

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas
Facultad de Construcciones
Departamento de Ingeniería Civil



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con cemento de bajo carbono (LC³)

Autor: José Fernando Paz Montes de Oca

Tutores: Ing. Dayrán Rocha Francisco

MSc. Lic. Ernesto Díaz Caballero

Consultantes: Dr. Ing. Raúl González López

Ing. Liset León Consuegra

Santa Clara
Curso: 2015 – 2016



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Civil, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Tutor

**Firma del Jefe de
Departamento**

**Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica**

Pensamiento

“Nadie está a salvo de las derrotas. Pero es mejor perder algunos combates en la lucha por nuestros sueños, que ser derrotado sin saber siquiera por qué se está luchando.”

Paulo Coelho

Dedicatoria

**A mis padres, por su dedicación y apoyo incondicional,
sin ustedes no hubiera podido llegar hasta aquí.**

Agradecimientos

A mis padres, Fernan y Baby, por el cariño y amor que siempre me han demostrado (a pesar de mis resabios)

A mi abuela Dolores, que siempre se aseguró que no me callera un aguacero en el viaje a la universidad, un beso grande

A mi abuela Teresa, otro beso grande

A Liset, por su tiempo y consejos que fueron definitivos en la realización de este trabajo

A Raúl, que siempre estuvo dispuesto a brindarme su ayuda y conocimientos, que fueron definitivos en la realización de esta tesis

A mis tutores Dairán y Ernesto, gracias por su ayuda durante todo el tiempo de realización de la tesis

A mis amigos del 204: Yunior, Adrián, Javier, Sandy, Albertico, Yandry, Luis Daniel que fueron una familia estos cinco años

A todas las personas que de una forma u otra influyeron a que llegara hasta aquí

Muchas gracias!!!

Resumen

El hormigón es un material artificial de origen pétreo, una de sus principales características es la presencia en él de dos estados disímiles con propiedades diferentes en cada uno: inicialmente un estado plástico fluido que le permite adaptarse con facilidad a las diferentes formas de los moldes en que se vierte y luego de endurecido, un estado sólido en el que se modifican sus propiedades iniciales.

La permeabilidad del hormigón está asociada principalmente a la permeabilidad del mortero y la pasta de cemento endurecida, cuyas propiedades influyen en su durabilidad, ya que por los poros (conectados) permeables son capaces de permitir el paso de sustancias, mediante distintos fenómenos.

Entre los factores que afectan la permeabilidad del concreto está el contenido y tipo de cemento utilizado. La producción mundial de cemento es la responsable, a nivel mundial, de altos niveles de contaminación y posee un alto costo de producción debido a su elevado consumo energético.

Con el objetivo de mitigar estos actores se han desarrollado estrategias como la implementación de un nuevo tipo de cemento de bajo contenido de carbono (LC³), con el cual se logra sustituir hasta un 50 % del clínquer Pórtland.

Para evaluar la variación de la permeabilidad al aire de hormigones fabricados con un cemento de bajo carbono (LC³), se midió la permeabilidad al aire, por el método de Torrent, de muestras de dichos hormigones sometidas a diferentes niveles de agresividad. Los hormigones fueron elaborados con el aglomerante ternario SIG-B45 (LC³) de Siguaney y el Cemento Pórtland Ordinario P-35, de Cienfuegos. Se utilizó el método experimental para la evaluación del comportamiento de la permeabilidad al aire, lo cual permitirá llevar a cabo el diseño de hormigones más durables.

Resumen

Al realizar los ensayos pertinentes, se comprueba que el LC³, muestra un comportamiento más impermeable que las muestras patrones fabricadas con Pórtland

Abstract

Concrete is an artificial material, one of its main features is the presence in it of two dissimilar states with different properties in each initially a plastic fluid state that allows it to adapt easily to different forms of the molds which is poured and then hardened, solid state in which their initial properties are modified.

Concrete permeability is mainly associated with the permeability of the mortar and the hardened cement paste, whose properties affect its durability, since the pores (connected) permeable are able to allow the passage of substance there through by various phenomena.

Among the factors affecting the permeability of concrete is the content and type of cement used. World production of cement is responsible, globally, high levels of pollution and has a high production cost due to their high energy consumption.

In order to mitigate these actors have developed strategies and the implementation of a new type of cement low carbon content (LC³), with which it is able to replace up to 50% of Portland clinker.

With the objective of evaluating the variation in air permeability of concrete made with cement low carbon (LC³) which were subjected to different regimes of aggressiveness, air permeability is measured by the method of Torrent, samples concrete subjected to different levels of aggressiveness. The concretes were made with the ternary binder SIG-B45 (LC³) of Siguaney and Ordinary Portland Cement P-35, Cienfuegos. The experimental method for evaluating the performance of air permeability was used, which will carry out the design of more durable concrete.

It is found that the LC³, shows a more impermeable behavior patterns that samples produced with Portland

Tabla de contenidos

Pensamiento	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Abstract	VI
Tabla de contenidos	VII
Lista de tablas	X
Lista de figuras	XI
Glosario de términos y abreviaturas	XIII
Introducción	1
Capítulo I: Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos	7
1.1 Hormigones hidráulicos. Generalidades	7
1.1.1 Principales constituyentes cementantes del hormigón.....	8
1.2 Cemento Pórtland y cementos con adiciones minerales activas.....	8
1.2.1 Cementos ternarios clínquer-arcillas calcinadas-calizas	10
1.2.2 Experiencia preliminar de la producción del LC ³ en Asia y en Cuba	12
1.3 Durabilidad del hormigón en ambientes marinos tropicales.....	13
1.4 Principales factores que afectan la permeabilidad del hormigón	14
1.4.1 Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón	15
1.4.2 Tipo y contenido de cemento utilizado.....	16
1.4.3 Relación agua cemento (a/c).....	16
1.4.4 Régimen de curado del hormigón.....	17
1.4.5 Edad y resistencia del hormigón	17
1.4.6 Contenido de humedad y temperatura	18
1.5 Mecanismos de transporte en el hormigón.....	22
1.6 Estructura de la matriz de poros	23
1.7 Diferencia entre la capa superficial y la masa interna del hormigón.....	25
1.8 Influencia del espesor de recubrimiento sobre la vida útil del hormigón	26
1.9 Sorptividad de los hormigones hidráulicos	27
1.10 Migración de cloruros	27

Tabla de contenidos

1.11 Carbonatación	28
1.12 Resistividad eléctrica.....	29
1.13 Permeabilidad como indicador de durabilidad.....	31
1.13.1 Evaluación de la permeabilidad al aire del hormigón.....	32
1.13.2 Métodos y técnicas de evaluación de la permeabilidad	32
1.13.2.1 Método Cembureau	33
1.13.2.2 Sistema de Permeabilidad Autoclave.....	35
1.13.2.3 Método Hong-Parrot.....	36
1.13.2.4 Método del Índice de Permeabilidad al Oxígeno.....	37
1.13.2.5 Método Torrent.....	39
1.14 Conclusiones Parciales	41
Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica	42
2.1 Introducción	42
2.2 Diseño experimental de las mezclas de hormigón para los especímenes.	42
2.3 Especímenes fabricados en la EPI, Villa Clara	43
2.3.1 Caracterización de los materiales componentes de las mezclas de hormigón a emplear en la EPI.....	43
2.3.1.1 Cementos.....	43
2.3.1.2 Áridos.....	45
2.3.1.3 Granulometría de los áridos.....	46
2.3.1.4 Agua de amasado	46
2.3.1.5 Aditivo.....	47
2.3.2 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones de la EPI.	48
2.4 Especímenes fabricados en el CIDC, La Habana.....	50
2.4.1 Caracterización de los materiales componentes de las mezclas del hormigón fabricado en el CIDC.....	50
2.4.1.1 Cementos.....	51
2.4.1.2 Áridos.....	51
2.4.1.3 Granulometría de los áridos.....	51
2.4.1.4 Agua de Amasado.....	52
2.4.1.5 Aditivos.....	52
2.4.2 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigón del CIDC.....	53

Tabla de contenidos

2.5 Ensayos y procedimientos.....	54
2.5.1 Extracción y preparación de los especímenes de hormigón.....	54
2.5.2 Medición de la permeabilidad por el método de Torrent.	55
2.5.2.1 Preparación de los testigos	56
2.5.2.2 Descripción del método	56
2.5.3 Medición de la resistividad eléctrica a los testigos de hormigón.	58
2.5.3.1 Preparación de los testigos	58
2.5.3.2 Descripción del ensayo.....	58
2.6 Resultados obtenidos.....	60
2.6.1 Permeabilidad al aire. Método de Torrent.	60
2.6.2 Ensayo de resistividad.	64
2.7 Conclusiones Parciales	65
Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³	67
3.1 Introducción	67
3.2 Análisis de los resultados de los hormigones producidos en la EPI, Villa Clara	67
3.2.1 Análisis de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones elaborados con LC ³ en la EPI, Villa Clara, en el período 2015-2016.....	67
3.2.2 Comportamiento de la permeabilidad al aire <i>versus</i> resistividad eléctrica superficial en hormigones de Villa Clara	70
3.2.3 Análisis de la permeabilidad al aire <i>versus</i> carbonatación de los especímenes de la EPI de Villa Clara.....	71
3.3 Análisis de los resultados de los hormigones producidos en el CIDC, La Habana	72
3.3.1 Análisis de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones elaborados en el CIDC, La Habana, en el período 2015-2016.....	72
3.3.2 Análisis de la permeabilidad al aire <i>versus</i> carbonatación de los especímenes del CIDC de La Habana.....	74
3.4 Conclusiones parciales	76
Conclusiones generales.....	78
Recomendaciones	79
Referencias bibliográficas	80

Lista de tablas

Tabla 2.1: Análisis químico del cementos SIG-B45.....	44
Tabla 2.2: Características físico-mecánicas de los cementos.....	44
Tabla 2.3: Características físico-mecánicas de los áridos gruesos (EPI).....	45
Tabla 2.4: Características físico-mecánicas de los áridos finos (EPI).....	46
Tabla 2.5: Granulometría de los áridos (EPI).....	47
Tabla 2.6: Características del aditivo Dynamon SX-32.....	48
Tabla 2.7: Dosificaciones empleadas en la elaboración de los hormigones (EPI).....	49
Tabla 2.8: Dosificaciones implementadas en elementos de la EPI, Villa Clara.....	50
Tabla 2.9: Características físico-mecánicas de los áridos (CIDC).....	51
Tabla 2.10: Granulometría de los áridos (CIDC).....	52
Tabla 2.11: Características del aditivo GENIOTEC SF/20.....	53
Tabla 2.12: Dosificación utilizada en las mezclas de hormigón (CIDC).....	53
Tabla 2.13: Especificaciones de los testigos extraídos del sitio de exposición de Cayo Santa María.....	55
Tabla 2.14: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT.....	57
Tabla 2.15: Estimación de la velocidad y probabilidad de corrosión.....	60
Tabla 2.16: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de Cayo Santa María. Método de Torrent.....	60
Tabla 2.17: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 0 días de curado. Método de Torrent.....	61
Tabla 2.18: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 3 días de curado. Método de Torrent.....	62
Tabla 2.19: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 28 días de curado. Método de Torrent.....	63
Tabla 2.20: Resultados de los ensayos de resistividad eléctrica superficial de las muestras de Cayo Santa María.....	65
Tabla 3.1: Profundidad de carbonatación de la muestras de Villa Clara, 2016 (Licor, 2016).....	71
Tabla 3.2: Profundidad de carbonatación de la muestras del CIDC, 2016 (Licor, 2016).....	75

Lista de figuras

Figura 1.1: Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre algunos procesos de deterioro	19
Figura 1.2: Influencia de la humedad relativa efectiva sobre el riesgo de corrosión de las armaduras	20
Figura 1.3: Influencia de la temperatura sobre el riesgo de corrosión de las armaduras	21
Figura 1.4: Estructura de poros de la pasta de cemento endurecida	24
Figura 1.5: Concepto de hormigón superficial (Recubrimiento)	25
Figura 1.6: Resipod Proceg	30
Figura 1.7: Funcionamiento del Resipod Proceg	31
Figura 1.8: Esquema de la prueba de Cembureau	34
Figura 1.9: Componentes del Sistema de Permeabilidad Autoclave	35
Figura 1.10: Esquema de la prueba de Hong-Parrot	37
Figura 1.11: Prueba del Índice de Permeabilidad al Oxígeno	38
Figura 1.12: Permeabilímetro al aire Torrent	39
Figura 2.1: Extracción de testigos	54
Figura 2.2: Testigos hermetizados	55
Figura 2.3: Esquema y detalles del "Método Torrent"	56
Figura 2.4: Medición de la permeabilidad al aire	58
Figura 2.5: Secado de los testigos	59
Figura 2.6: Medición de la resistividad eléctrica superficial	59
Figura 2.7: Valores medios de permeabilidad al aire de las muestras de Cayo Santa María. Método de Torrent.	61
Figura 2.8: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 0 días de curado. Método de Torrent.....	62
Figura 2.9: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 3 días de curado. Método de Torrent.....	63
Figura 2.10: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 28 días de curado. Método de Torrent.....	64
Figura 2.11: Promedios globales de permeabilidad al aire (CIDC).....	64
Figura 2.12: Valores medios de resistividad eléctrica superficial	65
Figura 3.1: Resultados de permeabilidad al aire de los especímenes extraídas de Cayo Santa María en el 2016.....	69
Figura 3.2: Comparación entre los niveles de permeabilidad del período 2014-2015 y 2015-2016 70	

Lista de figuras

Figura 3.3: Valores medios de resistividad de las muestras de Cayo Santa María, 2016	71
Figura 3.4: Análisis de la Permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras de Villa Clara, durante el período 2015-2016	72
Figura 3.5: Valores de permeabilidad al aire de los especímenes del CIDC, durante el período 2015-2016.....	73
Figura 3.6: Comparación de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones de la EPI del período 2014-2015 al 2015-2016.....	74
Figura 3.7: Análisis de la permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras con Pórtland de La Habana, 2015-2016.....	75
Figura 3.8: Análisis de la permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras con LC ³ de La Habana, 2015-2016	76

Glosario de términos y abreviaturas

HR	Humedad relativa
CIDC	Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción
EPI	Empresa de Producción Industrial
CIDEM	Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales
a/c	Relación agua cemento
SCH	Sílico-calzáreos-hidratados
OPC	Cemento Pórtland Ordinario
PPC	Cemento Pórtland Puzolánico
DRX	Difracción de rayos X
TG	Termo-gravimétrico

Introducción

A nivel mundial, el hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción debido a su alta resistencia a la compresión, facilidad en la preparación y transporte, buena manualidad, bajo costo y elevada durabilidad.

Según la ACI 201.2R-01, la durabilidad del hormigón de cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión y cualquier otro proceso de deterioro. Un hormigón durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente.

Existen diferentes factores que intervienen en esta propiedad del hormigón, de los cuales son ampliamente conocidos sus efectos sobre la durabilidad, algunos de ellos son: la relación agua/cemento (a/c), el proceso de curado al cual se someta el material, el tipo de cemento y agregados utilizados.

Dada la ubicación geográfica de Cuba, los principales agentes que influyen en el deterioro del hormigón son los ataques de los cloruros, sulfatos y nitratos, además de las afectaciones que provoca la carbonatación, principalmente en las zonas costeras donde aumenta la intensidad del aerosol marino, donde acelera el proceso de corrosión de las armaduras de acero de refuerzo en el hormigón provocados por la penetración de iones cloruro provenientes del mar.(Pérez, 2015)

Los hormigones relativamente permeables sufren una carbonatación más rápida y extensa que los hormigones bien compactados y curados, además, permiten la entrada de sustancias nocivas al mismo, que provocan la oxidación y posterior corrosión del acero de refuerzo.

La permeabilidad de la capa superficial del hormigón está reconocida como uno de los principales factores determinantes de la durabilidad de las estructuras de

hormigón. Muchos especialistas enfatizan la importancia de esta propiedad, así como la posibilidad de medirla de forma fiable no solo en laboratorio sino in situ (Proceq, 2007). Existen varios métodos para medir la permeabilidad al aire, entre ellos está el método de Torrent.

En Cuba se hace énfasis en mejorar la durabilidad y resistencia del hormigón teniendo en cuenta el medio geográfico y condiciones climáticas a que están sometidas las estructuras. Una de las estrategias consiste en la elaboración de hormigones con cementos con adiciones minerales activas, tales como el cemento de bajo carbono (LC³), desarrollado por el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM), Facultad de Construcciones de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, de conjunto con la Universidad Politécnica Federal de Lausana, en Suiza.

La “nueva formulación” de este tipo de cemento radica en la mezcla de arcilla calcinada y piedra caliza. La unión de los dos materiales permite que los aluminatos presentes en la arcilla calcinada, interactúen con los carbonatos de calcio de la piedra caliza en la pasta de cemento, con la mejora significativa de su comportamiento posterior en el hormigón. La utilización de la arcilla calcinada y la piedra caliza se realiza mayormente en pequeñas cantidades de hasta un 35% (De Weerd et al., 2011a). Según el CIDEM, el LC³ está compuesto por un 48% de clínquer, 30% arcilla calcinada, 15% caliza y un 7% de yeso.

La Norma Cubana 120:2014 “Hormigón hidráulico. Especificaciones”, clasifica los tipos generales de exposición relativos a la corrosión de las armaduras en función de la agresividad: muy alta, alta, media y baja. Para realizar la prueba de durabilidad del hormigón fabricado LC³, se emplea el sitio de exposición No. 1, ubicado en Punta de Matamoros, Cayo Santa María al representar niveles de agresividad muy alta propios de la costa norte del archipiélago cubano y la sala de carbonatación del CIDC en La Habana con condiciones de humedad relativa (HR) de 68% y temperatura de 25,3 °C.

Introducción

Para determinar la permeabilidad al aire de los testigos confeccionados con LC³, en un segundo estudio de durabilidad de hormigones fabricados con dicho cemento y posteriormente ubicados en los sitios de exposición No. 1 y del Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC) de La Habana, se propone como problema científico:

Problema Científico

¿En qué medida varía el comportamiento en el tiempo de la permeabilidad al aire de especímenes de hormigón elaborados con cemento de bajo carbono, colocados en diferentes niveles de agresividad?

Hipótesis

Con la utilización del cemento de bajo carbono se mejorará el comportamiento en el tiempo de la permeabilidad al aire de los hormigones sometidos a diferentes niveles de agresividad.

Campo de acción

Durabilidad de los hormigones hidráulicos.

Objeto de estudio

Permeabilidad al aire de hormigones hidráulicos fabricados con LC³.

Objetivo General

Evaluar la variación de la permeabilidad al aire en hormigones elaborados con LC³ asentados en los sitios de exposición No.1 de Cayo Santa María y el CIDC, en La Habana, Cuba, durante el período del 2015-2016.

Objetivos específicos

1. Sistematizar los principales mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire, su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos y los métodos de medición existentes.
2. Describir los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos para la medición de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica.
3. Analizar los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³.

Tarea de Investigación

1. Sistematización de los principales mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire, su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos y los métodos de medición existentes.
2. Descripción los materiales utilizados en la elaboración del hormigón sometido a diferentes regímenes de agresividad.
3. Realización de los ensayos de permeabilidad al aire y resistividad eléctrica en testigos sometidos a diferentes regímenes de agresividad.
4. Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³.

Novedad Científica

Se logra por vez primera el estudio de permeabilidad al aire de muestras de hormigón elaboradas con LC³ en el tiempo, sometidas a diferentes niveles de agresividad en Cuba.

Actualidad

Basado en el Método Torrent, ensayo no destructivo y preciso, se permite evaluar el comportamiento de la permeabilidad al aire en un hormigón, fabricado con cementos de bajo contenido de carbono y sometidos a diferentes regímenes de agresividad.

Aportes científico-técnicos

Brinda nuevos conocimientos acerca del comportamiento del LC³ respecto a la permeabilidad al aire en el transcurso de dos años, sometidos a diferentes regímenes de agresividad.

Aporte medio ambiental

La industria del cemento registra anualmente entre un 5 - 8% (Martirena Hernández, 2015) de las emisiones globales de CO₂ (la mayor parte de la cual es originada durante la descomposición de la piedra caliza, elemento esencial en la producción del clínquer). Por cada tonelada de cemento producida, se genera aproximadamente una de dióxido de carbono, un importante gas de efecto invernadero, además, posee un alto costo de producción debido a su elevado consumo energético. Al llevar a cabo una sustitución de un 45 a un 50% por ciento de clínquer, para el LC³, se disminuiría considerablemente el impacto ecológico.

Justificación de la investigación

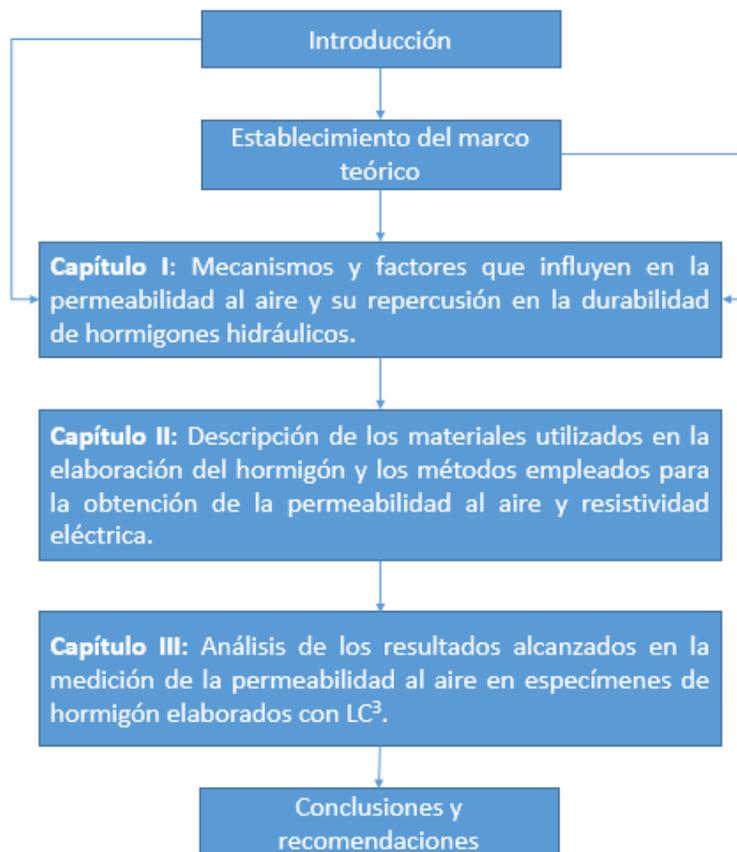
La investigación es parte fundamental del segundo año del estudio de durabilidad para la fabricación y utilización del LC³ en lo que respecta a la permeabilidad al aire de las muestras tomadas en el sitio de exposición No.1 de Cayo Santa María y muestras colocadas en el CIDC en La Habana.

