidad al aire de la serie 2 años, esta refleja que a esta edad, los hormigones elaborados con LC3 son más permeables que los elaborados con CPO a excepción de los expuestos a un ambiente de agresividad muy alta (H1 LC3). En este caso los especímenes de LC3 mostraron valores de 0.058 de kt mientras que los elaborados con CPO ofrecieron valores de kt de 0.071 pudiéndose comprobar que el paso del tiempo tiene una influencia positiva para los hormigones elaborados con LC3 expuestos en ambientes de agresividad muy alta en comparación con los elaborados con CPO.

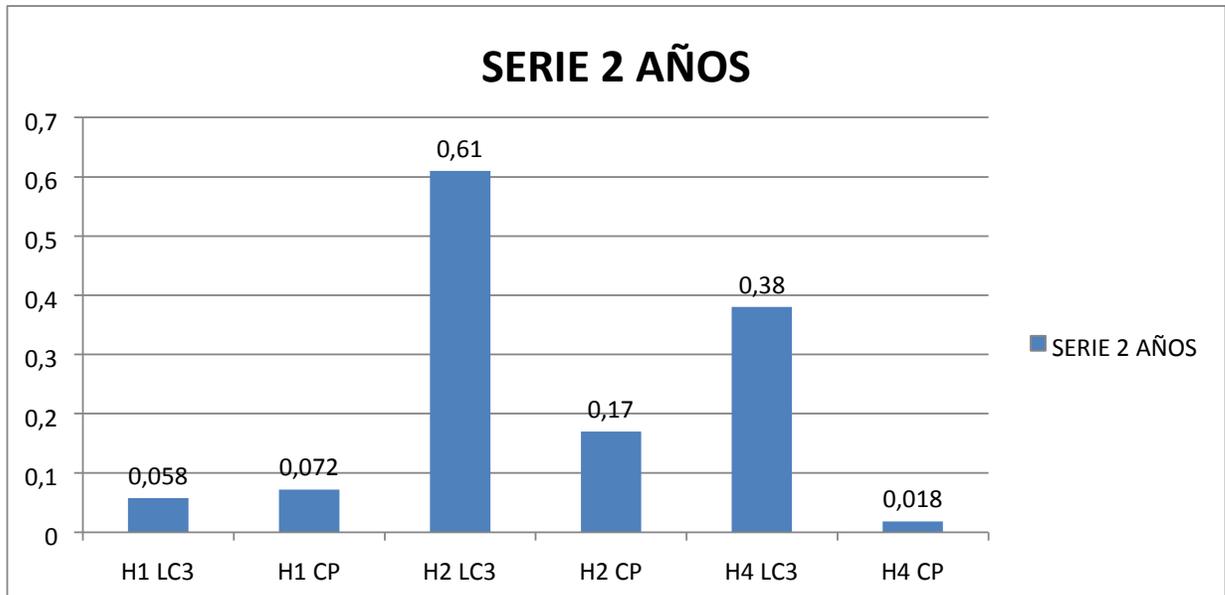


Figura. 3.1 Resultados de permeabilidad al aire (Serie 2 años) Elaborado por el autor.

3.1.1 Comparación de resultados entre la serie 2 años, serie 1.5 años y serie 6 meses

En la figura 3.2 se puede apreciar que los especímenes de la serie 2 años muestran mejor comportamiento que los de la serie 1.5 años y 6 meses, a diferencia de los hormigones de las series H2 CP, H1 LC3 y H4 LC3 estos últimos con irrelevantes diferencias.

