



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

**Evaluación de la durabilidad de
mezclas de hormigón hidráulico con
Cemento de Bajo Carbono (LC³)**

Autora: Dianelis Puentes Díaz

Tutor: MSc. Lic. Ernesto Díaz Caballero

Santa Clara

2015



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Evaluación de la durabilidad de mezclas de hormigón hidráulico con Cemento de Bajo Carbono (LC³)

Autora: Dianelis Puentes Díaz

Tutor: MSc. Lic. Ernesto Díaz Caballero

E-mail: ernesto@ctdmc.co.cu

Consultante: Dr. CT. Lic. Adrián Alujas Díaz

Santa Clara

2015



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 de la autora

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 Jefe de
Departamento

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Tu trabajo va a llenar gran parte de tu vida, la única manera de estar realmente satisfecho es hacer lo que creas es un gran trabajo y la única manera de hacerlo es amar lo que haces. Si no lo has encontrado aún, sigue buscando. Como con todo lo que tiene que ver con el corazón, sabrás cuando lo hayas encontrado.”

Steve Jobs

DEDICATORIA

A mi madre por tantos años de sacrificio, dedicación y entrega total.

A mi padre por ser el motor que me impulsa siempre a seguir luchando.

A Tati por ir dejando en mi vida un hilo para que no me perdiera nunca.

AGRADECIMIENTOS

A mami por ser mi faro, mi luz, mi estrella. Gracias por el milagro de la vida; de esta vida llena de amor y felicidad. Por ser mi apoyo, mi guía, mi todo....A ti, por hacer realidad todos mis sueños, por esa paciencia que has tenido conmigo.

A papi gracias por convertirme en la mujer que soy. A ti van dedicados todos mis logros y realizaciones, gracias por cada esfuerzo que has hecho por mí, espero que te sientas orgulloso hoy más que nunca de tu niña aunque no haya sido varón.

A Tati por ser ante todo mi amiga y confidente. Por ser tan dulce y tenaz; nunca tendré mejor modelo a seguir, porque gracias a ti sé que nunca estaré sola en la vida y soy feliz.

A mi cuñado Jorgito por acogerme como su hija, por hacerme pasar tantos momentos de alegría, diversión y comelatas junto a él.

A Ely por su confianza plena y su inmenso amor, por no dejar que me rindiera nunca y luchar incansablemente contra mis demonios, por ser ese rayito de luz que siempre brilló para mí cuando todo estaba oscuro, por ser hasta hoy y para siempre mi otra hermana, por quererme aún más cada vez que cometo errores y apoyarme aunque las cosas estuvieran mal hechas.

A mi tutor, por cada enseñanza y esfuerzo, por su paciencia para aguantarme, y sobre todo su incondicionalidad. Sin su ayuda hubiese sido imposible.

A Adrián Alujas por brindarme tanto conocimiento y apoyo, por su carácter tan divertido todo el tiempo.

A Martirena por la oportunidad y por haber formado parte de un equipo tan metódico.

A Raúl González por brindarme su apoyo y a pesar de ser mi oponente ayudarme siempre que lo molesté sin ponerme peros.

A Abdel por su comprensión, su ayuda en todo momento y por sus chistes y bailes.

A mis niñas Yai e Ili. ¿Qué les puedo decir? Ellas han sido mi mayor motor impulsor para todo, gracias por sus risas, gracias por ser amigas de verdad y por hacerme pasar los mejores momentos de mi vida a su lado y por ser tan vejigas como yo, tengo que darle mil gracias a Dios por haberlas conocido, que aunque de ahora en adelante lejos, siempre estarán en mi corazón, las adoro.

A Enel ya no solo por estar siempre ahí y por sus repasos cuando mis pruebas de ingreso, cuando los cálculos de primer año sino ahora también por echármele un ojo a la tesis.

A Rinier por pasármele la mano más detenidamente a la tesis y por sus comentarios tan ocurrentes, ya a solo horas de entregarla.

A Erisney por ser mi apoyo, por ser esa persona que siempre estuvo ahí, por ayudarme a picar la col, por formar parte de la familia habanera, por ese al cual le contaba mis problemas, mis miedos y mis dudas.

A Yasser por tanta risas, por poner siempre el agua y darle ese tono familiar cuando nos sentábamos en la mesa.

A Dairán por sus consejos y ser el que siempre nos comprendía y además por las manillas.

A mis abuelos por estar presentes en cada etapa de mi vida....por tantos mimos y a mi abuela Gladys por dar tantas carreras conmigo para que todo me saliera bien.

A mis tías por regalarme cada día todo su amor, por sus preocupaciones.