Estructura del Trabajo de Diploma

- **Introducción:** Se detallan los elementos del diseño investigativo.

- **Desarrollo:** Incluye el contenido de cada capítulo.
 - **Capítulo I:** Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos.
 - **Capítulo II:** Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica.
 - **Capítulo III:** Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³.
- **Conclusiones generales**
- **Recomendaciones**
- **Referencias bibliográficas**

Metodología de la Investigación



Capítulo I: Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos

1.1 Hormigones hidráulicos. Generalidades

Según la Norma Cubana 120:2014 “Hormigón hidráulico - Especificaciones”, se define como un material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades al hidratarse el cemento.

Una de las propiedades fundamentales del hormigón es su buena resistencia a la compresión, que se logra debido a la unión de la arena y un agregado grueso en una matriz de cemento Pórtland, provocando una reacción de cementación entre el agua y los minerales del cemento, generando una matriz resistente que fija los agregados en su sitio.(Askeland, 1998)

Las construcciones de hormigón son a menudo la opción más económica: las paredes exteriores de hormigón que soportan carga no sólo sirven para encerrar los edificios y mantener los elementos, sino que también llevan el techo, el viento y las cargas sísmicas, lo que elimina la necesidad de erigir sistemas separados; igualmente se ha demostrado que en construcciones de gran altura proporciona gran rigidez y ductilidad, haciéndolas menos propensas a percibir movimientos de construcción por parte de los ocupantes de los edificios, comparados con otros sistemas estructurales; además, es fácil de elaborar y transportar, posee buena manualidad, y elevada durabilidad (Metha and Monterio, 2006). Todas estas propiedades lo convierten en uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción.

Varios tipos de hormigones se fabrican en la actualidad atendiendo a sus características y composición: hormigón simple, armado, ciclópeo, mezclado en obra, premezclado, pretensado, u hormigón de densidad normal, entre otros.

1.1.1 Principales constituyentes cementantes del hormigón

Un material cementante es aquel que posee propiedades adhesivas y cohesivas las cuales hacen posible su ligazón con fragmentos minerales a fin de obtener una masa continua y compacta.

Los ingredientes esenciales del concreto son el cemento y el agua, los cuales reaccionan químicamente en un proceso llamado hidratación para formar otro material más fuerte. La mezcla de cemento y agua se conoce como pasta de cemento, pero su costo, en grandes cantidades, es prohibitivo para propósitos prácticos en construcción, además de que se contrae excesivamente al endurecer; es por eso que ciertos materiales de relleno inerte, como arena, piedra y grava, se añaden a la mezcla de cemento y agua en cantidades ya establecidas para aumentar el volumen de la mezcla. Cuando la mezcla del concreto es la adecuada, cada partícula de agregado es completamente rodeada por pasta, y todos los espacios entre las partículas de agregado quedan completamente llenos. (ICA, 2000)

La pasta contribuye a dar las propiedades requeridas una vez endurecido el concreto, separa las partículas del agregado y llena los vacíos entre ellas, además, proporciona lubricación a la masa cuando esta no ha endurecido. Para un cemento dado, las características y porosidad de la pasta dependen fundamentalmente de la relación agua-cemento (a/c) y del grado de hidratación del cemento; siendo mejores las propiedades de concreto y menor su porosidad cuanto más baja es la relación a/c de una mezcla trabajando y cuanto mayor es el grado de hidratación del cemento.

1.2 Cemento Pórtland y cementos con adiciones minerales activas

El cemento Pórtland es un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece. Se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando a un

grado de finura determinado una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, que se denomina clínquer Pórtland, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita (CaSO_4) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda, además se le pueden incorporar otros materiales como puzolanas, escorias granulada de alto horno, humo de sílice, y caliza. (N-CMT-2-02-001, 2002)

En el mundo existen una gran variedad de cementos, estos tipos se distinguen según los requisitos tanto químicos como físicos. Según la norma ASTM se especifica:

- 8 tipos de cementos Pórtland (ASTM C 150): I, IA, II, IIA, III, IIIA, IV, V.
- 6 tipos de cementos hidráulicos mezclados (ASTM C 595)
 - Tipo IS: Cemento Pórtland con escoria de alto horno.
 - Tipo IP: Cemento Pórtland con adiciones puzolánicas.
 - Tipo P: Cemento Pórtland con puzolana para usos cuando no se requiere alta resistencia inicial.
 - Tipo I (PM): Cemento Pórtland con puzolana modificada.
 - Tipo I (SM): Cemento Pórtland con escoria, modificado.
 - Tipo S: Cemento con escoria para la combinación con cemento Pórtland en la fabricación de concreto y en combinación con cal hidratada en la fabricación del mortero de albañilería.
- 3 tipos de cementos de mampostería (ASTM C 91): N, M, S.

La “Norma Cubana 95: 2011 Cemento Pórtland - Especificaciones” clasifica los tipos de cementos Pórtland en tres grados de calidad de acuerdo a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en kg/cm^2 :

- Cemento Pórtland 35: Cemento P-35
- Cemento Pórtland 45: Cemento P-45

- Cemento Pórtland 55: Cemento P-55

Los cementos con adiciones o compuestos, son mezcla de clínquer Pórtland, sulfato de calcio (yeso) y adiciones minerales; estos cementos pueden ser producidos por molienda conjunta de esos componentes o por la mezcla de los componentes finamente molidos.(Correa, 2000). Entre las adiciones minerales, podemos diferenciar las adiciones minerales activas e inactivas, donde las primeras presentan la capacidad de formar productos de hidratación similares a los que se producen durante la hidratación del clínquer Pórtland, mientras que las inactivas, si bien no presentan esta capacidad, suelen mejorar otras propiedades como la trabajabilidad y la resistencia temprana.(Becker, 2010)

Entre las adiciones minerales activas, se encuentran las adiciones puzolánicas entre las que podemos nombrar las puzolanas naturales, las cenizas volantes (fly ash), microsilíce (silica fume) o arcillas activadas entre otras que presentan la capacidad de hidratarse combinándose con la cal libre que se produce durante la hidratación del cemento Pórtland “puro” (clínquer + pequeñas cantidades de yeso). Por otro lado, existe otro tipo de adición mineral activa que presenta la capacidad de hidratarse y formar productos SCH (sílico-calcáreos-hidratados) llamada de hidraulicidad latente como es la escoria granulada de alto horno. Esta última reacción necesita, para producirse con cierta velocidad, del ambiente altamente alcalino generado debido a la presencia de cal producida por la llamada hidratación primaria.(Becker, 2010)

1.2.1 Cementos ternarios clínquer-arcillas calcinadas-calizas

Se han llevado cabo investigaciones que combinan ventajas y desventajas de algunas adiciones, dando lugar a nuevas generaciones de cementos ternarios, incluso cuaternarios. Diversos autores han reportado investigaciones de cementos mezclados que emplean adiciones combinadas de cenizas volantes, escorias,

microsílice, puzolanas naturales y caliza en sustitución de determinados porcentos de cemento Pórtland (Frías et al., 2013; Alonso et al., 2012; Jones et al., 1997; Vance et al., 2013; Menéndez et al., 2003; Ghrici et al., 2007). Uno de los estudios más interesantes es el realizado por De Weerd (De Weerd and Justnes, 2008; De Weerd et al., 2011b; De Weerd et al., 2011a), que potencia la reactividad de los carbonatos de la caliza con las fases alumínicas del cemento, incrementadas a su vez mediante la adición de cenizas volantes. De Weerd limita los estudios a solo el 35 % de sustitución de cemento Pórtland por la adición.

El metacaolín también ha sido usado como componente en mezclas ternarias de cemento Pórtland en combinación con escorias o cenizas volantes (Sabir et al., 2001; Vance et al., 2013; Özbay et al., September-October 2012). Los resultados demuestran que hasta el 45 % de sustitución se obtienen resistencias mecánicas superiores al cemento Pórtland desde edades tempranas como los 7 días e incluso para sustituciones del 60 % se logra el 93 % del rendimiento con respecto al cemento Pórtland. Dichas formulaciones emplean el mismo principio de De Weerd (De Weerd and Justnes, 2008, De Weerd et al., 2011b, De Weerd et al., 2011a), la reacción sinérgica entre la alúmina presente en el metacaolín y el carbonato de calcio contenido en la caliza propician la formación de fases hemicarbo y monocarbo-aluminatos desde el primer día, que también es comprobado mediante difracción de rayos X (DRX) y análisis termo-gravimétrico (TG). Los resultados de TG muestran que estos cementos ternarios reaccionan de una manera más rápida que los sistemas binarios con solo metacaolín como sustituto del cemento. Lo anterior es consistente con otro estudio publicado, también recientemente, por otro equipo de investigación (Vance et al., 2013), donde se reporta que la sinergia entre el metacaolín y la caliza consumen gran cantidad del portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) de la hidratación del cemento Pórtland desde el primer día, lo que brinda mayor resistencia a las mezclas ternarias de metacaolín con caliza en comparación con las series de cemento Pórtland y cenizas volantes, pero de nuevo, los porcentos de remplazo analizados no superan el 20 % en masa del cemento.

1.2.2 Experiencia preliminar de la producción del LC³ en Asia y en Cuba

El LC³ es un cemento ternario, Pórtland de alta pureza (P-35) con una mezcla de caliza y arcilla de origen caolinítico calcinada a temperaturas hasta 900 °C. Este aglomerante alcanza una resistencia similar a la de los cementos Pórtland con adiciones activas (Martirena et al., 2015)

Es el producto de la colaboración internacional entre la Universidad de Las Villas, Cuba y la Universidad Politécnica Federal de Lausana, en Suiza y financiado por el gobierno suizo. Su producción puede reducir los factores de clínquer abajo a 40% y las emisiones hasta en un 50% en comparación con el cemento Pórtland ordinario (OPC) y 11% en comparación con cemento Pórtland puzolánico (PPC) que contiene 35% de cenizas volantes. LC³ se aprovecha de la hidratación sinérgica de clínquer, arcilla calcinada y piedra caliza triturada para alcanzar el rendimiento requerido de los cementos comerciales, incluso a factores de clínquer tan bajas como 0,40. La piedra caliza y arcilla de baja calidad usado en la mezcla LC³ garantizar que el cemento se puede producir a un costo más bajo que incluso PPC. (Smith-Gillespie, 2010)

Cuba jugó un papel pionero en el desarrollo de este cemento a través de ensayos industriales en los que se encontró que los cementos dieron mejores ventajas en comparación con los cementos disponibles en el mercado cubano a pesar de los bajos factores de clínquer. En Cuba, bajo la dirección del Prof. Fernando Martirena de la Universidad de Las Villas, más de 100 toneladas de los cementos de cemento se ha producido y utilizado en la producción de materiales de construcción y las viviendas sociales. (Smith-Gillespie, 2010)

La India también ha llevado a cabo la producción del LC³, Tecnología y Acción para el Progreso Rural (TARA) y el Instituto Indio de Tecnología de Delhi (IIT Delhi) producen alrededor de 40 toneladas de cemento en la India demuestra que LC³ se pueden producir usando tecnologías ampliamente disponibles y que pueden ser

utilizados por los trabajadores en la industria de la construcción de la misma manera como los cementos existentes, sin ningún entrenamiento adicional. Los resultados de laboratorio muestran que los hormigones producidos utilizando LC³ que tiene un factor de clínquer de 0,50, da fortalezas similares a los hormigones similares utilizando OPC. (Smith-Gillespie, 2010)

Los resultados iniciales muestran también que el cemento se puede producir económicamente en varios escenarios que existen en la India y que puede reducir las emisiones de CO₂ procedentes de la producción de cemento. También se encontró que las materias primas necesarias para la producción de LC³ están ampliamente disponibles en la India. El LC³ puede ser una alternativa interesante para el crecimiento de la industria del cemento de la India, especialmente en lugares donde la ceniza volante no está fácilmente disponible o son muy caras. (Smith-Gillespie, 2010).

Hay otros países y organizaciones que llevan a cabo labores para el desarrollo y la difusión de tecnologías bajas en carbono con el objetivo de mitigar el cambio climático, como el caso de China, que en conjunto con la Unión Europea (U.E.) lleva a cabo proyectos en el área de las tecnologías de baja emisión de carbono con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; también se encuentra el E3G (Third Generation Environmentalism Ltd), una organización europea independiente, sin fines de lucro que opera en el interés público para acelerar la transición global hacia el desarrollo sostenible. (Smith-Gillespie, 2010)

1.3 Durabilidad del hormigón en ambientes marinos tropicales

La ACI 201.2R-01 define la durabilidad del concreto de cemento Pórtland como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, abrasión, y cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzcan deterioro del concreto.

La conclusión primordial que se desprende de esta definición es que la durabilidad no es un concepto absoluto que dependa sólo del diseño de mezcla, sino que está en función del ambiente y las condiciones de trabajo a las cuales lo sometamos.

En un ambiente marino, los iones cloruro del agua de mar (o el CO_2) se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de concreto hasta llegar a la armadura. Cuando la concentración de los iones cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico (o disminución del pH por el CO_2), la protección de la armadura corre el peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse (Proceq, 2007)

En la corrosión del acero de refuerzo se forma una capa de óxido en el perímetro de la barra de refuerzo. El volumen que ocupaba la barra aumenta y esto provoca presiones al concreto y así se generan grietas y por consiguiente desprendimientos del recubrimiento, y esto afecta la resistencia de proyecto. Y para solucionarlo se requiere un mantenimiento constante y en un extremo la sustitución parcial o total del elemento afectado generando grandes costos.(Proceq, 2007)

Un análisis minucioso del medio y su relación con el potencial de corrosión, se tendrá un mejor conocimiento de la durabilidad y el grado de corrosión con el pasar del tiempo. Y así se tendrán las bases necesarias para conocer la durabilidad y si es posible saber cuándo se tendrá que dar un mantenimiento adecuado a proyectos futuros.(Proceq, 2007)

1.4 Principales factores que afectan la permeabilidad del hormigón

La permeabilidad del hormigón está gobernada mayormente por la permeabilidad del mortero y la pasta de cemento endurecida, pues es definitiva donde se encuentran los poros permeables capaces de permitir el paso de sustancias a su través, mediante distintos fenómenos. Desde luego, que la porosidad influye en la

permeabilidad, pero debe recordarse que en este caso lo que interesa son los poros conectados, y en el sentido práctico, los poros de determinado diámetro. (Betancourt, 2013)

Existen muchos factores que pueden afectar la permeabilidad del hormigón, entre ellos están:

- 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

1.4.1 Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón

El diseño de mezclas de concreto tiene por objeto encontrar la dosificación más económica de cemento, agregado grueso y arena para producir un material con la resistencia, manejabilidad, impermeabilidad y durabilidad requeridos por el diseño de la estructura y por el método constructivo a utilizar.

Las mezclas de concreto deberán cumplir con los siguientes requisitos básicos:

- La mezcla endurecida deberá tener la trabajabilidad, consistencia y cohesividad que permitan su adecuada colocación en los encofrados.
- Esta mezcla deberá estar libre de segregación y tener una exudación mínima.
- La mezcla endurecida deberá tener las propiedades especificadas en función con la calidad deseada.
- El costo de la unidad cúbica de concreto endurecido deberá ser el mínimo compatible de la calidad deseada.

1.4.2 Tipo y contenido de cemento utilizado

El cemento, componente más activo y de mayor costo unitario del hormigón hidráulico, es por ello que se considera que las propiedades del diseño dependen tanto de la cantidad como de la calidad de sus componentes o minerales (calizas, arcillas y yeso), la selección y uso adecuado del cemento son fundamentales para obtener de forma económica las propiedades deseadas en una mezcla de hormigón. Por lo que cada uno de los tipos de cementos tiene una gran influencia en la producción de hormigones para determinadas finalidades, ya que los mismos poseen diferentes características que modifican sus propiedades a causa de diferentes variaciones en los porcentajes de los compuestos que lo conforman. (Martirena Hernández, 2015)

1.4.3 Relación agua cemento (a/c)

Uno de los parámetros decisivos para el logro de un hormigón duradero es el empleo de baja relación a/c, para disminuir la red de vasos capilares que se forman por la evaporación del agua no necesaria en el proceso de hidratación del cemento. La especificación de una $f'c$ razonablemente compatible con la relación máxima a/c fijada coadyuvará a cumplimentar en gran medida, que efectivamente en obra se cumpla con la especificación dada en el proyecto de máxima relación a/c cuyo control exacto in situ no es sencillo de ejecutar. (RC 9001, 2001)

No obstante, deberá tenerse presente que una relación baja de a/c por sí misma no asegura la baja permeabilidad del hormigón ya que hormigones con bajo contenido de finos, pueden tener una baja relación a/c y sin embargo ser altamente permeables. (RC 9001, 2001)

1.4.4 Régimen de curado del hormigón

El proceso de curado es una de las etapas más importantes para el logro de hormigones de baja permeabilidad y duraderos con incidencia aún mayor en aquellos elementos de baja relación a/c o de grandes áreas expuestas a los rayos solares en las horas y épocas de intenso calor, como losas, muros, pretilas, etc. (RC 9001, 2001)

Consiste en mantener un contenido satisfactorio de humedad y temperatura en el hormigón durante sus primeras edades de manera que éste pueda desarrollar las propiedades o desempeño deseado. (Standards, 2005)

El curado del concreto debe tener como objetivo principal el mantenerlo saturado hasta que los espacios originalmente ocupados por el agua en la pasta fresca se llenen con los productos de hidratación del cemento, reduciendo a un mínimo los poros capilares.

Para elementos hormigonados en ambientes secos y calurosos, así como para elementos cuyas superficies han de estar en contacto con aguas salinas o sulfatadas, es recomendable aumentar en tres días, los tiempos mínimos que se establecen un determinado caso de cemento Pórtland y adiciones activas (RC 9001, 2001)

Especificaciones adicionales sobre “Curado del hormigón” aparecen en la “Norma Cubana 293:2005 Código de buenas prácticas para el curado del hormigón”

1.4.5 Edad y resistencia 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 (Muñoz, 1988) independientemente que la resistencia del hormigón aumente con el tiempo.

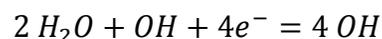
Este aumento de la permeabilidad implica una disminución continua de la eficacia del cerramiento, llegando a inutilizar la construcción cuando las pérdidas alcanzan niveles que resultan peligrosos o no rentables económicamente; como, por ejemplo, se presentan en los casos de depósitos de gases tóxicos, de elementos radiactivos o en cámaras de vacío para la potabilización del agua de mar (Muñoz, 1988)

Existen varios factores que influyen en la porosidad del hormigón, como son: la compacidad, la constancia de volumen y la cohesión. Estas propiedades dependen fundamentalmente de los materiales, de la proporción en que intervengan, la preparación y fabricación del hormigón (Muñoz, 1988)

El agua empleada en la fabricación del hormigón, y que no es absorbida por el cemento, se va evaporando en un proceso continuo que puede durar varios años, en función del grado de humedad y temperatura del ambiente en que se encuentre el hormigón, lo que supone que su porosidad aumente y, por lo tanto, también su permeabilidad (Muñoz, 1988)

1.4.6 Contenido de humedad y temperatura

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión en medios neutros y alcalinos, pues interviene en el proceso catódico de reducción del oxígeno:



Además, el agua es necesaria para la movilidad de los iones a través del electrólito. En el hormigón seco, la resistividad eléctrica es tan elevada que impide que la corrosión se produzca aun en ausencia de la capa pasiva sobre el acero; sólo la

Capítulo I: Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos

existencia de una cierta cantidad mínima de humedad en los poros del hormigón permitirá el desarrollo de los procesos corrosivos. Por tanto, cuanto más saturados en humedad estén los poros del hormigón, menor será el valor de la resistividad eléctrica y más elevadas podrán ser en principio las velocidades de corrosión (Perepérez et al., 1987)

El contenido en agua de los poros es función, en situaciones de no inmersión o no saturación, de la humedad relativa (HR) del ambiente. La humedad que importa, es decir, la que influye en los procesos de corrosión, es la realmente contenida en los poros. A este respecto, debe tenerse presente que la humedad ambiental y la del hormigón sólo coinciden en regímenes estacionarios y que en condiciones cambiantes es mayor la humedad del hormigón, porque éste pierde agua a menor velocidad de lo que la gana a causa de la existencia de tensiones capilares.

Humedad relativa efectiva.	Proceso				
	Carbonatación	Corrosión de las armaduras en el hormigón causada por: Carbo-nata-ción.	Contamina-ción por clo-ruros	Ataque por heladas	Ataque químico
Muy baja (<45 %)	1	0	0	0	0
Baja (45 - 65 %)	3	1	1	0	0
Media (65-85%)	2	3	3	0	0
Alta (85-95 %)	1	2	3	2	1
Saturación (>95%)	0	1	1	3	3

0 = no significativo. 1 = Bajo. 2 = Medio. 3 = Alto.