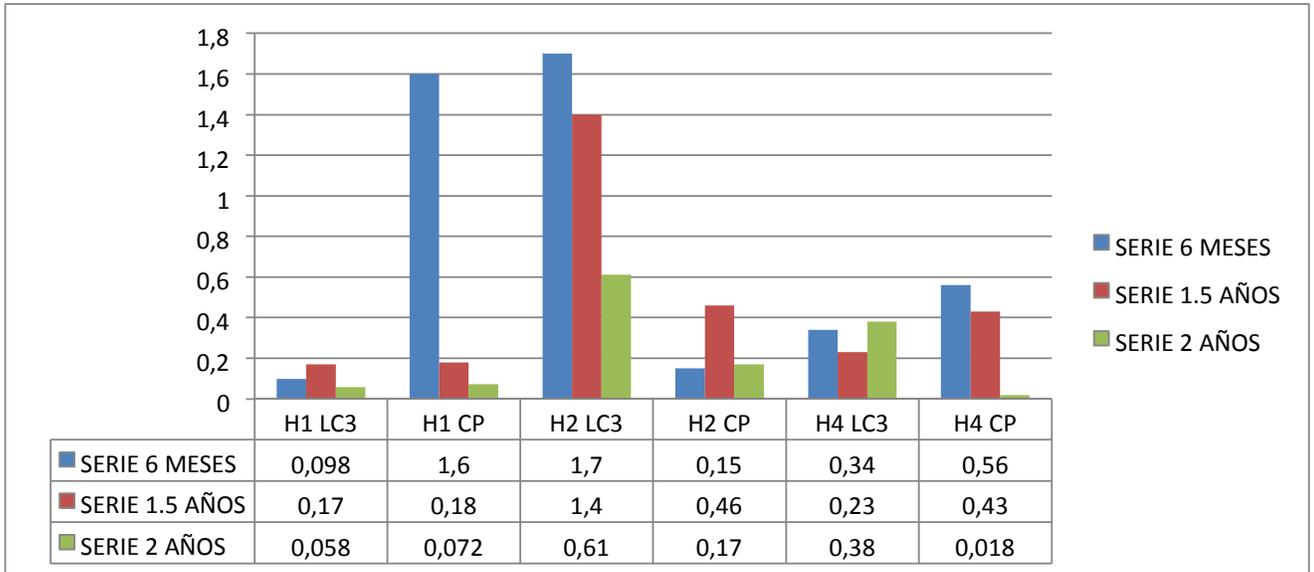


Figura. 3. 2 Comparación de resultados de permeabilidad al aire (Serie 2 años, 1.5 años y la serie 6 meses) Elaborado por el autor.

Para niveles de agresividad muy alta y alta los hormigones elaborados con LC3 muestran un mejor comportamiento a medida que pasa el tiempo, ya que los mejores valores de kt se obtienen para 2 años en dichas condiciones. En el caso de agresividad baja la permeabilidad a los dos años de estudio se incrementa en comparación con las edades estudiadas anteriormente, hasta 1.5 años los hormigones en condiciones de agresividad baja muestran resultados de permeabilidad inferiores de CPO, en el caso de 2 años se observa un incremento de la permeabilidad.

Los hormigones con CPO disminuyen la permeabilidad para todas las condiciones de agresividad a medida que el tiempo avanza.

3.2 Resistividad Eléctrica

La figura 3.3 demuestra que los hormigones elaborados con cemento LC3 evaluados a 2 años tienen mayor resistividad eléctrica con respecto a los elaborados con CPO a esta misma edad, además también deja ver que la resistividad disminuye según disminuye la agresividad del medio en que se encuentra el hormigón. Los hormigones con LC3 han mostrado mejor

comportamiento en condiciones de agresividad muy alta y alta, se observan diferencias significativas siendo el LC3 superior 632.9 al cemento portland.