A mis tíos y primos, por ser la familia más maravillosa del mundo.

A mi tío Carlos por apoyarnos y darnos la mano cuando lo necesitábamos y que espero sea otro de los orgullosos de mí en el día de hoy.

A Gilbe, David, Dairo, Leonel y Rosy por los buenos momentos que pasamos ya sea estudiando o riéndonos casi siempre, gracias por haber compartido durante cinco años y poder gozar de su presencia.

A Tete por ser mi otra madre, por estar siempre tan pendiente a mis estudios y dejarme bien claro en cada correo mi objetivo principal, el cual ya está logrado, por esos mimos que de lejos me llegan, por sacarme las lágrimas en cada correo.

A Carlos Alejandro por facilitarme el camino a esta victoria.

A todo el personal que trabajó con nosotros en La Habana, gracias por sus preocupaciones.

A todos mis profesores, por su exigencia, educación y preparación como profesional.

.....Nada hubiese sido posible sin ustedes, a todas mil gracias.....

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra el estudio de las características durables de especímenes de hormigón producidos con cemento de bajo contenido de carbono (LC³) en la Empresa de Prefabricado (EPI) Remedios, provincia Villa Clara y el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC), provincia de La Habana, a partir de la aplicación de los procedimientos establecidos para determinar carbonatación, la aplicación del método de Torrent para la obtención de su permeabilidad al aire y la determinación de la resistencia a compresión. Para su fabricación se utilizó el aglomerante ternario SIG B45 de Siguaney y el Cemento Portland Ordinario P-35, de Cienfuegos. El objetivo general del trabajo consistió en la evaluación del empleo de cementos de bajo contenido de carbono (LC³) y su influencia en la resistencia a compresión, carbonatación y la permeabilidad al aire del hormigón fabricado tanto en planta como en balanza mezcladora, mediante el empleo de especímenes cilíndricos y de elementos prefabricados. El estudio logra evaluar al año los parámetros en el comportamiento de los hormigones producidos con dicho cemento, lo cual permitirá llevar a cabo el diseño de hormigones más durables. Los resultados de los ensayos realizados fueron analizados gráficamente mediante el programa Excel demostrando la influencia de los diferentes factores estudiados en la investigación.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	vi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos	8
1.1 Tipos de cementos	8
1.1.1 Tipos de cementos. Influencia en la producción de hormigones hidráulicos.	8
1.1.2 Cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer.	9
1.1.3 Cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer a partir del empleo de calizas-arcillas calcinadas (LC ₃).	11
1.2 Durabilidad del hormigón. Generalidades	13
1.2.1 Propiedades químicas, físicas y mecánicas del hormigón hidráulico..	15
1.2.2 Durabilidad en hormigones elaborados con cementos con altas volúmenes de sustitución de clínquer.	17
1.2.3 Normativas de la durabilidad en hormigones	19

1.3	La carbonatación como un influyente en la durabilidad del hormigón.....	21
1.3.1	Carbonatación	21
1.3.2	Influencia de la carbonatación en estructuras de hormigón armado...22	
1.4	Permeabilidad y calidad del hormigón de recubrimiento	24
1.4.1	Fenómeno de la permeabilidad de líquidos y gases. Procesos de transporte	27
1.4.2	Factores que afectan la medición de permeabilidad y que condicionan la calidad del recubrimiento del hormigón	29
1.4.3	Método Torrent como ensayo no destructivo para evaluar la permeabilidad al aire en Cuba	31
1.5	Conclusiones parciales del capítulo	34
CAPÍTULO 2. Comportamiento físico-mecánico y químico de especímenes de hormigón producidos en la EPI Remedios y Laboratorio del CIDC a partir de cementos de bajo carbono de Siguaney.....		
2.1	Primera Etapa (EPI).....	36
2.1.1	Características de los materiales utilizados.....	36
2.1.1.1	Cementos.....	36
2.1.1.2	Áridos.....	37
2.1.1.3	Granulometría de los áridos utilizados	39
2.1.1.4	Aditivo	41
2.1.2	Diseño experimental.....	42
2.1.2.1	Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones utilizados	42
2.1.2.2	Elaboración y conservación de las probetas.....	44
2.1.2.3	Probetas elaboradas	44
2.2	Segunda Etapa (CIDC).....	44