Fig. 1.1: Influencia del contenido de humedad del hormigón sobre algunos procesos de deterioro (CEB, 1985)

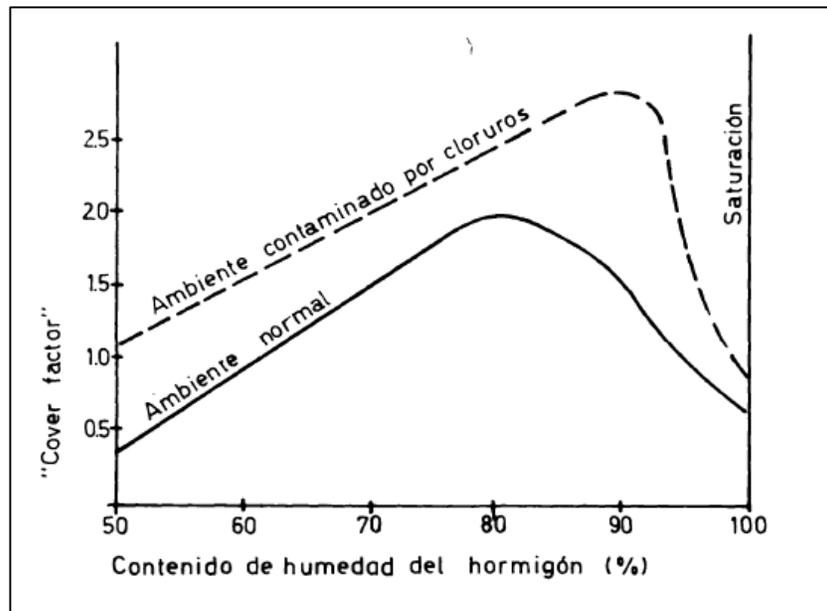


Fig. 1.2: Influencia de la humedad relativa efectiva sobre el riesgo de corrosión de las armaduras (CEB, 1985)

Este último fenómeno puede verse acrecentado cuando el hormigón esté contaminado por cloruros, a causa del carácter higroscópico de los mismos. Asimismo, aunque el ambiente exterior esté seco, el interior del hormigón no se seca más que cuando tales circunstancias se prolongan largo tiempo. En la mayoría de los hormigones, a partir de los 3-4 cm del parámetro exterior, los poros siempre se encuentran saturados o casi saturados de humedad. Este comportamiento está muy influenciado por la porosidad del hormigón, ya que hormigones muy porosos permitirán una "respiración" más profunda que hormigones más densos, cuya "piel" sólo "respirará" en los 1-2 cm más externos. A título de ejemplo se muestran en las figuras 1 y 2 (CEB, 1985), aquí se presentan interpretaciones de la influencia que la humedad contenida en los poros puede tener en los procesos de corrosión de las armaduras. La figura 2 muestra en abscisas la humedad realmente contenida en los poros (nivel 0% de la saturación de los mismos), y en ordenadas se ha definido la escala de agresividad de tal manera que resulte directamente proporcional al espesor del recubrimiento necesario para mantener constante el riesgo de corrosión del acero (Perepérez et al., 1987)

La temperatura juega también un papel doble en los procesos de deterioro. Por un lado, su incremento promueve la movilidad de las moléculas facilitando el transporte de sustancias (Tutti, 1979) por otro, su disminución puede dar lugar a condensaciones que, a su vez, pueden producir incrementos locales importantes del contenido de humedad del material (Lago Helene, 1983). Además, la cantidad absoluta de vapor de agua en la atmósfera varía con la temperatura.

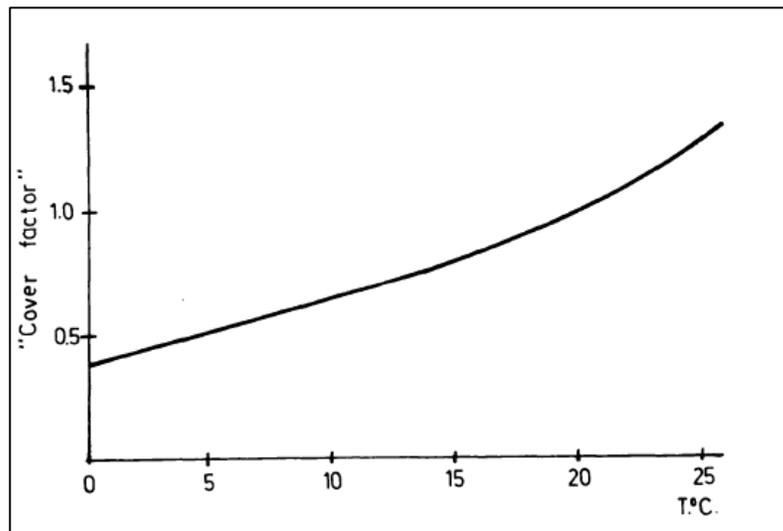


Fig. 1.3: Influencia de la temperatura sobre el riesgo de corrosión de las armaduras (CEB, 1985)

La figura 1.3, define en las ordenadas el riesgo de corrosión de las armaduras de igual modo que en la figura 2, permite deducir que, al pasar de una temperatura media anual de 5°C a otra de 20°C, hay que doblar aproximadamente el espesor del recubrimiento de hormigón para mantener constante el riesgo de corrosión de las barras. El análisis de estructuras deterioradas por corrosión de las armaduras (Rashheduzzafar, 1985) ha corroborado el fenómeno, demostrando que, a igualdad de todos los demás condicionantes, los climas son tanto más agresivos cuanto más cálidos, y que entre los 20°C y los 40°C se producen aumentos bruscos de la velocidad de corrosión, en particular en presencia de humedades relativas relativamente elevadas.

Finalmente, es importante destacar que estos tres factores ambientales tienen efectos contrapuestos y que, por tanto, no es fácil predecir la evolución del proceso de corrosión del acero a partir de uno solo de ellos. Esta característica del "efecto inversor" (por ejemplo, una mayor humedad facilita la corrosión, pero impide el acceso de oxígeno, o bien una mayor temperatura acelera la corrosión, pero disminuye la condensación), lleva a múltiples predicciones erróneas de comportamiento de las armaduras.

1.5 Mecanismos de transporte en el hormigón

Son los mecanismos por los cuales es posible el movimiento de los iones o moléculas en virtud de procesos específicos (Richardson, 2002). En el pasado, los mecanismos de transporte que rigen han sido investigados con el fin de describir y explicar los fenómenos de degradación que se encuentran en las estructuras de hormigón (Kropp and Alexander, 2007). La vida útil de una estructura de hormigón se puede estimar en base de estos mecanismos de transporte relacionados con la durabilidad. Los mecanismos de deterioro más comunes incluyen los procesos para el ingreso de cloruro (debido a la exposición marina), la carbonatación (debido a la exposición al dióxido de carbono) y varias otras formas de ataque químico (por ejemplo, ataque por sulfatos). (Torrent et al., 2007; Ballim et al., 2009)

En el caso particular de los líquidos, estos pueden penetrar la red porosa del hormigón usando principios físicos muy distintos, siendo los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material: la permeabilidad, la difusión y la absorción capilar.

Por difusión se designa el proceso de transporte de un constituyente dentro de un medio cualquiera, bajo el efecto de su agitación aleatoria a escala molecular. Cuando existe una diferencia de concentración entre dos puntos del medio, aparece una resultante del movimiento aleatorio que genera un transporte global (o neto) del

constituyente considerado, desde la zona con mayor concentración hacia la zona de menor concentración. La difusión se determina en general sobre hormigones saturados.

La absorción capilar corresponde al desplazamiento de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la interacción de las fuerzas de contacto líquido - sólido. Este fenómeno de movimiento de agua tiene lugar en hormigones secos o parcialmente saturados.

En resumen, la protección de un elemento estructural de hormigón contra especies agresivas depende de la permeabilidad, el espesor de la capa superficial (Torrent and Fernández Luco, 2007) y la estructura de la matriz de poros (de la cual depende la permeabilidad y la absorción capilar) (Ichaso, 2014)

1.6 Estructura de la matriz de poros

Comúnmente, el hormigón está compuesto de agregado grueso, agregado fino (arena), agua, cemento (cemento y extensores) y aditivos. En su estado fresco, la pasta de cemento se compone de granos de cemento sin hidratar uniformemente dispersas en suspensión en agua (Grieve, 2009). Sin embargo, la estructura de los poros del hormigón en su estado endurecido, influye directamente en la capacidad de penetración del hormigón, y por lo tanto es de gran importancia para la durabilidad.

En su estado endurecido, la pasta de cemento incorpora dos tipos de poros, es decir, poros del gel y capilares. Los poros del gel son causados por la formación de hidrato de silicato de calcio ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) en el proceso de hidratación, debido a los pequeños espacios intersticiales entre las fibras con enlaces. El proceso de hidratación, y la posterior porosidad de los huecos capilares y del gel se explica por el modelo de la alimentación para hidratación (Powers and Brownyard, 1948), que

Capítulo I: Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos

describe la pasta de cemento en términos de cemento sin reaccionar, agua libre (que enlaza con la porosidad capilar) y producto de hidratación (que une a la porosidad del gel) (Powers and Brownyard, 1948). Los poros del gel constituyen aproximadamente el 28% del volumen total de gel (Neville, 1981). El agua presente en el interior de los poros del gel se une físicamente, y sólo es evaporable por encima de 105 ° C (Neville, 1981).

Los poros capilares (dependiendo de la relación a/c, grado de hidratación del cemento y tipo) son significativamente más grandes. Existen como volumen libre, donde el producto de hidratación no ha sido capaz de ocupar el volumen originalmente lleno de agua de la mezcla en estado fresco (Richardson, 2002). Los granos hidratados ocupan aproximadamente dos veces el volumen de los granos de cemento no hidratados, y por lo tanto para reducir la porosidad total de la pasta de cemento, es crítico que la mayor cantidad de volumen de poro capilar se retire como sea posible (Richardson, 2002). El contenido de agua de los poros capilares puede variar, y es evaporable por debajo 105 ° C (Neville, 1981). La figura 1.4 muestra la estructura general de los poros de la pasta de cemento hidratada.

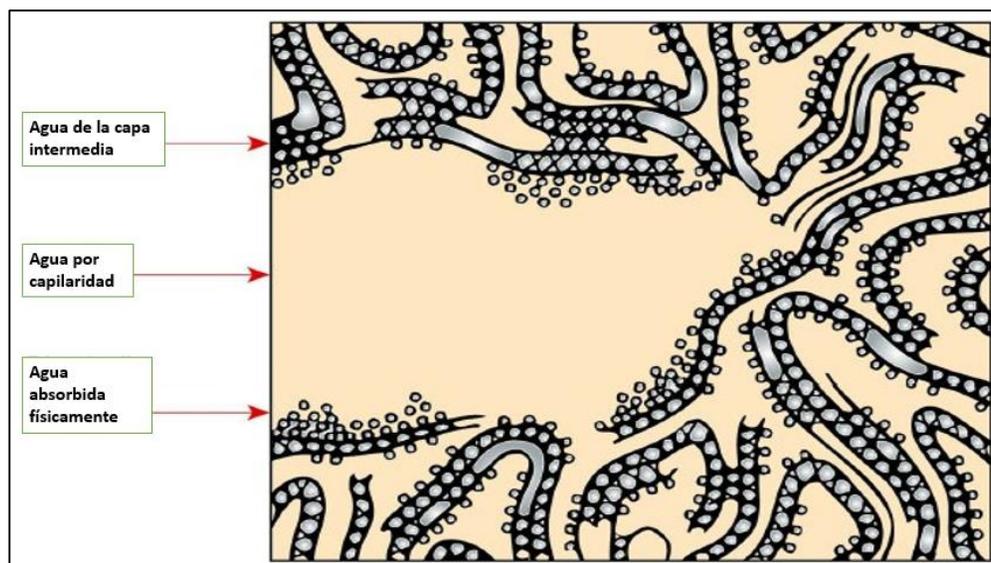


Fig. 1.4: Estructura de poros de la pasta de cemento endurecida (Mehta and Monteiro, 2006)

1.7 Diferencia entre la capa superficial y la masa interna del hormigón

En tanto que la capacidad portante de un elemento estructural es la resultante de su comportamiento integral, su durabilidad frente a acciones agresivas del medio ambiente depende, básicamente, del desempeño protector de una capa superficial relativamente delgada (20-50 mm), como se ilustra en la Figura 1. Esta capa debe proteger a las armaduras contra la corrosión inducida por la carbonatación o por ingreso de cloruros, y es también la más afectada por ataques químicos, congelación, etc. Lamentablemente, por ser la zona de más difícil compactación o por recibir las tareas de acabado y por ser la más expuesta a las consecuencias del mal hábito de no curar las estructuras, esta vital capa superficial suele ser la de peor calidad en el elemento estructural (Torrent, 1999)

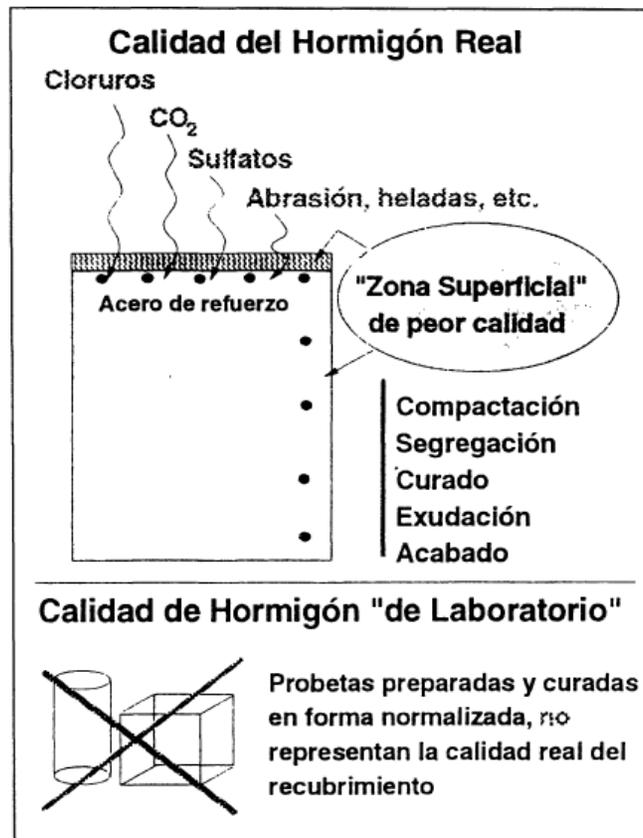


Fig. 1.5: Concepto de hormigón superficial (Recubrimiento) (Torrent, 1999)

1.8 Influencia del espesor de recubrimiento sobre la vida útil del hormigón

El recubrimiento constituye un parámetro de gran importancia para proveer al acero de refuerzo de la protección requerida durante el período de vida útil considerado de la estructura, siendo decisivos para esta protección, la baja permeabilidad y el espesor del mismo. El recubrimiento tiene dos funciones, una química y otra física. La química es mantener la alcalinidad suficiente ($\text{pH} \approx 12,5$) que inhiba la corrosión del acero. La física es limitar la entrada de los agentes agresivos desde el exterior. Este espesor deberá estar acorde con el buen diseño estructural, la severidad de las condiciones ambientales y el costo total que conlleva, incluyendo los costos por mantenimiento (RC 9001, 2001).

El período durante el cual el recubrimiento de hormigón protege al acero de refuerzo es función del cuadrado del espesor de dicho recubrimiento. Esto conlleva que una disminución del recubrimiento a la mitad de su valor de proyecto se traduzca en un período de protección de la armadura reducido a la cuarta parte (RC 9001, 2001).

El recubrimiento se ve afectado por:

- El efecto pared producido por los encofrados.
- La segregación
- El tiempo y tipo de compactación
- La terminación superficial
- El tiempo y tipo de curado

Estas variables producen un aumento local de la relación a/c y de la porosidad. (Mehta and Monteiro, 1993).

1.9 Sorptividad de los hormigones hidráulicos

La absorción se define como el proceso por el que los líquidos (por ejemplo agua (H₂O)) se dibujan en un material poroso en virtud de las fuerzas de succión capilar (Ballim et al., 2009). La absorción es dependiente del nivel de saturación del hormigón y la estructura de poros de hormigón intrínseca (Ballim et al., 2009), además de la tortuosidad, de los cambios de sección y de la interconectividad de los poros (NC 967, 2013).

Sorptividad es la velocidad a la que se mueve humedad de la superficie expuesta hacia el hormigón en masa bajo las fuerzas de succión capilar en mm/s^{1/2} o en m/s^{1/2} (NC 967, 2013). La capacidad de absorción es una medida útil, ya que también proporciona una indicación de la interconexión de la red de poros, además de la estructura de poros intrínseca del concreto y el nivel de saturación (Richardson, 2002).

1.10 Migración de cloruros

La corrosión del acero de refuerzo existente dentro del concreto se origina por la presencia exclusiva de oxígeno y humedad en las proximidades de las barras, pero la existencia de cloruros libres en el medio que las rodea es un desencadenante del proceso (Gabriel, 2013)

Los iones cloruro llegan al hormigón o bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua,...) durante el amasado, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros (Gabriel, 2013)

Al 'penetrar por los poros, avanza hacia el interior por difusión u otro mecanismo de transporte. Para que se produzca la despasivación del acero es preciso que las concentraciones de cloruro en las inmediaciones de las barras de acero superen unos valores mínimos (Gabriel, 2013)

La corrosión se podría evitar dejando un gran recubrimiento del acero o utilizando hormigones con una relación a/c baja, así la profundidad de penetración de cloruro sería también baja. Sin embargo, la corrosión ocurre con frecuencia puesto que este recubrimiento suele ser insuficiente y la mayoría de veces se utilizan hormigones muy porosos (Gabriel, 2013)

1.11 Carbonatación

La “Norma Cubana 355:2004 Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios” define la carbonatación como la reducción de la alcalinidad del hormigón por acción de los componentes ácidos de la atmósfera dióxido de carbono (CO₂) y de azufre (SO₂).

Como ya se informó en estudios previos, la mayor influencia en la tasa de carbonatación del concreto la tiene la proporción a/c. El contenido de cemento no influye en la tasa de carbonatación cuando la proporción a/c se mantiene constante; sin embargo, si la trabajabilidad se mantiene constante, el incremento en el contenido de cemento da lugar a una reducción de la profundidad de carbonatación (Do Lago and Castro-Borges, 2009)

Esta reacción reduce el pH de la solución de poro concreta, resultando en la corrosión de las barras de acero de refuerzo empotradas y la formación siguiente de rajaduras en el concreto que, al final, da como resultado en un decrecimiento en la vida del servicio residual de la estructura (Moreno et al., 2002, Torrent et al., 2007)

La temperatura y la presencia de humedad en el ambiente son de gran influencia, en hormigones sometidos a ambientes secos con HR<20% se presenta un índice de carbonatación muy bajo en forma similar a lo que sucede en ambientes húmedos con HR>80%, como es el caso de ambientes marinos tropicales, sin embargo, los ambientes intermedios con 25%<HR<75% presentan mayor velocidad de

penetración (Becker, 2003), según Chávez-Ulloa (2013) la condición óptima para el avance de la carbonatación es cuando la humedad relativa del medio está en el intervalo de 60 a 75%.

El proceso de carbonatación comienza con la difusión de CO_2 en el hormigón (Visser, 2012). El CO_2 del aire puede penetrar a través de los poros del hormigón y reaccionar con el CaOH_2 del cemento produciéndose un cambio en la basicidad del material y formándose carbonato de calcio (CaCO_3). Se producirá una reducción del valor del pH hasta alcanzar valores mínimos de basicidad ($\text{pH} < 9$).

El avance del frente de carbonatación hacia el interior del elemento de concreto se produce cada vez de manera más lenta hasta que se detiene. Esto se debe a que el carbonato de calcio, que es poco soluble, al continuar en un medio húmedo y con la presencia del CO_2 , se descompone en bicarbonato de calcio, que sí es un compuesto soluble (Vidaud, 2012).

Al ser una reacción reversible, con la solubilidad del bicarbonato de calcio ($\text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$) se producirá la precipitación del carbonato de calcio CaCO_3 cuando el agua y el CO_2 tiendan a migrar hacia el exterior en periodos de secado. De esta manera los poros del concreto se sedimentarán con el tiempo y se detendrá el avance del frente de carbonatación (Vidaud, 2012).

1.12 Resistividad eléctrica

De los ensayos para medir la durabilidad en hormigones, uno de los más importantes es el de resistividad eléctrica. Para su medición se utiliza el Resipod Proceq (Fig. 1.6) que funciona mediante el principio de la sonda Wenner.

Primeramente se aplica una corriente eléctrica a dos sondas exteriores y se mide la diferencia de potencial entre las dos sondas exteriores (fig. 1.7). La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros, la resistividad calculada depende de la distancia entre sondas. (Proceq, 2015)

Resistividad $\rho = 2\pi aV/l$ [$k\Omega\ cm$] (Proceq, 2015)

La medición de la resistividad superficial proporciona una información extremadamente útil acerca del estado de una estructura de hormigón. Estudios han mostrado que la resistividad puede ser directamente correlacionada con la velocidad de difusión de cloruro. El cartografiado en el emplazamiento de la resistividad de una estructura de hormigón identificará las zonas más permeables. En tales zonas es más alta la probabilidad de susceptibilidad a la penetración de cloruro. El modelo del Resipod de una distancia de 38 mm está en conformidad con el nuevo método de prueba de resistividad superficial AASHTO, el cual usa la resistividad superficial como una indicación de la permeabilidad de hormigón. (Proceq, 2015)



Fig. 1.6: Resipod Proceq (Tomada por el autor)

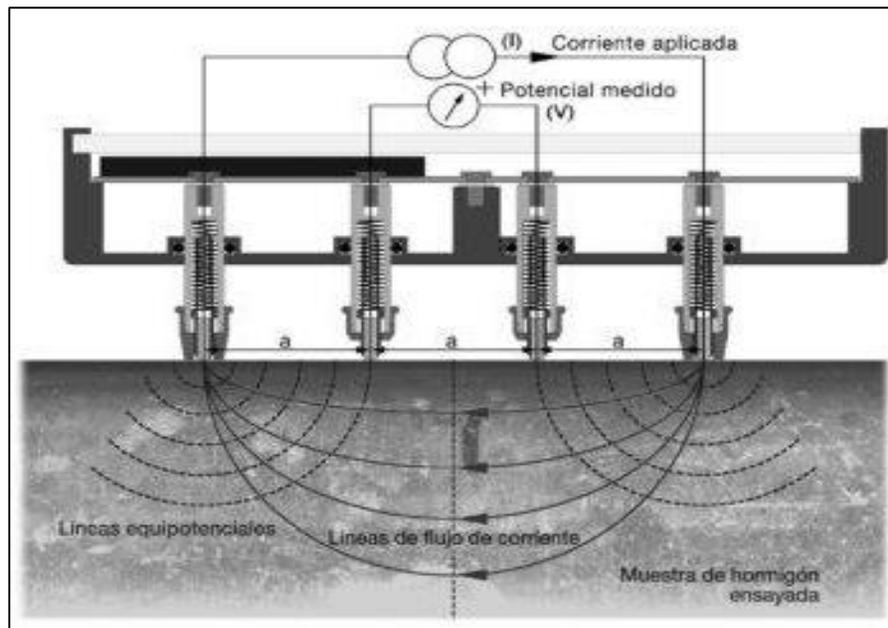


Fig. 1.7: Funcionamiento del Resipod Proceq (Proceq, 2015)

1.13 Permeabilidad como indicador de durabilidad

Los serios problemas de durabilidad que se encuentran en muchas estructuras de hormigón, asociados, principalmente, a la depasivación y corrosión de las armaduras, al ataque químico p.ej. por sulfatos y a los ciclos de congelación y deshielo, han puesto en tela de juicio los enfoques tradicionales para la especificación y control del hormigón. (Torrent, 1999). Mientras mayor sea la permeabilidad de un elemento de hormigón, más propenso será al ataque de sustancias nocivas que posteriormente conspirarán para reducir su durabilidad.