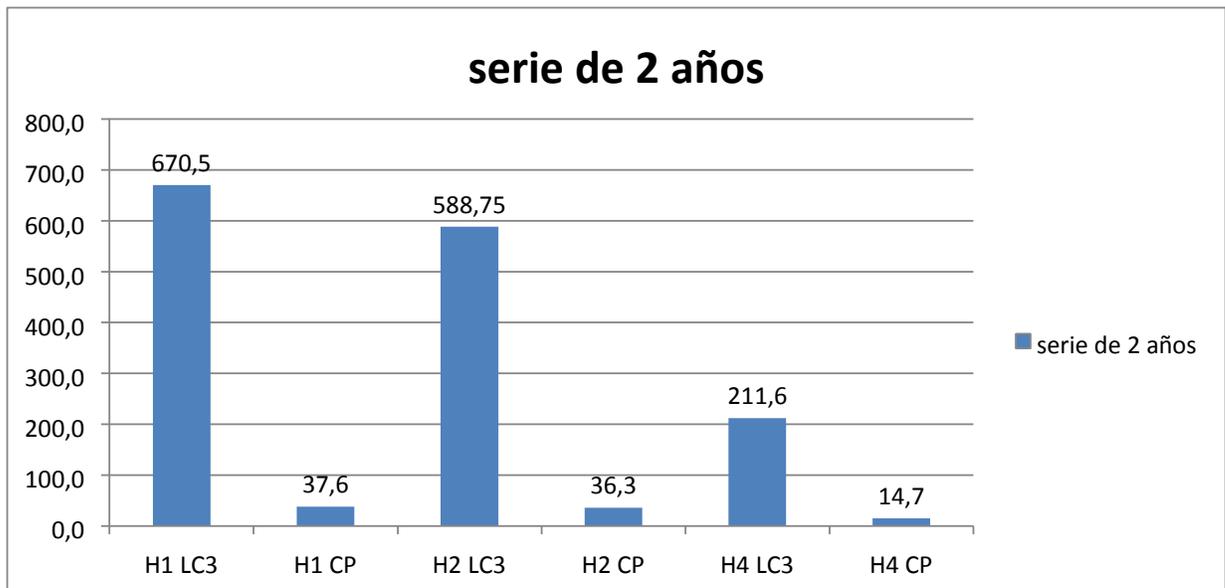


Fig. 3.3 Resultados de resistividad (Probetas de la serie 2 años) Elaborado por el autor.

3.2.1 Comparación de resultados entre la serie 2 años, 1.5 años y 6 meses

Como muestra la figura 3.4 los hormigones con LC3 aumentan considerablemente su resistividad eléctrica con el paso del tiempo. En el caso de los hormigones elaborados con CPO no se observa aumento notable en la resistividad eléctrica.

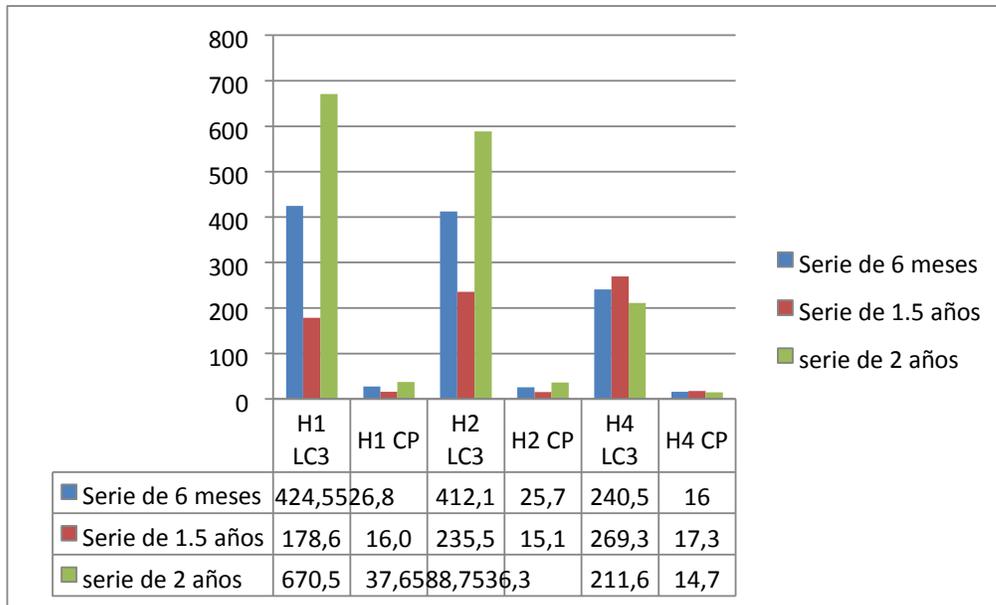


Figura. 3.4 Comparación de resultados de resistividad (serie 2 años, 1.5 años y 6 meses) Elaborado por el autor.