2.2.1	Características de los materiales utilizados.....	44
2.2.1.1	Cementos.....	44
2.2.1.2	Áridos.....	44
2.2.1.3	Granulometría de los áridos utilizados.....	45
2.2.1.4	Aditivo	46
2.2.2	Diseño experimental.....	47
2.2.2.1	Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones utilizados	47
2.2.2.2	Elaboración y conservación de las probetas.....	48
2.2.2.3	Probetas elaboradas	49
2.3	Métodos y procedimientos llevados a cabo en las dos etapas.....	49
2.3.1	Resistencia a compresión.....	49
2.3.2	Carbonatación	51
2.3.3	Humedad de la superficie de los elementos.....	54
2.3.4	Permeabilidad al aire. Método de Torrent.....	55
2.4	Resultados obtenidos	58
2.4.1	EPI.....	58
2.4.2	CIDC.....	59
2.5	Conclusiones parciales del capítulo	60
CAPÍTULO 3. Análisis del comportamiento de elementos y especímenes de hormigón hidráulico.		61
3.1	Análisis de resultados del CIDC	61
3.1.1	Estudio de la resistencia a compresión.....	61
3.1.2	Estudio de la carbonatación	62
3.1.3	Estudio de la permeabilidad al aire	63

3.1.4	Análisis de permeabilidad contra carbonatación	65
3.1.5	Análisis de permeabilidad contra resistencia a compresión	66
3.2	Análisis de resultados de la EPI	67
3.2.1	Estudio de la resistencia a compresión	67
3.2.2	Estudio de la carbonatación	67
3.2.3	Estudio de la permeabilidad al aire	68
3.2.4	Análisis de la permeabilidad al aire contra carbonatación	69
3.2.5	Análisis de la permeabilidad al aire contra resistencia	71
3.3	Conclusiones del capítulo	71
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		73
Conclusiones		73
Recomendaciones		73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		75
ANEXOS.....		80
Anexo I Resultados de los ensayos realizados en el CIDC a los especímenes de LC ₃ 80		
Anexo II Resultados de los ensayos realizados en el CIDC a los especímenes patrones		82

INTRODUCCIÓN

Los estudios de durabilidad en la actualidad es un tema que resulta de suma importancia mundial, fundamentalmente en los que se encuentre relacionado con la durabilidad de las estructuras de hormigón, ya que es el producto más usado en la industria de la construcción. El aporte del hormigón, y por tanto del cemento a la construcción de edificaciones, carreteras entre otros, hace que su producción se haya incrementado en los últimos años propiciando el desarrollo de varios países con una economía en transición. Entre las que se pueden destacar su alta resistencia a la compresión, facilidad en la preparación y el transporte, buena manualidad, bajo costo y elevada durabilidad.

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

El fenómeno de la permeabilidad del hormigón influye en la degradación de la capacidad resistente y durable del hormigón, producto de la entrada de sustancias nocivas al mismo, provocando la oxidación y posterior corrosión de los aceros de refuerzos. Las sustancias que más atacan al hormigón son los cloruros, sulfatos, nitratos y las afectaciones que provoca la carbonatación, además de daños producto de la permeabilidad de los mismos, siendo este un aspecto preocupante

por las graves consecuencias que ocasiona. La reacción de los productos de la hidratación del cemento, la reacción álcali-árido, la permeabilidad y las variaciones constantes en la humedad, entre otros fenómenos, provocan la corrosión de las estructuras de hormigón armado.

En los últimos años, se han desarrollado diferentes técnicas para la medición de la durabilidad potencial, que se apoyan, en general, en la medida de la capacidad de transporte del hormigón. No existe un método de aceptación general para caracterizar la estructura de poros del hormigón y relacionarla con su durabilidad. Entre las técnicas que pueden ser empleadas se encuentra la medida de la permeabilidad al aire, por el método de Torrent.

En la actualidad, los criterios de aceptación del hormigón endurecido se basan casi exclusivamente en resultados de ensayos de probetas moldeadas, especialmente la resistencia a compresión. Está claro que esos resultados nunca pueden representar la calidad de la capa superficial, porque evalúan el comportamiento global de las probetas las que, además, se preparan y curan de una manera totalmente diferente de las condiciones reales en la estructura. Así, la calidad real de esa capa vital es ignorada lo que explica, al menos parcialmente, el desempeño insatisfactorio de muchas estructuras, desde el punto de vista de su durabilidad.

La presente investigación se dirige a evaluar la influencia de la permeabilidad al aire y la carbonatación en la durabilidad de hormigones hidráulicos, mediante la realización de ensayos, al proponer el estudio del comportamiento de hormigones hidráulicos empleando un cemento de bajo contenido de carbono (LC³), con sustituciones del 45% del clínquer, que se someten a ensayos de carbonatación y el análisis de la estructura de poros que permita determinar la incidencia de estos factores en la durabilidad del hormigón situado en entornos agresivos y entornos protegido y arribar a conclusiones.