"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." (CEB-FIP MODEL CODE, 1990).

1.13.1 Evaluación de la permeabilidad al aire del hormigón

La vida útil de un elemento depende en gran medida de la permeabilidad y espesor del recubrimiento, las cuales que están determinadas principalmente por:

- El correcto diseño de vida útil y especificación (Proyectista).
- Un buen diseño de la mezcla y tecnología de producción (Proveedor de concreto).
- La correcta selección de los materiales a utilizar (proveedor de materiales).
- La ejecución cuidadosa de la estructura (Contratista).
- La supervisión y controles adecuados (Inspección/Propietario) (Yera Artola, 2014)

El transporte de un fluido está controlado por la permeabilidad del hormigón, cuando existe una diferencia de presión hidráulica entre dos secciones adyacentes que provoca o induce un movimiento del fluido. Como norma general, cuanto menos poroso sea un hormigón, mayor resistencia tendrá y, si ha tenido un buen curado, será menos permeable. Es condición necesaria que ambas caras del hormigón estén en contacto con el fluido para poder considerar que el mecanismo de transporte es la permeabilidad. (Mahmoud Abdelkader, 2010).

1.13.2 Métodos y técnicas de evaluación de la permeabilidad

En la actualidad existen varios métodos y técnicas para medir la permeabilidad al aire basado en la calidad del recubrimiento del hormigón, que pueden realizarse in situ o en laboratorios.

Los métodos basados en laboratorio generalmente requieren la extracción de núcleos de estructuras de concreto, después de lo cual las muestras se prueban en condiciones controladas de laboratorio. Los métodos de ensayo in situ (tales como

el Sistema de Permeabilidad Autoclave; método Torrent y método Hong-Parrot) se utilizan para medir la permeabilidad de una estructura in situ mientras está expuesto al medio ambiente. (Starck, 2013)

Uno de los factores que varían entre los métodos de prueba en laboratorio e in situ para determinar el nivel de permeabilidad es el tipo de sustancias de gas. El ambiente (a la que una estructura está expuesta) consiste en oxígeno, dióxido de carbono, agua y posiblemente otros productos químicos nocivos (por ejemplo cloruros). La carbonatación se produce como resultado de la reacción entre dióxido de carbono, humedad y el oxígeno en el interior del hormigón. Las pruebas de laboratorio han optado generalmente por el uso de oxígeno como el gas que penetra, ya que el dióxido de carbono y agua resultan en una alteración de la estructura de los poros de hormigón (Kollek, 1989; Alexander et al., 2008). Algunos investigadores se han propuesto determinar el efecto del tipo de gas sobre la permeabilidad del hormigón. Los gases investigados fueron comúnmente oxígeno, nitrógeno y aire comprimido (Dinku and Reinhardt, 1997; RILEM TC 116-PCD, 1999; Pilz, 2005). Sin embargo, debido a la literatura insuficiente detallando el efecto del tipo de gas, este tema no será discutido.

1.13.2.1 Método Cembureau

El método Cembureau (Asociación Europea del Cemento) fue una de las primeras pruebas de laboratorio aceptadas para medir la permeabilidad al gas (Romer, 2005) El método consiste en hacer pasar el oxígeno puro a través de un disco de hormigón (150 mm de diámetro, espesor 50 mm) a una presión constante, y la medición de la velocidad de flujo resultante (Kollek, 1989).

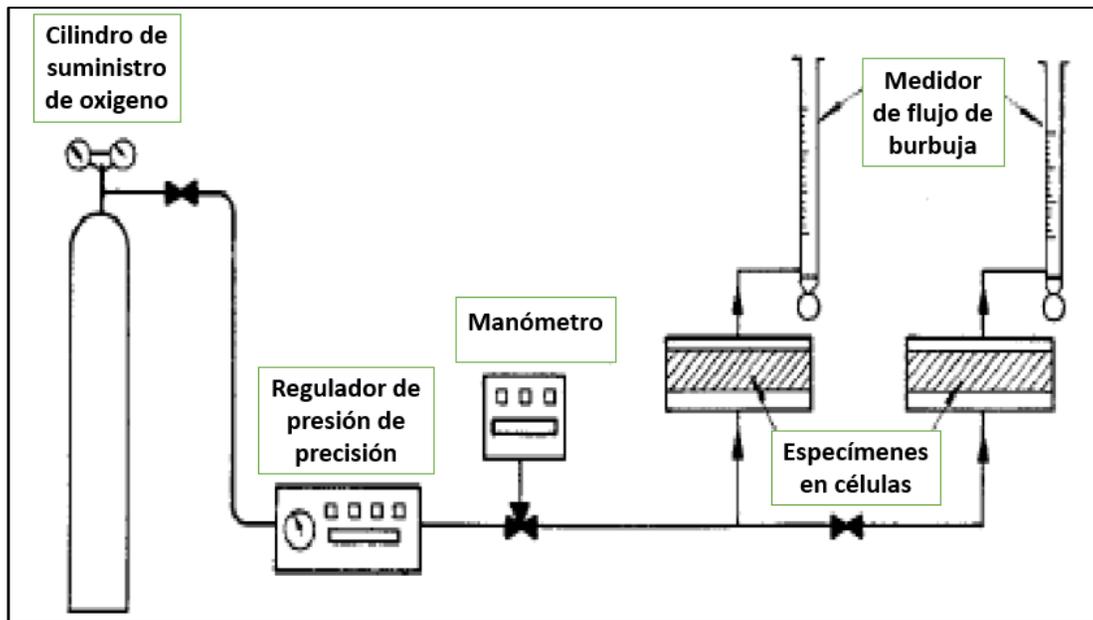


Fig. 1.8: Esquema de la prueba de Cembureau (Kollek, 1989)

La velocidad de flujo se mide por medio de un medidor de flujo volumétrico de gas, típicamente del tipo de burbuja de jabón (Kollek, 1989). Tanto preparado en el laboratorio e in situ se pueden usar muestras de núcleo, sin embargo, se requiere un pre acondicionamiento adecuado con el fin de conseguir una condición de humedad inicial estándar que permitirá la comparación de varias probetas de hormigón. Las muestras deben ser llevadas a la misma condición de humedad antes de la prueba. Esto se puede lograr a través del almacenamiento de las muestras en una atmósfera de laboratorio a 20 ± 2 ° C y 65% de humedad relativa durante 28 días, o de forma alternativa, las muestras se pueden secar en un entorno de laboratorio ventilado a 105 ± 5 ° C y durante los 7 días seguido de 3 días a 20 ± 2 ° C (Kollek, 1989). Esto permite la comparación de las muestras, que de otro modo no sería posible debido a que el poro bloquea el efecto de la humedad en las mediciones de permeabilidad al gas. (Kollek, 1989)

El método Cembureau es fiable y fácil de operar, sin dejar de lograr una buena repetibilidad (Holmes et al., 2009).

1.13.2.2 Sistema de Permeabilidad Autoclave

El Sistema de Permeabilidad Autoclave es un método para la medición de propiedades de transporte cerca de la superficie (Torrent et al., 2007; Amphora NDT Ltd., 2012). La prueba no es destructiva, y por lo tanto muy adecuado para las pruebas in situ de estructuras de hormigón (Torrent et al., 2007; Amphora NDT Ltd., 2012) pero se requieren pequeños agujeros con el fin de montar el anillo de unión a la superficie de hormigón (Basheer et al., 2001). Los componentes del sistema de permeabilidad Autoclave se muestran en la siguiente figura:

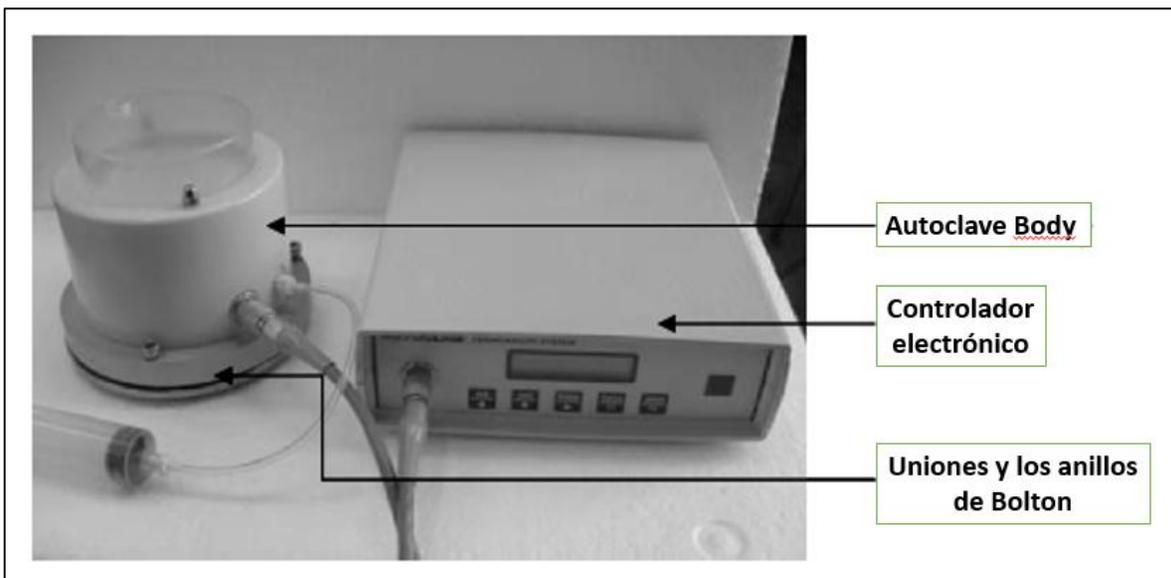


Fig. 1.9: Componentes del Sistema de Permeabilidad Autoclave (Amphora NDT Ltd., 2012)

Dependiendo del mecanismo de transporte en cuestión, el Autoclave puede ser utilizado para medir la permeabilidad al aire, la permeabilidad al agua o capacidad de absorción de agua del hormigón (Basheer et al., 2001; Torrent and Fernández Luco, 2007) . En particular, para la prueba de permeabilidad al aire, el Autoclave mide la caída de presión después de una presión inicial de ligeramente por encima de 0,5 bares (Holmes et al., 2009) El tiempo total de la prueba es de 15 minutos, con el tiempo adicional requerido para el montaje del anillo de unión (Holmes et al., 2009).

Los efectos de la temperatura y la humedad en la medición permeabilidad al aire por el método Autoclave también han sido investigados por Basheer y Nolan (2001). Los efectos de la temperatura ambiente sobre la permeabilidad al aire no eran significativa, sin embargo, el efecto del aumento de la humedad condujo a obtener engañosamente baja permeabilidad. (Basheer and Nolan, 2001; Long et al., 2001)

Las principales desventajas de esta prueba se considera la dificultad asociada con el logro de un sello hermético entre el instrumento y la superficie de hormigón (Long et al., 2001). El método de prueba se ha encontrado más conveniente a los hormigones de altas prestaciones, y hormigones con tratamientos de superficie, donde las mediciones de baja permeabilidad son comunes (Basheer and Nolan, 2001; Amphora NDT Ltd., 2012)

1.13.2.3 Método Hong-Parrot

El método de Hong-Parrot se considera un método de ensayo in situ intrusivo, ya que requiere la preparación de un agujero de aproximadamente 35 mm de profundidad (20 mm de diámetro). En la superficie de hormigón, un tapón de acero (con un manguito de caucho de silicona en expansión) está equipado permitiendo espacio para una pequeña cavidad llena de aire (Hong and Parrott, 1989; Parrot and Hong, 1991). El transductor de presión y el indicador digital se conectan al tapón de sellado, y actúan como la fuente de la aplicación de presión a la cavidad (Paulmann and Molin, 1995; Torrent and Fernández Luco, 2007). La configuración de la prueba de Hong-Parrot se muestra en la siguiente figura:

Con el fin de medir el radio de la influencia del flujo de aire, el hormigón circundante es cepillado con una solución de jabón (Parrot and Hong, 1991). El radio se detecta por la presencia de burbujas de aire en la superficie de hormigón (Parrot and Hong, 1991; Paulmann and Molin, 1995; Torrent et al., 2007).

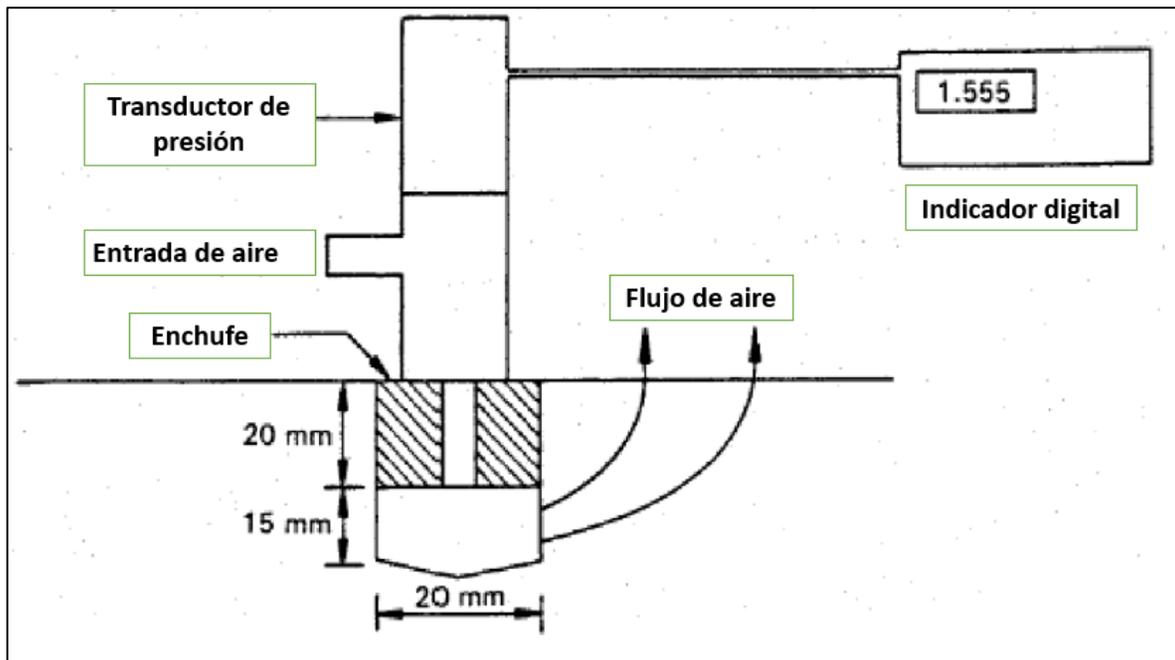


Fig. 1.10: Esquema de la prueba de Hong-Parrot (Hong, 1989)

Las mediciones de la humedad se toman por medio de una sonda de humedad, que se coloca dentro del agujero un minuto después de la finalización de la prueba (Hong and Parrott, 1989; Parrot and Hong, 1991)

1.13.2.4 Método del Índice de Permeabilidad al Oxígeno

La prueba del índice de permeabilidad al oxígeno (OPI) es un método de ensayo de laboratorio para medir la penetración de oxígeno en el hormigón (Ballim et al., 2009). Se puede utilizar para la evaluación de la especificación de la mezcla o para el control de calidad del hormigón en el sitio (Alexander et al., 2010).

La preparación de las muestras se realiza de 28 a 35 días después de la fundición, permitiendo los procesos de hidratación del cemento, de lo contrario puede dar resultados engañosos de permeabilidad (Alexander et al., 2008), y se prepararán en discos circulares de 70 ± 2 mm de diámetro y de 30 ± 2 mm de espesor

Capítulo I: Mecanismos y factores que influyen en la permeabilidad al aire y su repercusión en la durabilidad de hormigones hidráulicos

(Alexander et al., 2010; Ballim et al., 2009). Luego se secan aproximadamente 7 días a 50 ± 2 ° C y se enfrían en un desecador entre 2 y 4 horas (Ballim et al., 2009)

Las muestras de ensayo se retiran del desecador durante 30 minutos, y se colocan dentro de un (caucho de sellado) collar de acero. El collar (con el espécimen de hormigón en el interior) se fija a la parte superior de la célula de presión para asegurar que no se produzcan fugas de oxígeno y, posteriormente, se purga el aire residual en el interior de los tubos de la cámara de prueba y de suministro. Esto se realiza con el fin de garantizar que sólo el oxígeno desde el depósito de suministro está disponible para la prueba durante el ensayo (Alexander et al., 2010). La configuración típica para la prueba OPI se muestra en la siguiente figura:

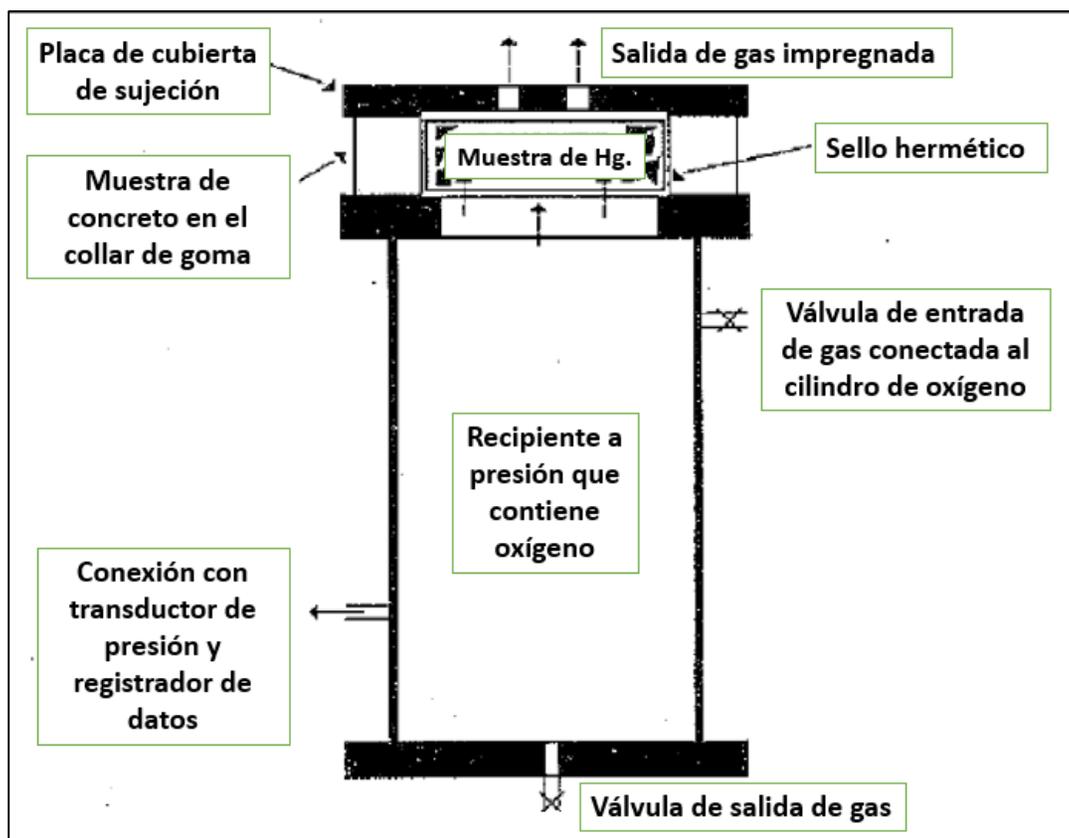


Fig. 1.11: Prueba del Índice de Permeabilidad al Oxígeno (Alexander et al., 2010)

El oxígeno que contiene la vasija de presión es presionado para una presión inicial de 100 ± 5 kPa. La caída de presión (debido al oxígeno que pasa a través de la muestra) se mide después de forma automática. La prueba puede ser terminada después de 6 horas \pm 5 min (o después de que la presión ha descendido por debajo de 50 ± 2 kPa).

La prueba OPI se puede utilizar para evaluar la calidad como una función de una estructura de RC, así como donde: KOPI = k-valor para la prueba OPI (m / s) para mejorar las propiedades relacionadas con la durabilidad, de una mezcla de hormigón. Se requiere al menos tres resultados de las pruebas válidas de un elemento de hormigón en particular (Alexander et al., 2007). Por esta razón, es práctica común durante cuatro especímenes por elemento estructural que se prepararon y se ensayaron.

1.13.2.5 Método Torrent

El método de Torrent es un método de ensayo no destructivo para medir el coeficiente de permeabilidad al aire del hormigón (Ballim et al., 2009). También se puede utilizar en muestras de laboratorio preparadas, siempre que el tamaño y la preparación de la muestra sean adecuados.