Las comparaciones anteriores permiten afirmar que el paso del tiempo tiene una influencia positiva en la resistividad eléctrica de los hormigones elaborados con LC3, en los fabricados con CPO esta propiedad no experimenta variaciones significativas en cuanto a estos resultados (serie 6 meses a serie 1.5 años y 2 años), además, los hormigones elaborados con LC3 mostraron ser en un rango de 14 a 18 veces mejor en cuanto a su comportamiento a la resistividad que los elaborados con cemento Portland.

3.3 Resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM C 1202.

La figura 3.5 muestra que los hormigones producidos con LC3 presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro que los elaborados con CPO en un rango de 16 a 22 veces. Las muestras de LC3 presentan una permeabilidad al ion cloruro muy baja según la tabla 2.4 del capítulo 2, mientras que para las muestras de CPO es moderada.

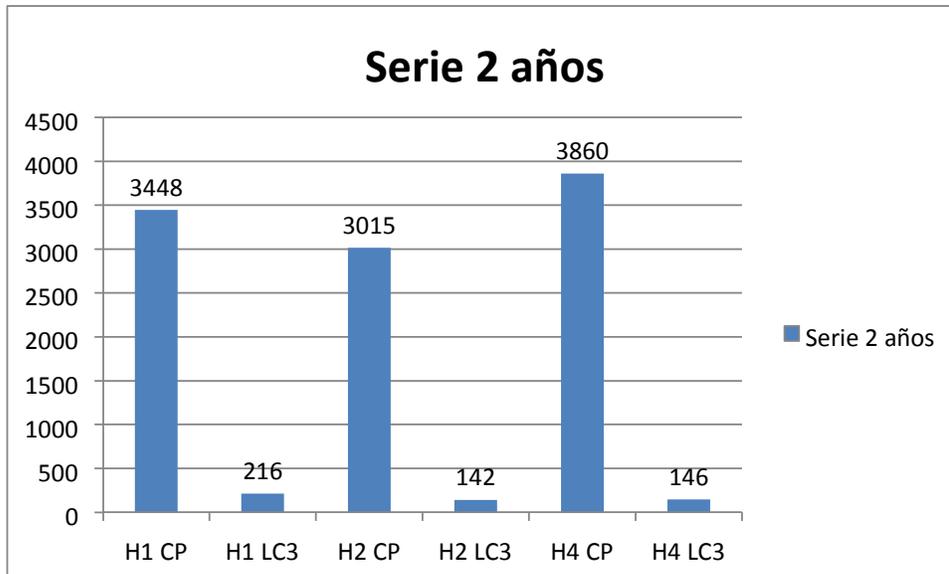


Figura. 3.5 Resultados de resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM 1202 (serie 1.5) Elaborado por el autor.

3.3.2 Comparación de resultados entre las series 1.5 años con la serie 6 meses.

La figura 3.6 demuestra que en la serie 2 años disminuye la permeabilidad al ion cloruro de los hormigones elaborados con LC3 respecto a la serie 1.5 años y 6 meses. En los hormigones fabricados con cemento Portland solamente se observa mejoras de 431 Coulomb en la permeabilidad al ion cloruro para las muestras de H4.