En la presente investigación se plantea el siguiente **problema científico** como una interrogante: *¿En qué medida se afecta la durabilidad de los especímenes de hormigón hidráulico producido en la Planta de Prefabricado de Remedios y el*

Laboratorio del Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción, producidos con diferentes contenidos de cemento de bajo carbono (LC³), la carbonatación, la permeabilidad al aire y los valores de resistencia a compresión de especímenes, cuando estos se someten a la interacción de diferentes ambientes marino-industrial y regímenes de curado durante los procesos de endurecimiento?

Campo de acción:

Evaluación de hormigones hidráulicos producidos con cemento de bajo carbono.

Objeto de estudio:

Estudio de la permeabilidad de aire y carbonatación en especímenes de hormigón hidráulico.

Objetivo general:

- ✚ Evaluar la influencia del empleo de cementos en especímenes de bajo contenido de carbono (LC₃) con respecto al cemento Portland, en la resistencia a compresión, permeabilidad al aire y carbonatación del hormigón fabricado en plantas mediante especímenes.

Objetivos específicos:

- ✚ Evaluar el efecto de la carbonatación hasta un año en especímenes de hormigones hidráulicos producidos con diferentes contenidos de cemento, sometidos a diferentes regímenes de curado y ambientes.
- ✚ Determinar la resistencia a compresión a diferentes edades en especímenes de hormigones hidráulicos producidos con diferentes relaciones de cementos de bajo contenido de carbono, sometidos a diferentes regímenes de curado y ambientes en muestras de hormigón.
- ✚ Determinar el coeficiente de permeabilidad al aire mediante el método Torrent en especímenes de hormigones, empleando diferentes tipos de cementos de bajo contenido de carbono curados en ambientes diferentes.

- ✚ Establecer los niveles del comportamiento de la permeabilidad al aire y efectos de la carbonatación con respecto a los valores de resistencia a compresión en especímenes de hormigones hidráulicos producidos y sometidos a diferentes regímenes de curado y ambientes de exposición.

Se formula entonces como **hipótesis** que: *La utilización de especímenes de hormigón hidráulico variando el contenido de cemento de bajo carbono (LC₃) en Siguaney, permite evaluar los efectos de la interacción del ambiente y régimen de curado en el proceso de endurecimiento, mediante ensayos físico-mecánicos de carbonatación, permeabilidad al aire y resistencia a compresión del hormigón, para predecir el comportamiento de la durabilidad de estructuras y edificaciones asentadas en un ambiente trópico-marino en el litoral norte de la región central de Cuba.*

Tareas de investigación:

- ✚ Localización y análisis de la bibliografía sobre la influencia en la durabilidad del hormigón de los materiales cementantes y demás componentes, mecanismos de transporte que afectan las propiedades del hormigón y métodos de determinación de la permeabilidad al aire y carbonatación.
- ✚ Caracterización de los materiales utilizados en las mezclas de hormigón.

Breve descripción del proceso de obtención de hormigones.

- ✚ Realización de ensayos de permeabilidad al aire en especímenes hormigones producidos con LC³.
- ✚ Determinación de los diferentes valores de porosidad capilar de las diferentes mezclas de hormigón.
- ✚ Análisis comparativo de valores obtenidos para evaluar la carbonatación, de hormigones producidos con LC³.
- ✚ Aplicación de software estadísticos para el procesamiento de los resultados de ensayos físico mecánicos al hormigón.

La **novedad científica** radica en evaluar la permeabilidad al aire y la carbonación en hormigones elaborados con cemento de bajo contenido de carbono.

La actualidad está dada por el uso de ensayos no destructivos como el Método Torrent que permite evaluar el comportamiento durable de especímenes y estructuras de hormigón, fabricados con LC³ el cual es una alternativa que permita que países como Cuba logren sus metas de industrialización y construcción de infraestructura con un bajo impacto ambiental.

Los **aportes** de la investigación son los siguientes:

En el orden Práctico: Presenta la influencia de la permeabilidad al aire en hormigones producidos con cementos de bajo contenido de carbono mediante la aplicación del método de Torrent.

En la rama de la ciencia y la técnica: Contribución al conocimiento de la permeabilidad y la carbonatación del hormigón LC³, que puede predecir la calidad de un hormigón de forma no destructiva y relativamente fácil.

En el Medio Ambiente: La sustitución de cemento portland ordinario por cemento de bajo contenido de carbono, puede disminuir considerablemente la emisión de gases de efecto invernadero, logra extender la cantidad de clínquer y la producción nacional de cemento, producto del porcentaje de sustitución que se logra en este cemento, además puede elevar la durabilidad y el tiempo de vida útil de las estructuras en las que se empleen este cemento.