Fig. 1.12: Permeabilímetro al aire Torrent (Proceg, 2007)

En la actualidad, existen dos instrumentos disponibles comercialmente adecuados para el método de Torrent, el Torrent de Permeabilidad (TPT) fabricado por Proceq Suiza (Fig. 1.12); y la PermeaTORR (P-Torr) fabricado por Materiales Servicios Avanzados (M.A.S.) SRL. Argentina (Torrent, 2008). El TPT fue el instrumento prototipo lanzado comercialmente en 1995 y el P-TORR lanzado en 2009 (Torrent, 2012). Sin embargo, las mejoras realizadas en el desarrollo de la P-TORR han dado lugar a supuestos superiores en condiciones teóricas (Torrent, 2012), dando lugar a resultados más fiables y precisos así una disminución en el tiempo de prueba (Torrent, 2012). En una comparación de los resultados de los dos instrumentos se ha encontrado que existe una buena correlación ($R = 0,98$) (Torrent, 2008)

La influencia de la humedad, la temperatura y la edad en el método de Torrent se han investigado extensamente debido a la sensibilidad de la prueba a estos factores (Torrent and Jacobs, 2009; Torrent et al, 2012). Según Jacobs et al. (2009) las pruebas de la edad recomendada son de entre 28 y 90 días.

Con el fin de realizar una evaluación significativa de la estructura, la estructura debe dividirse en grupos que tienen los siguientes aspectos en común (Jacobs et al., 2009; Torrent et al, 2012):

- Coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2)
- El mismo tipo de hormigón (condición de exposición, el tamaño máximo del árido, clase de resistencia)
- La misma práctica de construcción (colocación, compactación, curado)

El método de Torrent se ha encontrado que da buenos resultados representativos, que se correlacionan bien con otros métodos de ensayo de durabilidad (Romer, 2005; Torrent and Jacobs, 2009). El objetivo del método de Torrent es principalmente para el control de calidad covercrete final, que se ve afectada tanto por el diseño y la construcción práctica. Esto permite la detección precoz de los

casos de incumplimiento y aumenta el conocimiento concreto de calidad (Jacobs, 2006).

1.14 Conclusiones Parciales

- 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, constituyendo una medida de la durabilidad potencial de un hormigón dado.
- La estructura de los poros del hormigón en su estado endurecido, influye directamente en la capacidad de penetración del hormigón, y por lo tanto es de gran importancia para la durabilidad.
- Los cementos compuestos tienen un impacto positivo en el refinamiento de la estructura de poros del hormigón, lo que juega un papel fundamental en la impermeabilidad de la matriz cementicia.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

2.1 Introducción

Este capítulo se presenta el desarrollo experimental llevado a cabo para la evaluación de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica de hormigones fabricados con LC³ y sometidos a diferentes niveles de agresividad en Cayo Santa María y La Habana, describiendo las características de los materiales empleados, la metodología seguida en la elaboración de las diferentes dosificaciones de hormigones, los equipos y el procedimiento de los métodos de ensayos realizados.

Para la elaboración de los hormigones se utilizaron distintas dosificaciones con LC³ (SIG-B45) y cemento Pórtland (P-35) que fueron producidos en la EPI Remedios, provincia de Villa Clara.

Los ensayos de permeabilidad al aire por el método de Torrent y resistividad eléctrica se realizaron en el laboratorio de la Facultad de Construcciones en la Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas a los testigos extraídos del sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María y La Habana.

2.2 Diseño experimental de las mezclas de hormigón para los especímenes.

En la presente investigación, para evaluar la influencia de la permeabilidad al aire de hormigones fabricados con LC³, se desarrolló un diseño experimental multifactorial como se muestra a continuación:

1. Selección de las materias primas para la producción de hormigones hidráulicos.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

2. Diseño de mezclas de hormigón hidráulico para la lograr la consistencia fijada.
3. Fabricación de mezclas de hormigón hidráulico para la lograr la consistencia fijada.
4. Producción de los diferentes elementos estructurales de hormigón armado en planta.
5. Extracción de testigos de los elementos estructurales producidos luego de ser expuestos durante dos años en el sitio de exposición en Cayo Santa María sometidos a un ambiente marino de agresividad muy alta.
6. Aplicación del Método de Torrent a los testigos de hormigón extraídos del sitio de exposición.
7. Análisis de los resultados obtenidos.

Para darle cumplimiento al objetivo general las acciones que se realizaron comenzaron en la etapa 5 pues las anteriores fueron tomadas de otras investigaciones.

2.3 Especímenes fabricados en la EPI, Villa Clara

2.3.1 Caracterización de los materiales componentes de las mezclas de hormigón a emplear en la EPI.

Para la recopilación de la información necesaria para el cumplimiento del objetivo general se tomaron las caracterizaciones de los materiales y los resultados de la investigación realizada por Pérez, 2015.

2.3.1.1 Cementos

Se utilizaron dos tipos de cementos: el cemento de bajo carbono SIG-B45 de la fábrica de Siguaney y el P-35 de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

El análisis químico del SIG-B45, realizado en la propia fábrica de cemento, se muestran a continuación:

Tabla 2.1: Análisis químico del cemento SIG-B45

Compuesto químico	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	SO₃	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 fueron caracterizados por la NC 95:2011 para evaluar su conformidad. Las características físico-mecánicas fundamentales de los aglomerantes se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Características físico-mecánicas de los cementos

Ensayos	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	%	0,10	—
Peso específico real del cemento	g/m ³	—	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

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

2.3.1.2 Áridos

El árido grueso empleado es un árido de machaqueo de origen calizo procedente de la cantera Raúl Cepero Bonilla (Palenque), fracción 19 -10 mm. En el caso de los áridos finos fueron utilizados dos: polvo de piedra de la cantera Palenque y arena de la cantera el Purio, esta última solo fue utilizada en la dosificación correspondiente a la viga V-7 perteneciente a la producción de nuevas vigas para la reparación de puentes del pedraplén Caibarién - Cayo Santa María. La caracterización de estos materiales se recoge en las tablas 2.3 y 2.4.

Se evaluó la conformidad de los áridos según la NC-251 del 2005 “Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”. Los ensayos para caracterizar estos materiales se realizaron según las normas cubanas granulometría (NC-178, 2002), partículas de arcilla (NC 179: 2002), peso específico y absorción (NC 187, 2002) y material más fino que el tamiz 200 (NC 200: 2002), dichos ensayos fueron realizados por la ENIA Villa Clara.

Tabla 2.3: Características físico-mecánicas de los áridos gruesos (EPI)

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	g/cm ³	2,52
Peso Específico Saturado	g/cm ³	2,57
Peso Específico Aparente	g/cm ³	2,67
Absorción	%	2,3
Masa Volumétrica Suelta	kg/cm ³	1387
Masa Volumétrica Compactada	kg/cm ³	1530

Fuente: Pérez, 2015

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.4: Características físico-mecánicas de los áridos finos (EPI)

Ensayos	UM	Cantera Palenque	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	g/cm ³	2,52	2,52
Peso Específico Saturado	g/cm ³	2,59	2,59
Peso Específico Aparente	g/cm ³	2,72	2,72
Absorción	%	3,0	3,0
Masa Volumétrica Suelta	kg/cm ³	1563	1563
Masa Volumétrica Compactada	kg/cm ³	1709	1709

Fuente: Pérez, 2015

2.3.1.3 Granulometría de los áridos.

Para determinar la curva granulométrica de los áridos se procedió según la NC 178:2002, cuyos resultados se muestran en la tabla 2.5.

2.3.1.4 Agua de amasado

Para el amasado se utilizó agua potable ya que según la NC 353:2004 “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”, se plantea apto el uso de agua potable para el amasado y curado de los hormigones y morteros, provenientes de acueductos y otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.5: Granulometría de los áridos (EPI)

Tamiz (mm)	% Pasado		
	Gravilla	Polvo	Arena Purio
25,4	100	—	—
19,1	58	—	—
12,7	1	—	—
9,52	0	100	100
4,76	—	99	99
2,38	—	70	79
1,19	—	46	53
0,595	—	28	31
0,297	—	17	15
0,15	—	11	5
0,08	—	7	—

Fuente: Pérez, 2015

2.3.1.5 Aditivo

Se empleó el aditivo superplastificante Dynamon SX-32, aditivo a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehído, constituye un superfluidificante para hormigones preparados con bajísima pérdida de trabajabilidad y elevada reducción de agua de amasado. Sus principales propiedades son el aumento de la trabajabilidad del hormigón, logrando reducir la relación a/c, proporcionando la adecuada permeabilidad y alta resistencia mecánica.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

La dosificación para este producto en volumen puede variar entre 0,5 y 1,5 litros por cada 100 kg de cemento. Los datos del suministrador, MAPEI, se presentan en la tabla 2.6:

Tabla 2.6: Características del aditivo Dynamon SX-32

Condición química	Base de polímeros no sulfonados
Densidad (g/cm³)	1,08 ± 0,02 a 20° C
pH	6,5 ± 1
Residuo seco (%)	22,1 ± 1,1
Contenido de cloruro (%)	< 0,1
Contenido de Alcali (Na₂O) equivalente (%)	< 3,5
Clasificación	Superfluidificante

Fuente: Pérez, 2015

2.3.2 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones de la EPI.

En la elaboración de hormigones es necesario que los mismos presenten determinadas características como la trabajabilidad, durabilidad y resistencia requerida, para lo cual se debe determinar la proporción óptima que deben tener todos sus componentes.

Para lograr la dosificación requerida se usan varios métodos (Mahmoud Abdelkader, 2010):

- Los basados en la resistencia a compresión: A.C.I. para hormigones convencionales, A.C.I. para hormigones secos, La Peña, O'Reilly.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

- Los basados en el contenido de cemento: Fuller, Bolomey, Faury.

Para los hormigones de la EPI Remedios se empleó el método O'Reilly, ya que el mismo fue creado para ajustarse a los áridos de nuestro país, para la dosificación de las mezclas, el cual se basa en la obtención de la resistencia a compresión deseada.

La dosificación elegida corresponde 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 120:2007 "Hormigón hidráulico. Especificaciones" como consistencia fluida. A continuación, en la tabla 2.7 y 2.8 se muestran las dosificaciones adoptadas.

Tabla 2.7: Dosificaciones empleadas en la elaboración de los hormigones (EPI)

Materiales	Dosificación gravimétrica (kg)		Dosificación gravimétrica (m ³)		Gasto de materiales por m ³	
	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa
Cemento SIG-B45	330	360	1	1	0,33	0,360
Polvo 5 – 0 mm Palenque	807	780	1,841	1,633	0,538 m ³	0,520 m ³
Gravilla 19 – 10 Palenque	1069	1034	2,716	2,346	0,793 m ³	0,747 m ³
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
Relación a/c Amasado	0,47	0,47	—	—	—	—
Relación a/c Efectiva	0,40	0,4	0,4	—	—	—

Fuente: Pérez, 2015

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.8: Dosificaciones implementadas en elementos de la EPI, Villa Clara

Identif	Resistencia	Cemento (kg/m³)	a/c	Arido Fino	Arido Grueso	Aditivo (L/m³)
DA-LCC	25 MPa	360	0,61	Palenque	Palenque	4,04
D10-P35	25 MPa	300	0,57	Palenque	Palenque	2,8
D4-LCC	25 MPa	360	0,47	Palenque	Palenque	4,04
D3-LCC	20 MPa	330	0,47	Palenque	Palenque	3,7
D9-P35	20 MPa	270	0,59	Palenque	Palenque	2,8

Fuente: Pérez, 2015

La cantidad de agua y aditivo puede variar a que se utilizan distintos tipos de cementos. Para lograr la consistencia deseada se debe entonces fijar como punto de comienzo una relación de a/c efectiva de 0.4 y un porcentaje de aditivo de 0.5% como recomiendan los fabricantes de dicho producto.

Para el control y cumplimiento de estas dosificaciones se establece el muestreo del hormigón fresco por calidades y que en cada ensayo se represente el volumen del elemento fundido de acuerdo a sus características y complejidad.

Una vez elaborados los bloques de hormigón fueron colocados en el sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María.

2.4 Especímenes fabricados en el CIDC, La Habana.

2.4.1 Caracterización de los materiales componentes de las mezclas del hormigón fabricado en el CIDC.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

2.4.1.1 Cementos

Se emplearon dos tipos de cementos, Pórtland (P-35) producido en la fábrica de cemento Carlos Marx de Cienfuegos y LC³ (SIG-B45) de la fábrica de Siguaney. Para el SIG-B45 se utilizó una finura de molido diferente de 83,6 % y 96,4 %. Sus características se muestran en las tablas 2.1 y 2.2.

2.4.1.2 Áridos

Los áridos se obtuvieron de las canteras Alacranes y Victoria de La Habana. El árido grueso obtenido de la cantera Alacranes es un árido triturado de origen calizo y el árido fino de la cantera Victoria es una arena lavada. En la tabla 2.9 se muestran sus características físico-mecánicas.

Tabla 2.9: Características físico-mecánicas de los áridos (CIDC)

Ensayos	UM	Cantera Victoria	Cantera Alacranes
Peso específico corriente	g/cm ³	2,59	2,59
Peso específico saturado	g/cm ³	2,62	2,61
Peso específico aparente	g/cm ³	2,67	2,63
Absorción	%	1,12	0,67
Masa volumétrica suelta	kg/cm ³	1471	1357
Masa volumétrica compactada	kg/cm ³	1586	1454

Fuente: CIDC, 2016

2.4.1.3 Granulometría de los áridos

Para determinar la curva granulométrica de los áridos se procedió según la NC 178:2002, obteniendo los siguientes resultados:

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.10: Granulometría de los áridos (CIDC)

Tamiz (mm)	% Pasado	
	Cantera Victoria	Cantera Alacranes
25,4	--	--
19,1	--	100
12,7	--	99
9,52	100	66
4,76	98	1
2,38	83	0
1,19	69	--
0,595	56	--
0,297	36	--
0,15	14	--
0,08	0	--

Fuente: CIDC, 2016

2.4.1.4 Agua de Amasado

Se utilizó agua potable ya que según la NC 353:2004 “Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”, se plantea apto el uso de agua potable para el amasado y curado de los hormigones y morteros, provenientes de acueductos y otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos.

2.4.1.5 Aditivos

Se utilizó el aditivo superfluidificante GENIOTEC SF/20, clasificado por el fabricante como tipo F según la norma ASTM C 494. Este aditivo se agrega al hormigón hidráulico inmediatamente después de su mezclado, para obtener en estado fresco el incremento de su consistencia sin variar el contenido de agua, y en estado endurecido mayores resistencias, impermeabilidad y durabilidad. Las características de este aditivo se muestran en la tabla 2.10.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.11: Características del aditivo GENIOTEC SF/20

Estado Físico	Líquido
Color	Carmelita oscuro
Contenido de sustancia seca (%)	40 ± 1
Densidad (g/cm³)	1,20 ± 0,02
Valor de pH	10 ± 1
Solubilidad en agua destilada (% sólido insoluble)	0,99
Solubilidad en agua de cal (% sólido insoluble)	2
Contenido de cloruros (%)	0,01 – 0,03

Fuente: CIDC, 2016

2.4.2 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigón del CIDC

Para las dosificaciones de empleo el método Toufar, basado en el cálculo de los componentes a partir de optimizar los contenidos de áridos en la mezcla de hormigón. El diseño se muestra en la tabla 2.11.

Tabla 2.12: Dosificación utilizada en las mezclas de hormigón (CIDC)

Materiales	Dosificaciones gravimétricas (kg)	
	P-35	LC³
Cemento	70,9	68,68
Arena de Victoria	131,73	131,73
Granito 13 – 5 de Alacranes	170,75	170,75
Agua	29,78	28,85
Aditivo GENIOTEC SF/20	0,908	1,717
R. a/c Amasada	0,42	0,42
R. a/c Efectiva	0,42	0,42

Fuente: CIDC, 2016

Las mezclas elaboradas en el CIDC fueron mezcladas en una mezcladora basculante con capacidad para 80 L, la secuencia de introducción de los materiales en la misma fue: granito, arena, cemento agua y aditivo. La compactación fue realizada en mesa vibrante en dos capas en tiempos aproximados de 7 segundos

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

cada capa. Se utilizó cámara de curado con humedad relativa mínima de 95% y temperatura de 23 ± 2 °C según indica la norma NC 221: 2002 “Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos”

Se elaboraron 14 probetas cilíndricas con cemento remolido de bajo carbono LC³ (SGR) y 15 probetas patrones cilíndricos con cemento Pórtland P-35 (P). Todas las probetas cilíndricas eran de 150x300 mm.

2.5 Ensayos y procedimientos

2.5.1 Extracción y preparación de los especímenes de hormigón.

Los testigos de hormigón fueron extraídos del sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María mediante un extractor de testigos (Fig. 2.1)



Fig. 2.1: Extracción de testigos (González, 2015)

Luego fueron hermetizados con papel retráctil (Fig. 2.2), para la transportación al laboratorio donde se realizarán las pruebas pertinentes.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica



Fig. 2.2: Testigos hermetizados (González, 2015)

Las especificaciones de los testigos se encuentran en la tabla 2.13

Tabla 2.13: Especificaciones de los testigos extraídos del sitio de exposición de Cayo Santa María

No.	Identif.	Dosif.	Resist. (MPa)	Cemento (kg)	a/c	Asent. (cm)	Fecha	F'c (28 días)
1	M-25	D4-LCC	25	360 (LC ³)	0,47	12	6/2/2014	30,77
2	M-30	D3-LCC	20	330 (LC ³)	0,47	11	8/2/2014	24,40
3	M-32	D10-P35	25	300 (P35)	0,4	8	10/2/2014	27,90
4	M-35	D9-P35	20	270 (P35)	0,59	9	11/2/2014	26,80
5	M-381	DA-LCC	25	360 (LC ³)	0,47	8	1/11/2013	31,40

Fuente: Pérez, 2015

2.5.2 Medición de la permeabilidad por el método de Torrent.

El permeabilímetro Torrent se fabricó en base a investigaciones desarrolladas por el centro de investigación Holderbank de Suiza. El resultado de estas mediciones realizadas tanto en laboratorio como in situ concuerda plenamente con otras pruebas de laboratorio como la permeabilidad al oxígeno, la succión capilar, la penetración de cloruros, etc. (Proceq, 2007)

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

2.5.2.1 Preparación de los testigos

Para realizar el ensayo, los testigos son secados a 105 °C en una estufa por 24 horas, luego se enfrían a temperatura ambiente.

2.5.2.2 Descripción del método

El equipo está compuesto por una doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda, consiste en una cámara interna *i* y una externa, para mantener ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$) tiene un regulador de presión a membrana (Fig. 2.3)

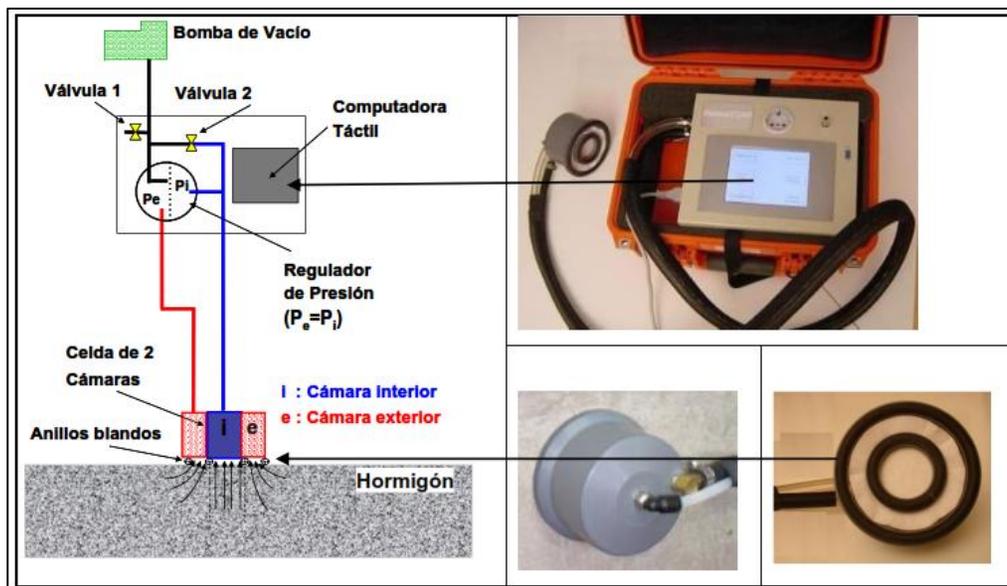


Fig. 2.3: Esquema y detalles del "Método Torrent" (Torrent, 2010)

Procedimiento operacional del equipo

Crear vacío en ambas cámaras mediante la bomba, manteniendo la válvula 1 abierta y la 2 cerrada.

Cuando la presión P_i baja a ~30 mbar se cierra la válvula 2, momento a partir del cual la bomba solo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

externa, de manera de equilibrar en todo momento la presión en ambas cámaras. De este modo, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado por la cámara exterior. Así se logra que el flujo de aire hacia la cámara central sea básicamente unidireccional y no afectado por el ingreso espurio de aire.

La evolución de la presión P_i se mide a partir de los 60 s con un sensor de presión comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro.

El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al fin del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2).

El fin del ensayo acontece cuando la elevación de la presión en la cámara interna P_i alcanza 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables cuando han transcurrido 360 s desde el comienzo del ensayo. El microprocesador es capaz de almacenar los datos de los ensayos y la información puede ser transferida a una PC para su posterior análisis y registro.

La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire a la presión atmosférica.