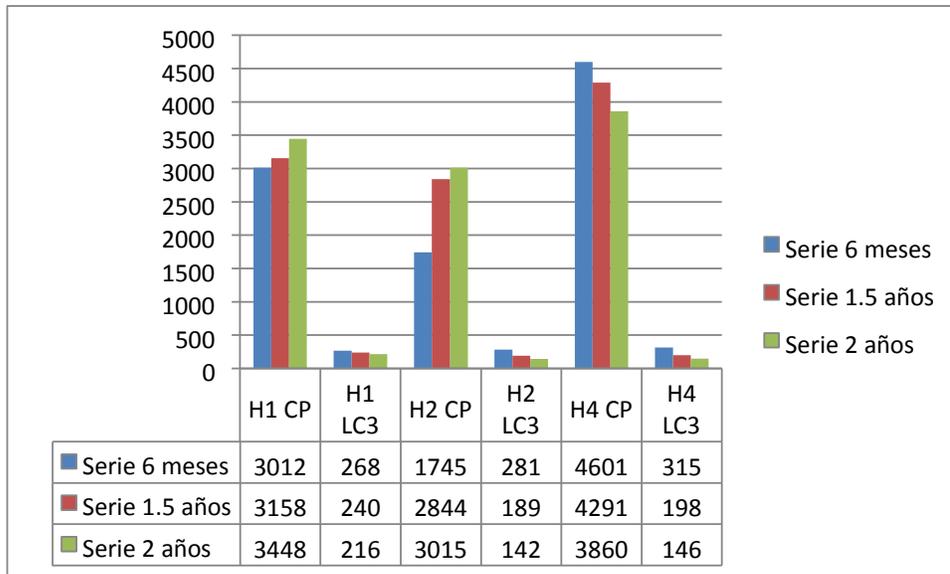


Figura. 3.6 Comparación de resultados de resistencia a la penetración del ion cloruro por la norma ASTM 1202 (serie 2 años, 1.5 años y serie 6 meses) Elaborado por el autor.

Con el paso del tiempo disminuye la permeabilidad al ion cloruro de los hormigones que utilizaron LC3 para su elaboración pues la serie 2 años presenta los valores más bajos para la evaluación de este parámetro. Los hormigones producidos con LC3 son más resistentes a la penetración del ion cloruro que los elaborados con CPO en un rango de 16 a 26 veces.

3.4 Determinación de la profundidad de carbonatación según la NC 355: 2004.

Los especímenes de LC3 presentan valores de carbonatación más altos que los de CPO y para ambos, los niveles de carbonatación aumentan según disminuye el nivel de agresividad del medio como se muestra en la figura 3.7. Este comportamiento anómalo se debe a que al colocar los hormigones fabricados con ambos tipos de cementos en una zona marina tropical, donde se manifiesta el efecto del intercambio de las mareas la humedad relativa del medio ambiente resulta generalmente elevada, por encima del 80 % gran parte del año(Licor

Cebey, 2016), lo que provoca la saturación de los poros del hormigón, factor que dificulta la difusión del CO₂ en el interior de la estructura de hormigón, lo cual logra una menor agresividad del fenómeno de la carbonatación en los hormigones(Becker, 2003), respecto a otro tipo de ambientes. Además, los elementos elaborados con cementos ternarios resultan más sensibles a la carbonatación que los producidos con Cementos Pórtland Ordinarios (CPO), debido al efecto de la sustitución de Clinker con la consiguiente reducción de la alcalinidad.

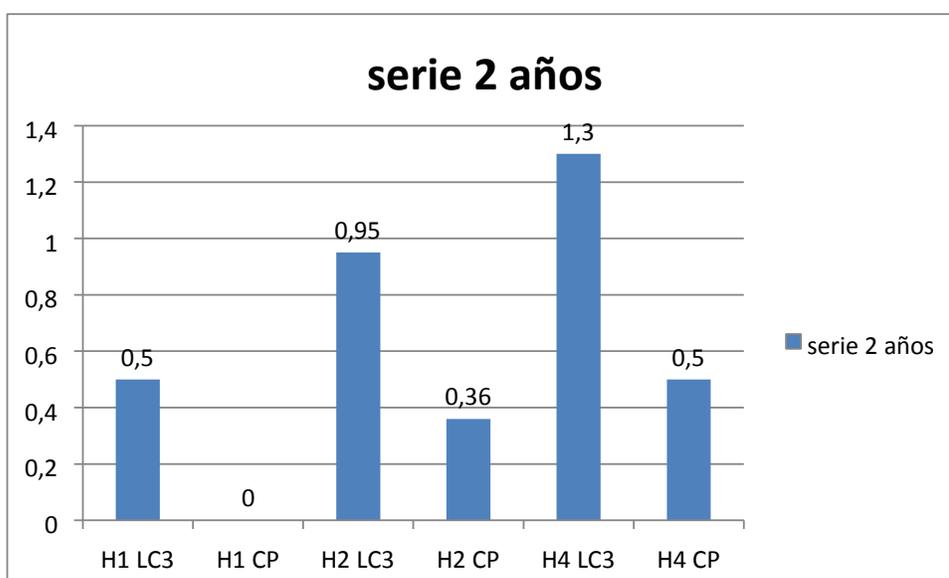


Figura. 3.7 Resultados de carbonatación (serie 2 años). Elaborado por el autor.