Tabla 2.14: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT

Clasificación	kT ($10^{-6}m^2$)	Permeabilidad
PK1	<0,01	Muy Baja
PK2	0,01-0,1	Baja
PK3	0,1-1,0	Moderada
PK4	1,0-10	Alta
PK5	>10	Muy Alta

Fuente: Torrent, 2013



Fig. 2.4: Medición de la permeabilidad al aire (Tomada por el autor)

2.5.3 Medición de la resistividad eléctrica a los testigos de hormigón.

2.5.3.1 Preparación de los testigos

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 necesario humedecer la superficie. (Proceq, 2015)

2.5.3.2 Descripción del ensayo

Luego de humedecidas las muestras, se procede a secar superficialmente los testigos (Fig. 2.5) y se realizan cuatro mediciones (en diferentes posiciones) a cada uno y se obtiene como resultado el promedio de las mismas. Es necesario tomar la

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

humedad relativa y la temperatura a la que se realiza el ensayo para realizar las correcciones pertinentes. (Temperatura = 24,3°C; Humedad relativa = 5,5%)



Fig. 2.5: Secado de los testigos (Tomada por el autor)



Fig. 2.6: Medición de la resistividad eléctrica superficial (Tomada por el autor)

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.15: Estimación de la velocidad y probabilidad de corrosión

Estimación de la velocidad de corrosión	
> 20 kΩ cm	Velocidad de corrosión Baja
> 10 - 20 kΩ cm	Velocidad de corrosión Baja o moderada
5 - 10 kΩ cm	Velocidad de corrosión Alta
< 5 kΩ cm	Velocidad de corrosión Muy Alta
Estimación de la probabilidad de corrosión	
≥ 100 kΩ cm	Riesgo de corrosión insignificante
50 - 100 kΩ cm	Bajo riesgo de corrosión
10 - 50 kΩ cm	Riesgo de corrosión moderado
≤ 10 kΩ cm	Alto riesgo de corrosión

Fuente: Proceq, 2015

2.6 Resultados obtenidos

2.6.1 Permeabilidad al aire. Método de Torrent.

A continuación, se muestran los resultados de la prueba de permeabilidad al aire realizada a los testigos extraídos del sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María y La Habana.

Tabla 2.16: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de Cayo Santa María. Método de Torrent.

Probetas		% de Humedad		kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	Permeabilidad
		Cara Inferior (2)	Cara Superior (1)		
M-25	M-25 (1)		3	0,033	Baja
	M-25 (2)	4,2			
M-30	M-30 (1)		4,1	0,033	Baja
	M-30 (2)	3,2			
M-32	M-32 (1)		4	0,15	Moderada
	M-32 (2)	3,9			
M-35	M-35 (1)		3,8	0,173	Moderada
	M-35 (2)	4,2			
M-381	M-381 (1)		3,9	0,041	Baja
	M-381 (2)	3,8			

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

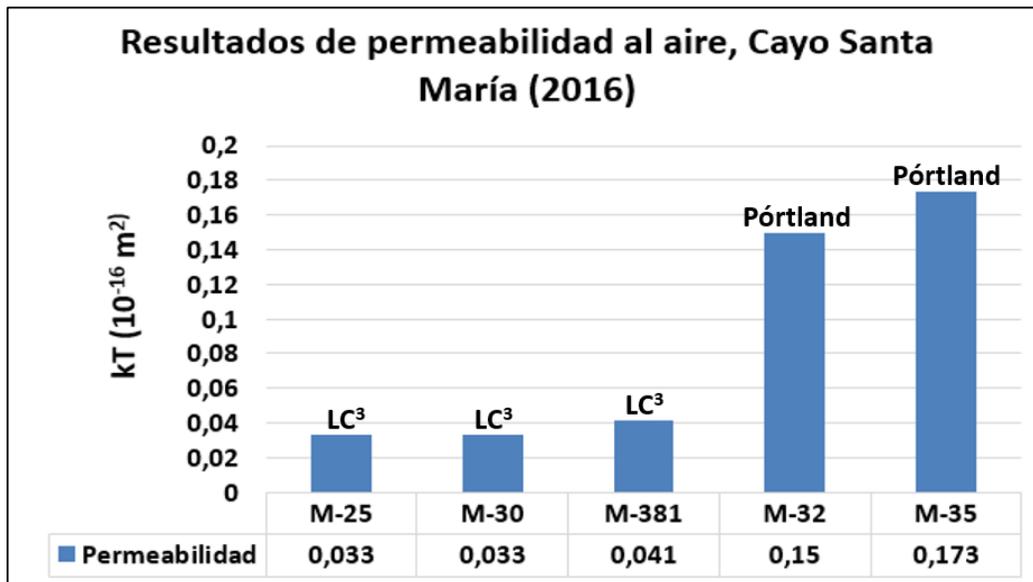


Figura 2.7: Valores medios de permeabilidad al aire de las muestras de Cayo Santa María. Método de Torrent.

Tabla 2.17: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 0 días de curado. Método de Torrent

Probetas		% de Humedad	kT (10^{-16} m^2)	kT (Promedio global)	Permeabilidad
P17-1	P17-1 (1)	4	1,49	1,58	Alta
	P17-1 (2)	3,4			
P17-2	P17-2 (1)	4,5	1,47		
	P17-2 (2)	3,5			
P17-3	P17-3 (1)	4,1	1,585		
	P17-3 (2)	3,5			
P17-4	P17-4 (1)	4,2	1,76		Alta
	P17-4 (2)	3,5			
SGR-1	SGR-1 (1)	3,7	0,13	0,23	Moderada
	SGR-1 (2)	4,1			
SGR-2	SGR-2 (1)	4,3	0,32		
	SGR-2 (2)	3,4			
SGR-3	SGR-3 (1)	3,8	0,24		Moderada
	SGR-3 (2)	4			

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

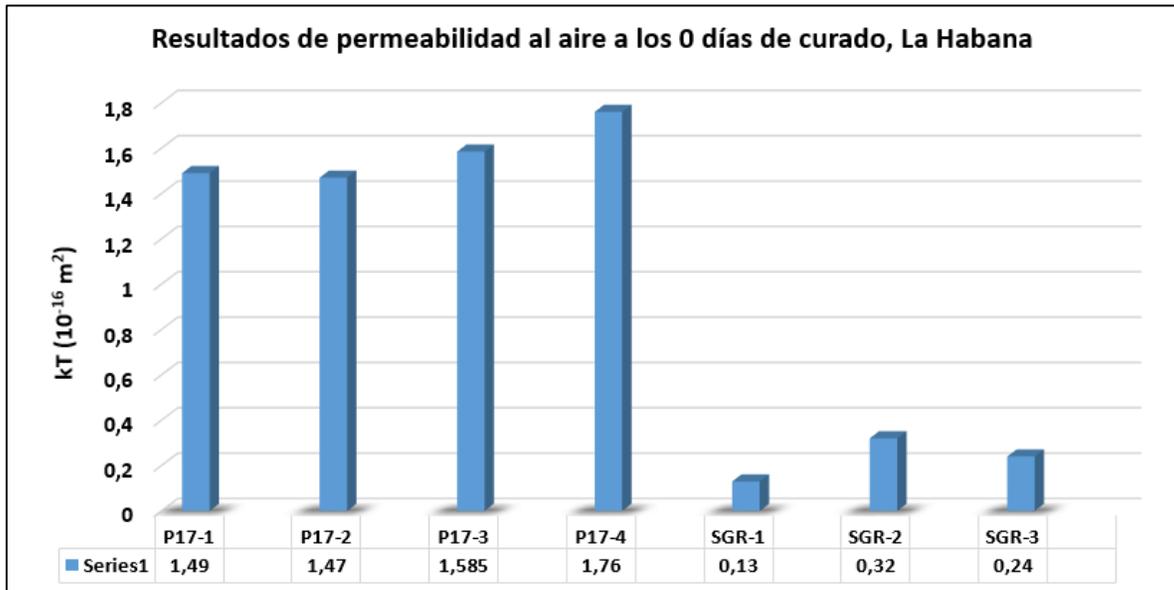


Fig. 2.8: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 0 días de curado. Método de Torrent.

Tabla 2.18: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 3 días de curado. Método de Torrent

Probetas		% de Humedad	kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	kT (Promedio global)	Permeabilidad				
P17-1	P17-1 (1)	4,5	0,45	0,89	Moderada				
	P17-1 (2)	3,6							
P17-2	P17-2 (1)	4	1,2		0,89	Alta			
	P17-2 (2)	3,8							
P17-3	P17-3 (1)	4,3	0,5			0,89	Moderada		
	P17-3 (2)	3,4							
P17-4	P17-4 (1)	4,5	1,1				0,89	Alta	
	P17-4 (2)	3,5							
P17-5	P17-5 (1)	3,8	1,2					0,89	Alta
	P17-5 (2)	3,2							
SGR-1	SGR-1 (1)	4,1	0,06	0,08					Baja
	SGR-1 (2)	3,8							
SGR-2	SGR-2 (1)	3,6	0,08		0,08				Baja
	SGR-2 (2)	3,2							
SGR-3	SGR-3 (1)	4,3	0,09			0,08			Baja
	SGR-3 (2)	3,7							
SGR-4	SGR-4 (1)	4,1	0,08				0,08		Baja
	SGR-4 (2)	3,4							

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

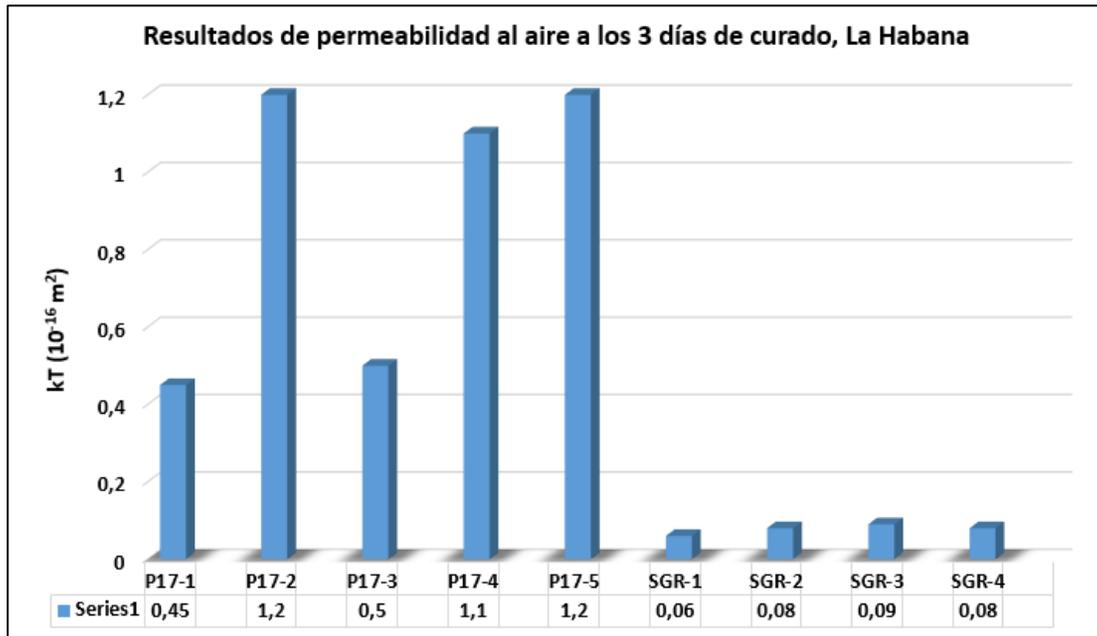


Fig. 2.9: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 3 días de curado. Método de Torrent.

Tabla 2.19: Resultados de las pruebas de permeabilidad al aire de las muestras de La Habana para 28 días de curado. Método de Torrent

Probetas		% de Humedad	kT (10 ⁻¹⁶ m ²)	kT (Promedio global)	Permeabilidad
P17-1	P17-1 (1)	4,5	0,31	0,33	Moderada
	P17-1 (2)	3,8			
P17-2	P17-2 (1)	4	0,35		
	P17-2 (2)	3,3			
P17-3	P17-3 (1)	4,3	0,5		
	P17-3 (2)	3,4			
P17-4	P17-4 (1)	4,1	0,14		Moderada
	P17-4 (2)	3,5			
SGR-1	SGR-1 (1)	3,7	0,05	0,05	Baja
	SGR-1 (2)	-			
SGR-2	SGR -2 (1)	3,4	0,05		
	SGR-2 (2)	3			
SGR-3	SGR-3 (1)	4	0,04		Baja
	SGR-3 (2)	3,6			
SGR-4	SGR-4 (1)	3,5	0,06		Baja
	SGR-4 (2)	-			

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

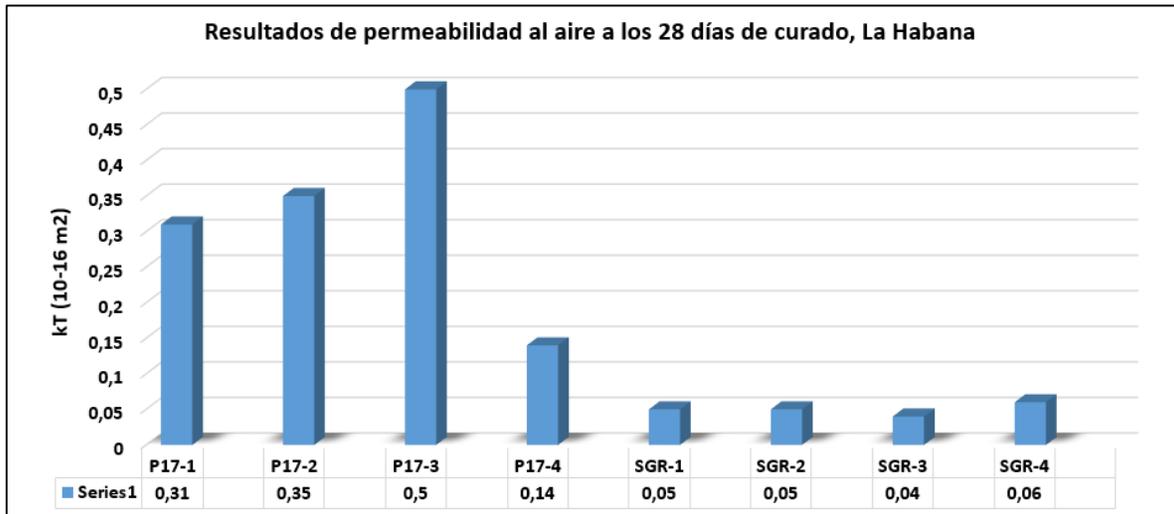


Fig. 2.10: Valores medios de permeabilidad de las muestras de La Habana para 28 días de curado. Método de Torrent.

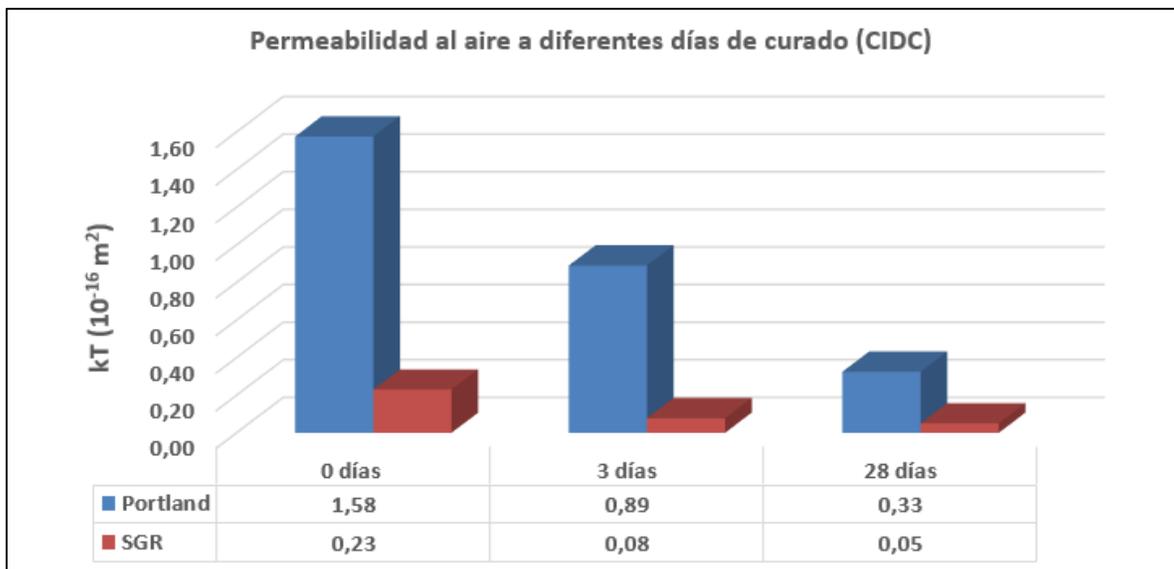


Fig. 2.11: Promedios globales de permeabilidad al aire (CIDC)

2.6.2 Ensayo de resistividad.

Los resultados de las pruebas de resistividad eléctrica se muestran en la siguiente tabla.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

Tabla 2.20: Resultados de los ensayos de resistividad eléctrica superficial de las muestras de Cayo Santa María.

Probetas	Valor Promedio (kΩ cm)	Probabilidad de Corrosión	Velocidad de corrosión
M-25	18,2	Riesgo Moderado	Baja o Moderada
M-30	15	Riesgo Moderado	Baja o Moderada
M-32	6,3	Alto Riesgo	Alta
M-35	11,6	Riesgo Moderado	Baja o Moderada
M-381	18,5	Riesgo Moderado	Baja o Moderada

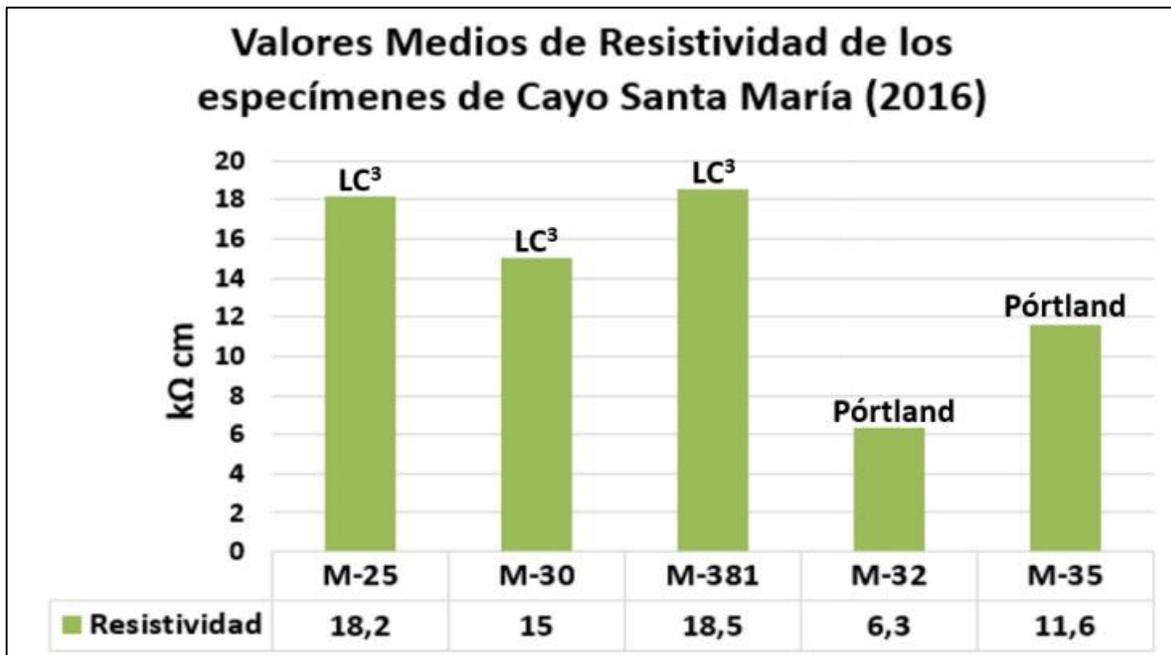


Fig. 2.12: Valores medios de resistividad eléctrica superficial

2.7 Conclusiones Parciales

- El método experimental utilizado permitió la obtención de los valores de permeabilidad al aire en las muestras patrones y experimentales, las cuales estaban sometidas a regímenes de agresividad diferentes.

Capítulo II: Descripción de los materiales utilizados en la elaboración del hormigón y los métodos empleados para la obtención de la permeabilidad al aire y resistividad eléctrica

- Las muestras elaboradas con LC³ de ambos regímenes de agresividad presentan menor permeabilidad al aire que los hormigones con cemento Portland
- Las muestras sometidas un régimen de agresividad muy alto presentan iguales resultados de resistividad eléctrica superficial con excepción de M-32 (Pórtland) que presenta alto riesgo y elevada velocidad de corrosión.

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³

3.1 Introducción

Este capítulo presenta el análisis de los resultados de la medición de la permeabilidad al aire de los hormigones fabricados con LC³ fabricados en la EPI, Villa Clara y en el CIDC en La Habana. Se realiza el análisis de la variación de la permeabilidad al aire de los hormigones durante el período 2015-2016, se logra evaluar influencia del tiempo de curado del hormigón sobre la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón. Además, se correlaciona la permeabilidad al aire con los ensayos de resistividad eléctrica superficial y de la carbonatación en muestras de hormigón.

3.2 Análisis de los resultados de los hormigones producidos en la EPI, Villa Clara

3.2.1 Análisis de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones elaborados con LC³ en la EPI, Villa Clara, en el período 2015-2016

La figura 3.1 muestra los resultados del ensayo de permeabilidad al aire al aplicar el método de Torrent de especímenes extraídos del sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María en el año 2016. Como se puede observar los hormigones fabricados con cemento LC³ (M-25, M-30 y M-381) muestran un comportamiento menos permeable, ya que presentan un valor de permeabilidad al aire bajo según tabla 2.14, siendo menor que en el caso de las mezclas M-32 y M-35 las cuales presentan una permeabilidad moderada siendo elaboradas estas con cemento Pórtland (P-35).

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³

Para explicar este comportamiento se analizaron los principales factores que afectan la permeabilidad al aire los cuales se exponen en el capítulo 1. Es importante destacar que las muestras fueron sometidas a similar régimen de curado, compactación y expuestas a un nivel de agresividad muy alta, además, las dosificaciones y procedencia de los agregados coinciden; descartándose su influencia en los resultados de la permeabilidad.