3.4.1 Comparación de resultados de carbonatación ente la serie 1.5 años y 6 meses

La figura 3.8 revela que en la serie 2 años hay una mayor profundidad de carbonatación que en la serie 1.5 años y 6 meses, tanto para especímenes elaborados con cemento LC3 como para los fabricados con cemento Portland, esto se justifica por el mayor tiempo de exposición al medio.

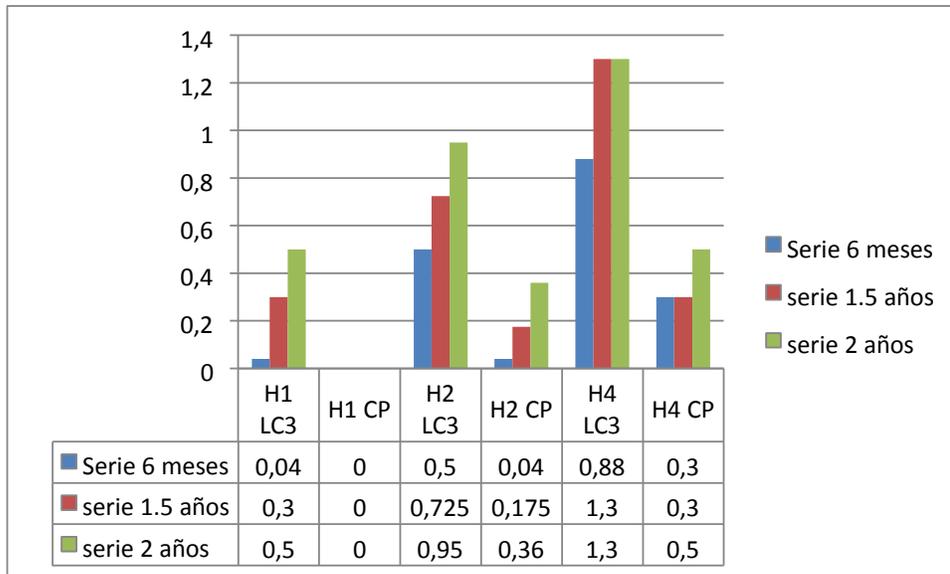


Figura. 3.8 Comparación de resultados de profundidad de carbonatación (serie 2 años, 1.5 años y serie 6 meses) Elaborado por el autor.

3.5 Absorción de agua por capilaridad según NC 345-2011

En la figura 3.9 se muestran los resultados de porosidad efectiva de la serie 2 años, esta refleja que los hormigones elaborados con LC3 tienen un mayor % de poros capilares intercomunicados que los elaborados con CPO por lo que presentan mayor % de absorción que los elaborados con CPO, siendo los de la serie H4 LC3 los más permeables por tanto presentan mayor riesgo a la entrada de agentes nocivos.

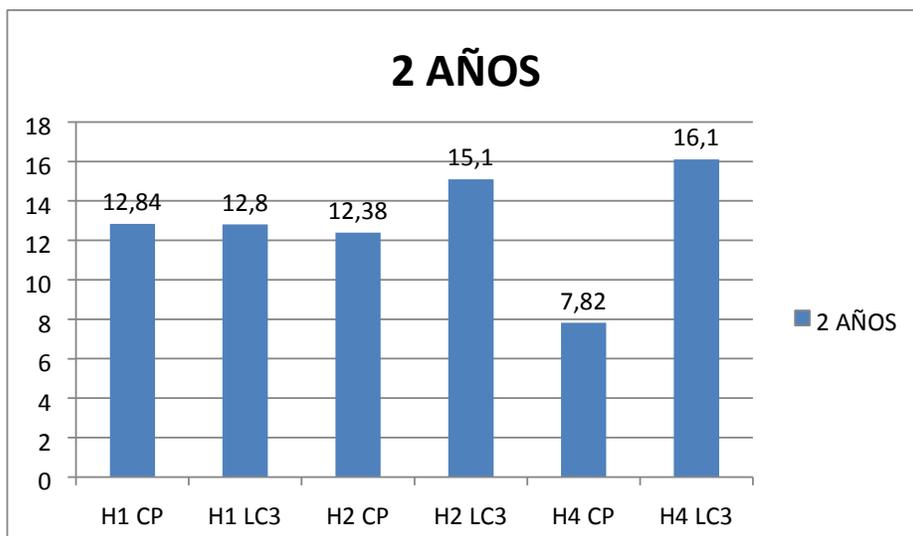


Figura. 3.9 Resultados de porosidad efectiva (serie 2 años). Elaborado por el autor.

3.5.1 Comparación de resultados de absorción de agua ente la serie 2 años y 1.5 años

La figura 3.10 muestra un aumento de la porosidad efectiva de todos los especímenes de la serie 2 años respecto a la serie 1.5 años.

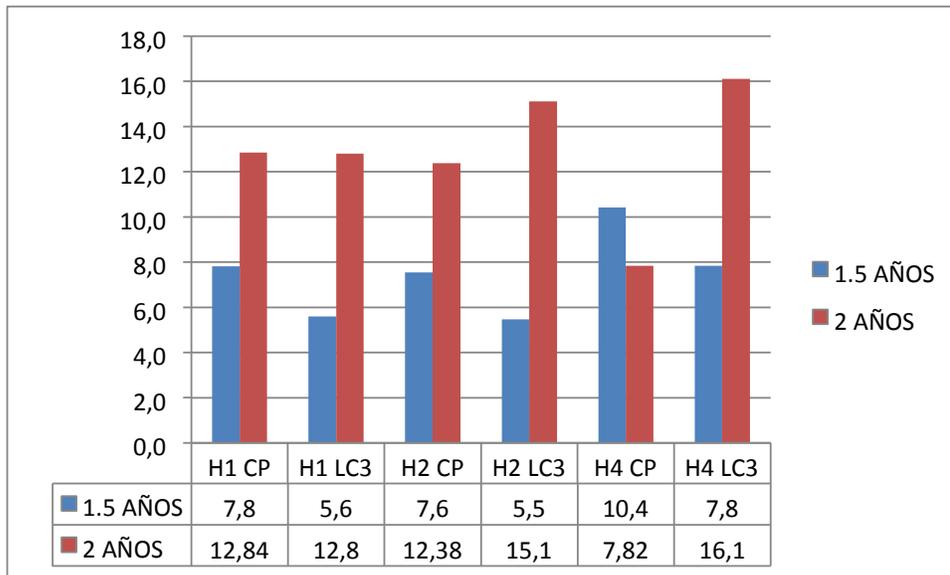


Figura. 3.10 Comparación de resultados de porosidad efectiva (serie 1.5 y data 0) Elaborado por el autor.

Conclusiones Parciales Capítulo 3

-Los hormigones elaborados con LC3 pueden emplearse en cada una de las condiciones de agresividad que establece la Norma Cubana 120 :2014.

-Los especímenes elaborados con LC3 presentan valores de carbonatación más altos que los de CPO y son más permeables que estos, a excepción de los expuestos a un ambiente de agresividad muy alta.

-Los hormigones elaborados con cemento LC3 tienen mayor resistividad eléctrica y presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro en un rango de 16 a 22 veces con respecto a los elaborados con CPO.

-El paso del tiempo influye de forma más favorable en los hormigones elaborados con LC3 que en los elaborados con CPO, pues la serie 2 años muestra mejores resultados de permeabilidad al aire, resistividad eléctrica y penetración al ion cloruro.