Si se analizan los factores que variaron se tiene la relación a/c , pues según Richardson (2002), se considera uno de los parámetros más importantes para el desarrollo de la resistencia y la reducción de la permeabilidad del hormigón. En este caso, el contenido de cemento se refiere a una combinación de ambos cementos Portland y extensores de cemento. Una baja relación a/c lleva a la alta resistencia del hormigón e impermeabilidad, siempre que la práctica de la construcción sea de una alta calidad (Richardson, 2002; Grieve, 2009; Neville y Brooks, 2010). Para pastas de cemento del mismo grado de hidratación, un incremento en los resultados de la relación de a/c aumenta la permeabilidad del hormigón (Powers et al, 1954; Ollivier et al., 1995). En el caso de los especímenes elaborados con un cemento LC³ presentan una menor relación a/c que el utilizado en el caso del cemento Portland, aunque el hormigón denominado M-381 presenta la mayor relación a/c , aunque esto pudo haber sido compensado por la cantidad y tipo de cemento.

Según Vizcaíno (2014), los sistemas ternarios clínquer-arcilla calcinada-caliza (como el LC³) presentan mayor finura que los OPC. La finura del cemento se determina por el método de Blaine (m^2/kg), donde los valores más altos corresponden a cementos de mayor finura, los cuales a su vez que poseen mayor superficie de contacto (Taylor, 1990). Las partículas de cemento gruesas dan como resultado una pasta de mayor porosidad que las partículas más finas (Powers et al., 1954). Por lo tanto, en muestras elaboradas con LC³ se forma una pasta de cemento de menor permeabilidad, además, la cantidad de cemento utilizada en estos especímenes es mayor con relación a las muestras patrones.

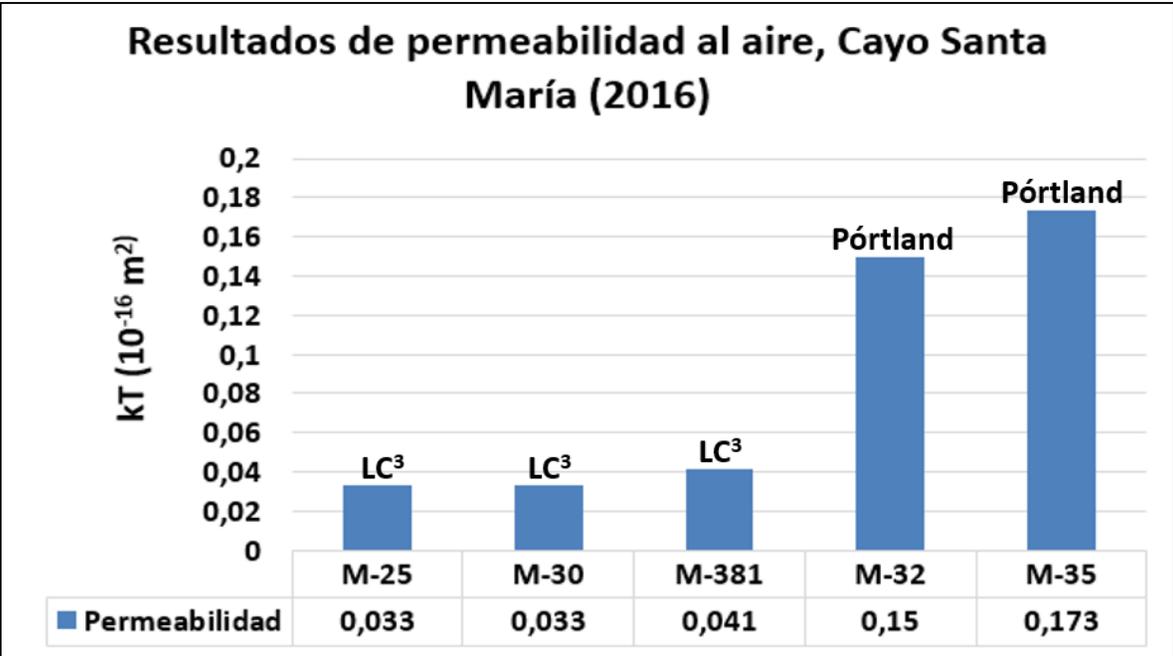


Fig. 3.1: Resultados de permeabilidad al aire de los especímenes extraídas de Cayo Santa María en el 2016

Al comparar estos resultados de permeabilidad al aire con los obtenidos en el año 2015 (figura 3.2), donde se analizaron los especímenes M-25, M-30, M-32 y M-381, se observa un aumento ligero de los valores permeabilidad al aire de las muestras M-25 y M-381 y una disminución en la M-30. Estos aumentos no significativos reportan una permeabilidad de muy baja a baja, lo cual puede estar asociado a la presencia de humedad cercana al 5% en la masa de hormigón, estado de la superficie de los especímenes y a la determinación de una única medición por muestra. No obstante, en el caso del hormigón M-32 con cemento Pórtland, el aumento de la permeabilidad no supera los valores establecidos de permeabilidad moderada.

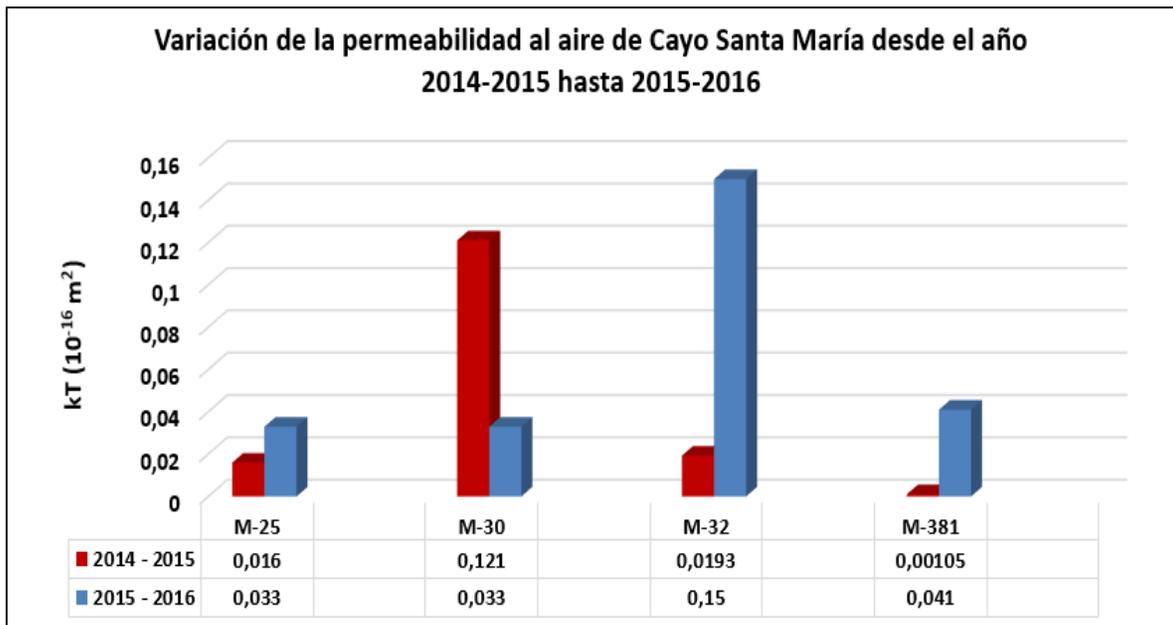


Fig. 3.2: Comparación entre los niveles de permeabilidad del período 2014-2015 y 2015-2016

3.2.2 Comportamiento de la permeabilidad al aire *versus* resistividad eléctrica superficial en hormigones de Villa Clara

La figura 3.3 muestra los resultados de resistividad eléctrica superficial de las probetas extraídas del sitio de exposición de Cayo Santa María del período (2015-2016). A medida que la resistividad disminuye, aumenta la permeabilidad, lo cual conduce al aumento de la velocidad de ocurrencia de la corrosión del hormigón armado.

Esto se corrobora con la figura 3.1 donde se muestran los resultados de permeabilidad al aire de los mismos especímenes, donde el M-32 y el M-35 (P-35) presentan los mayores coeficientes de permeabilidad y los menores de resistividad eléctrica. Por lo tanto, los hormigones fabricados con cemento de bajo carbono LC³ (M-25, M-30 y M-381), son menos permeables y presentan un mejor comportamiento frente a la corrosión.

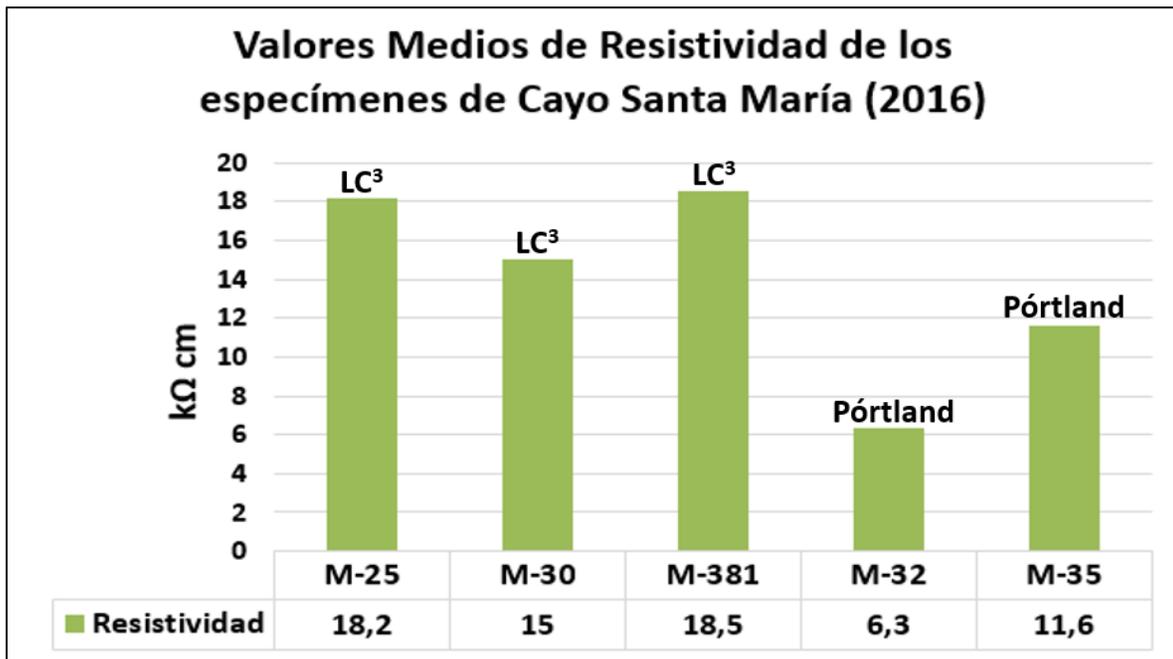


Fig. 3.3: Valores medios de resistividad de las muestras de Cayo Santa María, 2016

3.2.3 Análisis de la permeabilidad al aire versus carbonatación de los especímenes de la EPI de Villa Clara

Para el análisis de la carbonatación se ensayaron los especímenes M-32, M-25 y M-381 cuyos resultados se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Profundidad de carbonatación de las muestras de Villa Clara, 2016 (Licor, 2016)

Muestra	Tipo de Cemento	Carbonatación (mm)
M-32	Pórtland (P-35)	5,275
M-25	LC3	3,175
M-381	LC3	2,1875

Fuente: Licor, 2016

Como se observa en la figura 3.4 el M-32, fabricado con cemento Portland manifiesta una mayor permeabilidad que el M-25 y M-381 (LC³), lo que da como resultado una mayor profundidad de carbonatación del M-32 debido a la relación

directa con la permeabilidad, a criterio del autor el cual se basó en lo planteado por Rodríguez (2013).

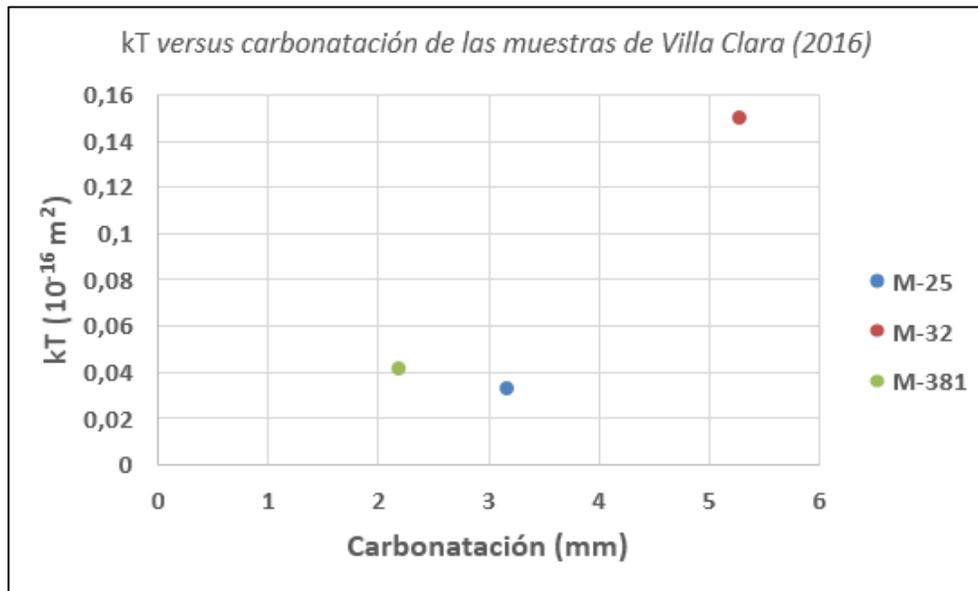


Fig. 3.4: Análisis de la Permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras de Villa Clara, durante el período 2015-2016

3.3 Análisis de los resultados de los hormigones producidos en el CIDC, La Habana

3.3.1 Análisis de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones elaborados en el CIDC, La Habana, en el período 2015-2016

Las muestras de CIDC de La Habana, al igual que las de Cayo Santa María en Villa Clara, fueron sometidas a un similar régimen de curado, compactación, aunque las mismas son producidas con constituyentes de diversa procedencia y expuestas a un nivel de agresividad diferente.

En la figura 3.5 se observa el comportamiento de la permeabilidad al aire en los especímenes de cemento Pórtland y LC³ analizados para edades de curado de 0, 3 y 28 días, colocados en la sala de carbonatación del CIDC, La Habana.

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³

El curado se consigue mediante el mantenimiento de condiciones de humedad y temperatura adecuada. Esto permite un alto grado de hidratación, y por lo tanto un aumento de la resistencia y la impermeabilidad (Neville, 1981; Grieve, 2009). Esta mejora se explica por el aumento del volumen del grano del cemento a través de la hidratación, y el efecto de bloqueo de los poros y la segmentación de la red de poros (Neville, 1981; Richardson, 2002; Neville y Brooks, 2010).

Como se puede apreciar a medida que incrementa el tiempo de curado, disminuye el coeficiente de permeabilidad (kT) de dichos especímenes.

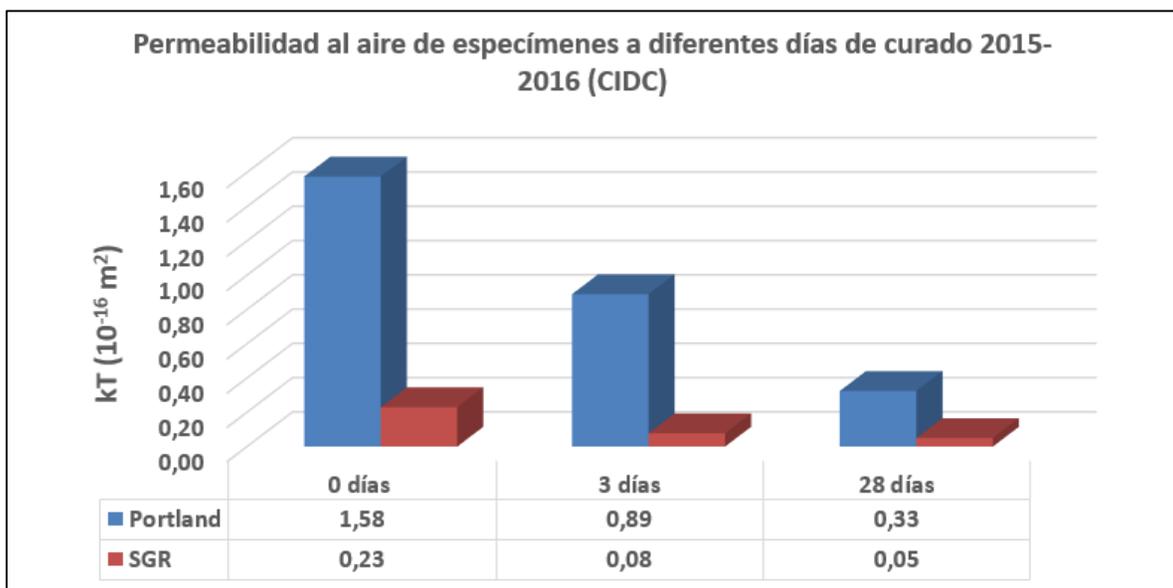


Fig. 3.5: Valores de permeabilidad al aire de los especímenes del CIDC, durante el período 2015-2016

Los valores de permeabilidad al aire del hormigón fabricado con un cemento LC³ resultan menores que en los hormigones fabricados con un cemento Portland (P-35) debido a lo antes comentado en el epígrafe 3.2.1. Al comparar estos resultados con el año anterior (Fig. 3.6) se observa una disminución del coeficiente de permeabilidad, tanto de los especímenes elaborados con un cemento LC³ como del Portland, pero los elaborados con LC³ presentan menores valores de permeabilidad,

lo cual corrobora que los hormigones fabricados con un cemento de bajo carbono (LC³) logran inferiores índices de permeabilidad al aire.

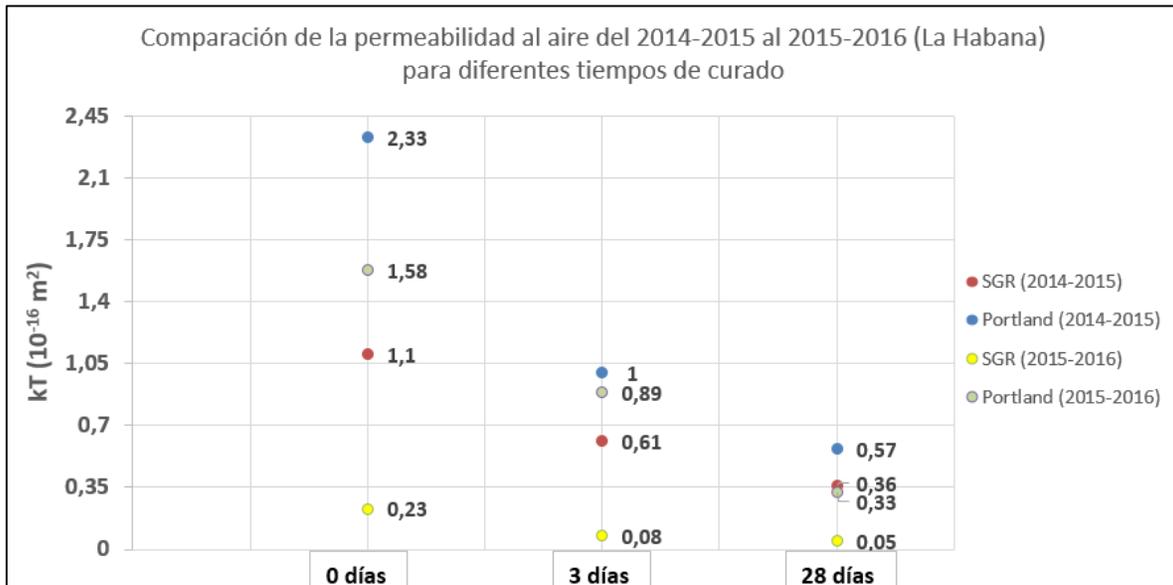


Fig. 3.6: Comparación de la variación de la permeabilidad al aire de hormigones de la EPI del período 2014-2015 al 2015-2016

3.3.2 Análisis de la permeabilidad al aire *versus* carbonatación de los especímenes del CIDC de La Habana

Las figuras 3.7 y 3.8 muestran la comparación entre los resultados de carbonatación y permeabilidad al aire al aplicar el método de Torrent en las probetas elaboradas en el CIDC. Como se puede observar los especímenes elaborados con LC³ son menos permeables que los producidos con cemento Portland, no obstante, en el comportamiento de la carbonatación se produce lo contrario.

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³

Tabla 3.2: Profundidad de carbonatación de la muestras del CIDC, 2016 (Licor, 2016)

Probetas	Carbonatación (mm)		
	Curado de 0 días	Curado de 3 días	Curado de 28 días
Pórtland	0,81	0,37	0,13
LC ³	9,58	8,68	5,84

Fuente: Licor, 2016

Los especímenes de hormigón fabricados en el CIDC, La Habana permanecieron en una sala de carbonatación donde las condiciones de humedad relativa y temperatura son idóneas para este proceso, debido a esto los valores de carbonatación resultan superiores en la Habana que en Villa Clara y los resultados de carbonatación de las muestras fabricadas con LC³ superan mayores que las elaboradas con Pórtland.

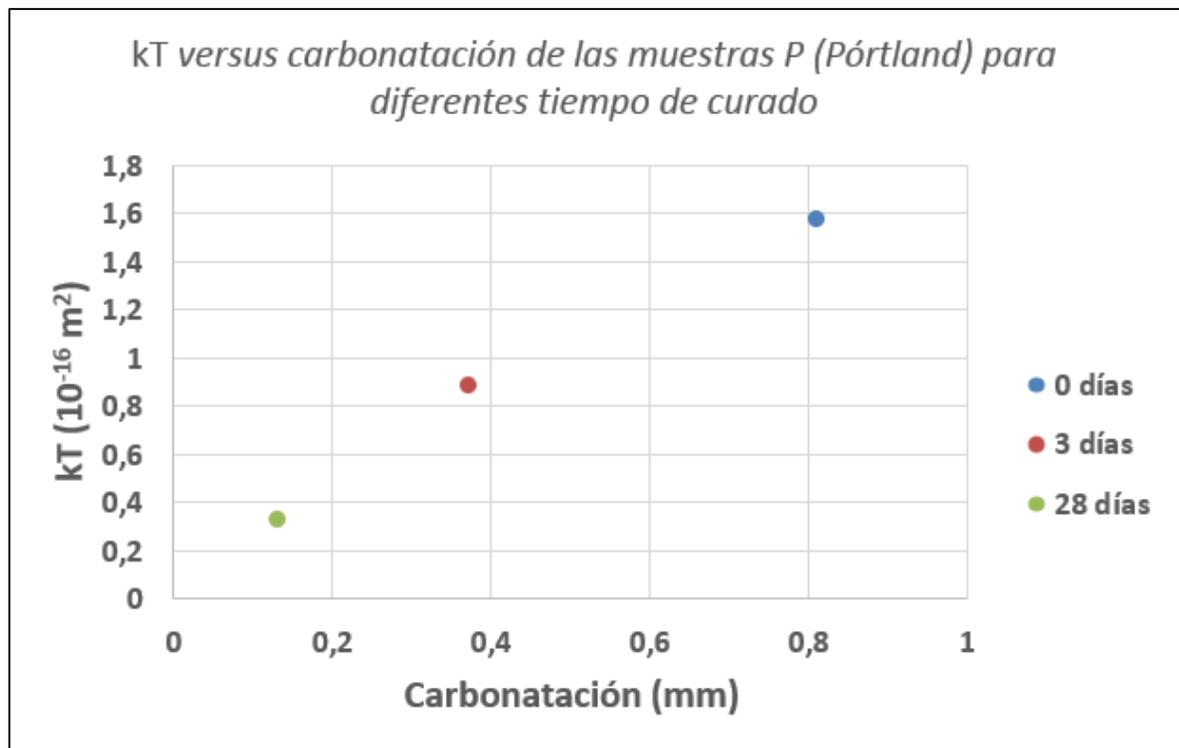


Fig. 3.7: Análisis de la permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras con Pórtland de La Habana, 2015-2016

Esto puede deberse a que la tasa de carbonatación se ve afectada en gran medida por el contenido de hidróxido de calcio (Ca (OH)₂) que tiende a bajar debido a la sustitución del cemento Pórtland y por lo tanto da lugar a una tasa más rápida de carbonatación. (Mehta y Monteiro, 2006; Neville, 2011). El resultado neto es dependiente del porcentaje de sustitución del cemento Pórtland, y (muy importante) de la calidad de curado realizado (Neville, 2011).

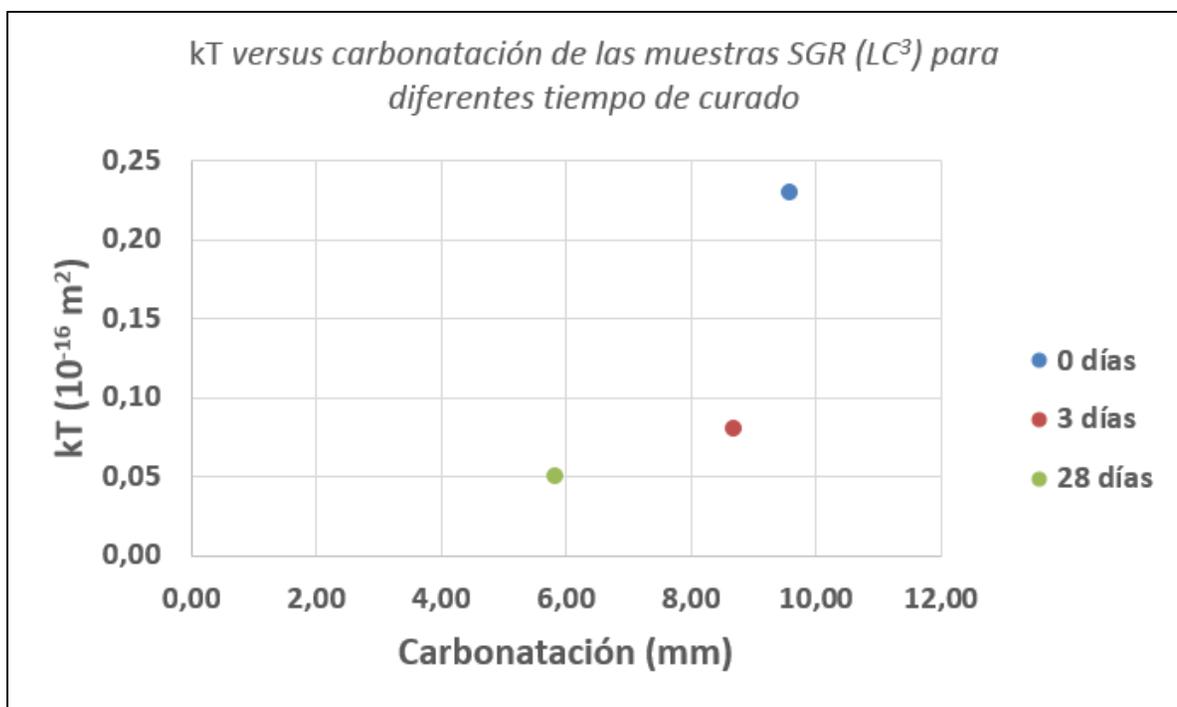


Fig. 3.8: Análisis de la permeabilidad al aire versus carbonatación de las muestras con LC³ de La Habana, 2015-2016

3.4 Conclusiones parciales

- Las muestras elaboradas con LC³ colocadas en el sitio de exposición No. 1 de Cayo Santa María poseen una permeabilidad menor que las muestras patrones, elaboradas con cemento Pórtland, al ser sometidas a un ambiente de agresividad marina elevada, con una alta presencia de la humedad.

Capítulo III: Análisis de los resultados alcanzados en la medición de la permeabilidad al aire en especímenes de hormigón elaborados con LC³

- Las muestras elaboradas con LC³ colocadas en la sala de carbonatación del CIDC, La Habana, a pesar de lograr una permeabilidad menor que las elaboradas con cemento Pórtland sufren un proceso de carbonatación más intenso.

Conclusiones generales

Conclusiones generales

- Los hormigones producidos con LC³ presentan una reacción puzolánica más completa a partir de la sinergia producida entre los aluminatos y los carbonatos asociados a la alta finura y superficie específica de la caliza y la arcilla contribuye a la densificación de la matriz y la nucleación heterogénea de los silicatos de calcio hidratados.
- Mediante la aplicación del método no destructivo de Torrent se pudo comprobar que los hormigones elaborados con LC³ tienen un comportamiento en el tiempo menos permeable en ambientes de agresividad marina y zonas donde la carbonatación ocurre aceleradamente que los elaborados con cemento Pórtland
- El hormigón elaborado con LC³ presenta una mayor carbonatación colocados en cámaras de curado donde están las condiciones óptimas para que la misma se desarrolle.

Recomendaciones

Recomendaciones

- Se recomienda planear un diseño de experimento para futuros trabajos de investigación donde se estudie el efecto de la influencia de la relación a/c , tipo de cemento, contenido de cemento y resistencia a la compresión, en la permeabilidad al aire y durabilidad de los hormigones sometidos a ambientes agresivos marinos.
- Producto al corto período para desarrollar la tesis, se recomienda comenzarla desde 4to año, para así evitar contratiempos que puedan surgir de último momento.

Referencias bibliográficas

- 201.2R-02, A. 2002. Guide to Durable Concrete. In: ACI (ed.) *Manual of Concrete Practice*.
Amphora NDT Ltd., 2012, AUTOCLAM permeability system. [Online]. Available:
www.qub.ac.uk/researchcentres/CenterforBuiltEnvironmentResearch/TechnologyTransfer/Spinouts/AmphoraNDT/Filetoupload,152867,en.pdf
- ALEXANDER, M., BALLIM, Y. & STANISH, K. Specifying durability index limits for reinforced concrete construction: Current recommendations (as at August 2007). Proceedings of the concrete durability seminar, 2007 Southern Africa. 1-11.
- ALEXANDER, M., BALLIM, Y. & STANISH, K. 2008. A framework for the use of durability indexes in performance-based design and specifications for reinforced concrete structures. *Materials and Structures Journal*, 921-936.
- ALEXANDER, M., SANTHANAM, M. & BALLIM, Y. 2010. Durability design and specification for concrete structures - the way forward. *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*. 95-105.
- ALONSO, M. C., GARCÍA CALVO, J. L., SÁNCHEZ, M. & FERNÁNDEZ, A. 2012. Ternary mixes with high mineral additions contents and corrosion related properties. *Materials and corrosion*, 63, 1078-1086.
- ASKELAND, D. R. 1998. *The Science and Engineering of Materials*. International Thomson Editores.
- ASTM C 150-02, Estándar Specification for Portland Cement.
- ASTM C 91-01, Standar Specification for Masonry Cement.
- ASTM C 494, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete
- ASTM C 595-02a, Standard Specification for Blended Hydraulic Cements
- BALLIM, Y., ALEXANDER, M. & BEUSHAUSEN, H. D. 2009. *Durability of concrete*. (In G. Owens (ed.), *Fulton's concrete technology*. 9th ed. Midrand: Cement and Concrete Institute.
- BASHEER, L., KROPP, J. & CLELAND, D. 2001. *Assesment of the durability of concrete from its permeation properties: A review*. *Construction and Building Materials*,.
- BASHEER, P. & NOLAN, E. 2001. *Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests*. *Construction and building materials*.
- BECKER, E. 2003. El Hormigón como Material de Construcción. *InfoTécnica*, Boletín N° 1.
- BECKER, E. A. 2010. CEMENTO DE ALTO HORNO Características y Recomendaciones de Uso.
- BETANCOURT, S. 2013. Notas de Clases. *Otras propiedades del hormigón endurecido C#6*.
- CEB T. G. n. ° 20. DURABILITY AND SERVICE LIFE OF C S. "Draft-CEB-Guide to Durable Concrete Structures". CEB Bull. n. ° 166, mayo, 1985.
- CEB-FIP MODEL CODE 1990, Final Draft, Section d.5.3.: "Classification by Durability", CEB Bulletin d'information No 205, Lausanne, julio 1991.
- CORREA, R. S. 2000. Los cementos con adiciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranada*.
- DE WEERDT, K., BEN HAHA, M., LE SAOUT, G., KJELLEN, K. O., JUSTNES, H. & LOTHENBACH, B. 2011a. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. *Cement and Concrete Research*, 41, 279–291.

Referencias bibliográficas

- DE WEERDT, K. & JUSTNES, H. Microstructure of binder from the pozzolanic reaction between. First International Conference on Microstructure Related Durability of Cementitious Composites, 2008 Nanjing. RILEM PRO 61, 107-116.
- DE WEERDT, K., KJELLEN, K. O., SELLEVOLD, E. J. & JUSTNES, H. 2011b. Synergy between fly ash and limestone powder in ternary cements. *Cement & Concrete Composites*, 33, 30–38.
- DINKU, A. & REINHARDT, H. 1997. Gas permeability coefficient of cover concrete as a performance control. *Materials and structures*, 30 (201): 387 - 393.
- DO LAGO, P. R. & CASTRO-BORGES, P. 2009. A NOVEL METHOD TO PREDICT CONCRETE CARBONATION. *Concreto y Cemento Investigación y Desarrollo*.
- FRÍAS, M., GOÑI, S., GARCÍA, R. & VIGIL DE LA VILLA, R. 2013. Seawater effect on durability of ternary cements. Synergy of chloride and sulphate ions. *Composites: Part B*, 46, 173-178.
- GABRIEL. 2013. *Cloruros en el hormigón armado* [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/sangabriel2005/cloruros-en-el-hormigon-armado>.
- GHRICI, M., KENAI, S. & SAID-MANSOUR, M. 2007. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement and Concrete* 29, 542- 549.
- GRIEVE, G. 2009. Cementitious materials. (In G. Owens (ed.), *Fulton's concrete technology*. 9th ed. Midrand: Cement and Concrete Institute. p. 1-16.).
- HOLMES, N., BASHEER, P., NANUKUTTAN, S. & BASHEER, L. 2009. *Performance-based testing methodology for concrete durability. Rilem TC- PSC Meeting*.
- HONG, C. Z. & PARROTT, L. J. 1989. *Air permeability of cover concrete and the effect of curing. British cement association report C/5 (C&CA Services)*, Berkshire, UK.
- ICA. 2000. *Concreto* [Online]. Available: <http://www.monografias.com/Quimica/Concreto>.
- ICHASO, A. 2014. *La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón - Parte II*. Universidad Nacional de Córdoba.
- JACOBS, F. 2006. *Air permeability as characteristic parameter for the quality of cover concrete of concrete structures (in German). Bundesamt für Strassenbau, Bern. p. 1 - 152 (to be published)*.
- JACOBS, F., DENARIE, E., LEEMANN, A. & TERUZZI, T. 2009. Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen. Forschungsauftrag AGB 2007/007. Office Fédéral des Routes, VSS Report 641 (2010). *Zürich, Switzerland. Transl. (Chapters 1 and 2)*, R. Torrent. Recommendations for quality control of concrete with air-permeability measurements. Buenos Aires, Argentina. .
- JONES, M. R., DHIR, R. K. & MAGEE, B. J. 1997. Concrete containing ternary blended binders: resistance to chloride ingress and carbonation. *Cement and Concrete Research*, 27, 825-831.
- KOLLEK, J. J. 1989. *The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method - a recommendation. Materials and structures*.
- KROPP, J. & ALEXANDER, M. 2007. Transport mechanisms and reference tests. (In R. Torrent and L. Fernández Luco (eds.), *Non-destructive valuation of the penetrability and thickness of the concrete cover - State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 189-NEC*. p. 13 - 34.)

Referencias bibliográficas

- LONG, A., HENDERSON, G. & MONTGOMERY, F. 2001. *Why asses the properties of near-surface concrete?. Construction and building materials.*
- MAHMOUD ABDELKADER, S. 2010. Influencia de la composición de distintos hormigones en los mecanismos de transporte de iones agresivos procedentes de medios marinos. Caminos. .
- MARTIRENA HERNÁNDEZ, J. F. 2015. LC3: de chocolate a Ron.
- MARTIRENA, J. F., BETANCOURT, S., GONZÁLEZ, R., MACHADO, I., ALUJA, A., MARTÍNEZ, L. & SEIJO, P. 2015. LC3 Manual de Calidad.
- MEHTA, P. K. & MONTEIRO, P. J. M. 1993. "Concrete: Structure, Properties and Materials", (Prentice Hall, NJ, 1993).
- MENÉNDEZ, G., BONAVETTI, V. & IRASSAR, E. F. 2003. Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement & Concrete Composites*, 25, 61-67.
- METHA, P. & MONTERIO, P. 2006. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials.*
- MORENO, E., CASTRO-BORGES, P. & LEAL, J. 2002. "Carbonation-induced corrosion of urban concrete buildings in Yucatan, Mexico. *NACE-International* [Online].
- 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.*
- N-CMT-2-02-001/02, 2002, Características de los materiales
- NC 95: 2011 Cemento Pórtland. Especificaciones.
- NC 120: 2014 Hormigones Hidráulicos. Especificaciones.
- NC 178: 2002 Áridos. Análisis granulométrico
- NC 179: 2002 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo
- NC 200: 2002 Geotecnia. Registro de hincas
- NC 221: 2002 Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos
- NC 250: 2005 Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural.
- NC 251: 2005 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos
- NC 293: 2005 Código de buenas prácticas para el curado del hormigón.
- NC 355: 2004, Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios
- NC 967: 2013, Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (Sorptividad)
- Neville, A.M. & Brooks, J. 2010. *Concrete technology*. 2nd ed. England: Prentice Hall, Pearson Education Ltd. p. 257-278.
- NEVILLE, A. M. 1981. *Properties of concrete*. 3rd ed. London: Pitman Publishing Ltd.
- Ollivier, J.-P., Massat, M., & Parrot, L. 1995. Parameters influencing transport properties. (In H. Hilsdorf & J. Kropp (eds.). *Performance criteria for concrete durability* (Proceedings from state of the art report prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability, RILEM Report 12.) London: E & FN SPON. p. 33-96.)

Referencias bibliográficas

- ÖZBAY, E., KARAHAN, O., LACHEMI, M., HOSSAIN, K. M. A. & DURAN ATIS, C. September-October 2012. Investigation of Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating High Volumes of Fly Ash and Metakaolin. *ACI Materials Journal*.
- PARROT, L. & HONG, C. 1991. *Some factors influencing air permeation measurements in cover concrete. Materials and structures*.
- PAULMANN, K. & MOLIN, C. 1995. *On-site test methods. (In H. Hilsdorf & J. Kropp (eds.). Performance criteria for concrete durability (Proceedings from state of the art report The integration of non-destructive test methods into the SAD approach – Reference s Page | 139 prepared by RILEM Technical Committee TC 116-PCD, Performance of concrete as a criterion of its durability, RILEM Report 12.)*, London: E & FN SPON.
- PEREPÉREZ, B., BARBERÁ, E. & ANDRADE, C. 1987. ENVIRONMENTAL AGGRESSIVENESS AND THE DURABILITY OF CONCRETE STRUCTURES. *In: ESPAÑA, C. S. D. I. C. L. C. C. (ed.)*.
- 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)*. Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas.
- PILZ, N. 2005. *Permeability index testing*. . BSc thesis. , University of Cape Town.
- POWERS, T. & BROWNYARD, L. T. 1948. *Studies of the physical properties of hardened Portland Cement paste. Bull. 22, Res. Lab. of Portland Cement Assosiation (reprinted from American Concete Institute (Proc.) 43, 1947). Skokie. p. 101 - 132, 249 - 336, 469 -505, 549 - 602, 669 - 712, 845 - 880, 933 - 992*.
- Powers, T. 1958. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of American ceramic society*, 41:1-6 (Original document not obtained, taken from Neville, A.M. & Brooks, J. 2010. *Concrete technology*. 2nd ed. England: Prentice Hall, Pearson Education Ltd. p. 257-278).
- Powers, T., Copeland, L., & Hayes, J. 1954. Permeability of Portland cement paste. *American Concrete Insitute journal proceedings*, (51) 3: 285-98.
- PROCEQ 2007. Permeabilímetro al aire Torrent. *In: S.A., P. (ed.)*. España.
- PROCEQ 2015. Resipod Family "Manual de Operación - Ensayos de durabilidad de hormigón". *In: S.A., P. (ed.) 82038104S*. Suiza.
- Powers, T. 1958. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of American ceramic society*, 41:1-6 (Original document not obtained, taken from Neville, A.M. & Brooks, J. 2010. *Concrete technology*. 2nd ed. England: Prentice Hall, Pearson Education Ltd. p. 257-278).
- Powers, T., Copeland, L., & Hayes, J. 1954. Permeability of Portland cement paste. *American Concrete Insitute journal proceedings*, (51) 3: 285-98.
- RICHARDSON, M. G. 2002. *Fundamentals of durable reinforced concrete: Modern concrete technology series*. London: Spon Press.
- Powers, T. 1958. Structure and physical properties of hardened Portland cement paste. *Journal of American ceramic society*, 41:1-6 (Original document not obtained, taken from Neville, A.M. & Brooks, J. 2010. *Concrete technology*. 2nd ed. England: Prentice Hall, Pearson Education Ltd. p. 257-278).

Referencias bibliográficas

- Powers, T., Copeland, L., & Hayes, J. 1954. Permeability of Portland cement paste. *American Concrete Insitute journal proceedings*, (51) 3: 285-98.
- ROMER, M. 2005. *Effect of moisture and concrete composition on the Torrent permeability measurement. Materials and structures.*
- SABIR, B. B., WILD, S. & BAI, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement & Concrete Composites*, 441– 454.
- SMITH-GILLESPIE, A. 2010. Low Carbon Technology Cooperation. A framework for EU-China Dialogue. Third Generation Environmentalism Ltd (E3G).
- STANDARDS, C. N. B. O. 2005. NC 293: 2005 Código de buenas prácticas para el curado del hormigón. 1ra Edición ed. Ciudad de la Habana, Cuba.
- STARCK, S. 2013. *THE INTEGRATION OF NON--DESTRUCTIVE TEST METHODS INTO THE SOUTH AFRICAN DURABILITY INDEX APPROACH.* UNIVERSITY OF CAPE TOWN.
- Taylor, H.F.W. 1990. *Cement chemistry*. Ed. 2. London: Academic Press Limited.
- TORRENT, R. 1999. Un método rápido y no-destrutivo para medir la permeabilidad al aire del hormigón. *Materiales de la Construcción*. Vol 49, # 254.
- TORRENT, R. 2008. *Non-destructive site air-permeability test - Relation with other transport methods* [Online]. Available: m-a-s.com.ar/pdf/kT%20vs%20Transport%20Properties.pdf.
- TORRENT, R. Non-destructive air-permeability measurement: From gas-flow modelling to improved testing. The 2nd International Conference of Microdurability, 7 April 2012 Amsterdam, the Netherlands.
- TORRENT, R., ALEXANDER, M. & KROPP, J. 2007. *Introduction and problem statement. (In R. Torrent and L. Fernández Luco (eds.), Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover - State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 189-NEC.*
- TORRENT, R. & FERNÁNDEZ LUCO, L. 2007. *Conclusion and further work. (In R. Torrent and L. Fernández Luco (eds.), Non-destructive evaluation of the penetrability and thickness of the concrete cover - State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 189- NEC.*
- TORRENT, R. & JACOBS, F. 2009. TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability. *Materials and structures*, RILEM Publications SARL, (32) 217: 163 - 173.
- VANCE, K., AGUAYO, M., OEY, T., SANT, G. & NEITHALATH, N. 2013. Hydration and strength development in ternary portland cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin. *Cement & Concrete Composites*, 39, 93–103.
- VIDAUD, E. V., I. 2012. La carbonatacion en el concreto reforzado. *Construcción y Tecnología en Concreto*, 2, 20-23.
- VIZCAÍNO, L. M. 2014. *Cemento de bajo Carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer-arcilla calcinada-caliza*. Doctor en Ciencias, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- VISSER, J. 2012. Accelerated carbonation testing of mortar with supplementary cement materials: limitation of the acceleration due to drying.
- YERA ARTOLA, F. A. 2014. *Estudio del fenómeno de la permeabilidad al aire en especímenes y estructuras de hormigón fabricados con cementos de bajo contenido carbono (LCC).*