CONCLUSIONES GENERALES.

-La durabilidad del hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta.

-Los sitios de exposición a los que fueron expuestos los hormigones de esta investigación nos permiten realizar ensayos a largo y mediano plazo para evaluar, según la NC 120:2014, la durabilidad de hormigones.

-Los especímenes elaborados con LC3 presentan valores de carbonatación más altos que los de CPO y son más permeables que estos, a excepción de los expuestos a un ambiente de agresividad muy alta.

- Los hormigones elaborados con cemento LC3 presentan mayor resistencia a la penetración del ion cloruro en un rango de 16 a 22 veces con respecto a los elaborados con CPO.

-El paso del tiempo influye de forma más favorable en los hormigones elaborados con LC3 que en los elaborados con CPO, pues la serie 2 años muestra mejores resultados de permeabilidad al aire, resistividad eléctrica y penetración al ion cloruro, según la NC 120: 2014.

Recomendaciones

-Se recomienda trabajar una nueva data utilizando otras adiciones minerales como puede ser el humo de sílice y otras adiciones minerales activas basadas en el uso de arcillas calcinadas.

-Presentar los resultados alcanzados en el STN 37 Hormigón Hidráulico. Especificaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A., V. 2017.

ACI 2002. Guide for the design and construction externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures.

AGENCY 2013. Materiales cementicios de baja energia.

ANONIMO 2017. Cemento y Hormigon.

BETANCOURT 2014. Fases del CPO.

COLLEPARDI, M. 2014. Ordinary and long term durability of reinforced concrete structures.

CONTRERAS, Y. A. 2015. Cemento de bajo carbono LC3 producido en condiciones de pequeña escala, para la fabricacion de bloques huecos de hormigon hidraulico y hormigones de hasta 20MPa.

ECURED 2017a. Carbonatacion.

ECURED 2017b. Conoce los aridos.

FRANCO, O. L. 2015. Materiales y productos para la construcción.

GONZÁLEZ, A. J. B. 2018. Evaluación de hormigones producidos con cemento de bajo carbono (LC3) desde la perspectiva de la NC

GONZALEZ, B. Y. R. 2017. Evaluacion de hormigones producidos con cementos de bajo carbono desde la perspectiva de la NC:120:2014.

ICHASO, A. 2014. La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón-Parte II. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

LABRADA, J. E. N. 2014. Diseño y produccion industrial con cemento de bajo carbono producido en prueba industrial.

LICOR, A. 2016. Evaluacion de la carbonatacion en hormigones elaborados con LC3.

LICOR CEBEY, A. 2016. Evaluación de la carbonatación en hormigones elaborados con cemento de bajo carbono LC3. Universidad Central "Marta

- Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
- MARTIRENA, F. N.D. LC3: de chocolate y Ron
- NAZCO 2014. Variability in glutenin subunit composition of Mediterranean durum wheat genoplasm and its relationship with gluten strength.
- NC-120 2014. Hormigón hidráulico — especificaciones, Cuba.
- NC-345 2011. Hormigón endurecido — determinación de la absorción de agua por capilaridad, Cuba. .
- NC-355 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio, Cuba.
- PROCEQ 2015. Manual de ensayos no destructivos de durabilidad en hormigones.
- PROOVE’IT 2010. Prueba Rápida de Permeabilidad de Cloruros
- SÁNCHEZ, M. & ANTONIO, E. 2016. Diseño y fabricación de hormigones hidráulicos con un cemento de bajo carbono LC3 con arcillas del yacimiento El Yigre. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.
- TORRENT, R. 2015. Durabilidad: Definición y Aspectos Generales.
- TRAVERSA, L. P. & VILLAGRÁN ZACCARDI, Y. A. 2010. Introducción a la durabilidad y patología de las estructuras de hormigón armado.
- VIZCAÍNO 2014. Cementos de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clinker-arcilla calcinada-caliza.
- YUGOVICH, P. G. 2012. Vida Útil de las estructuras. Donde estamos y hacia donde vamos.