Justificación de la Investigación:

El presente trabajo de diploma forma parte de una serie de investigaciones en materia de la fabricación y aplicación del cemento de bajo carbono (LC³) que realiza el Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) en la Facultad de Construcciones de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, en colaboración con el Laboratorio Central de Materiales (LACEMAT) del Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC), de La Habana. La presente tiene como finalidad continuar las investigaciones sobre el comportamiento de los hormigones producidos con este cemento desde


el punto de vista de la durabilidad, con el objetivo de que los usuarios de cemento encuentren confiable su uso. A su vez emplear técnicas novedosas para el estudio de la durabilidad de las estructuras como la permeabilidad al aire por el método de Torrent y la carbonatación, técnicas propias de países desarrollados lo que supone un avance en este tipo de estudios para nuestro país.

Estructura del trabajo de Diploma:

En la presentación de este Trabajo de Diploma se desarrollan cada una de las fases de la investigación. Se presenta un resumen, una introducción general, tres capítulos; así como conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

Resumen

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

 **Desarrollo:** Incluye el contenido de cada capítulo.

- Capítulo I: Comprensión de la temática durabilidad de hormigones hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos.
- Capítulo II: Comportamiento físico-mecánico y químico de especímenes de hormigón producidos en la EPI Remedios y Laboratorio del CIDC a partir de cementos de bajo carbono de Siguaney.
- Capítulo III: Análisis del comportamiento de elementos y especímenes de hormigón hidráulico.

 **Conclusiones.**

 **Recomendaciones**

 **Referencias bibliográficas**

 **Anexos**

Metodología de la investigación

CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos

1.1 Tipos de cementos

1.1.1 Tipos de cementos. Influencia en la producción de hormigones hidráulicos.

Según la ASTM, existen diferentes tipos de cemento portland, los cuales están clasificados de acuerdo a la norma (Cement, 1993), los cuales se muestran a continuación:

Tipo I: Cemento de uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias.

Tipo II: Genera menor calor de hidratación que el tipo I y es más resistente al ataque por sulfatos. Se utiliza en grandes estructuras en las que el calor de hidratación puede ocasionar agrietamientos, así como donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos.

Tipo III: Cemento de alta resistencia a temprana edad y rápido fraguado. Es utilizado cuando se requiere alcanzar una elevada resistencia en pocos días, así como cuando se necesita remover encofrados lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio rápidamente.

CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones 9 hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos

Tipo IV: Presenta un calor de hidratación más bajo que el tipo III, se utiliza en construcciones de concreto masivo (hormigón), donde la subida de temperatura derivada del calor generado durante el endurecimiento deba ser minimizada.

Tipo V: Cemento de alta resistencia a la acción de los sulfatos, se utiliza en estructuras que están en contacto con suelos de aguas freáticas de alto contenido de sulfatos y en hormigones con aguas negras domésticas.

También podemos ver la clasificación según la (NC 95, 2011) (Cemento Portland-Especificaciones), la cual plantea que:

El producto se clasifica en tres grados de calidad de acuerdo a la resistencia a la compresión a los 28 días expresada en (MPa):

- Cemento Portland 35: Cemento P- 35
- Cemento Portland 45: Cemento P- 45
- Cemento Portland 55: Cemento P- 55

El cemento es el componente más activo y el 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 estos 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.

1.1.2 Cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer.

El clínquer es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto es llamado clínquer, este se convierte en cemento cuando se le agrega

CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones 10 hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos

yeso, este le da la propiedad a esta mezcla para que pueda fraguar y endurecerse y luego mantiene su resistencia y estabilidad. El cemento consiste esencialmente en silicato cálcico hidratado (S-C-H), este compuesto es el principal responsable de sus características adhesivas. Además de los componentes principales (64 % óxido de calcio y 21 % dióxido de silicio) y de los secundarios (5,5 % óxido de aluminio; 4,5 % óxidos de hierro; 2,4 % óxido de magnesio; 1,6 % sulfatos) y 1 % de otros materiales como el agua.

Se denomina cemento hidráulico cuando el cemento, resultante de su hidratación, es estable en condiciones de entorno acuosas. Además, para poder modificar algunas de sus características o comportamiento, se pueden añadir aditivos y adiciones (en cantidades inferiores al 1% de la masa total del hormigón), existiendo una gran variedad de ellos: colorantes, aceleradores, retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, fibras y otros.

Este material posee grandes ventajas en la actualidad ya que consiste en ser el ingrediente fundamental del hormigón, quien ha llegado a ser el segundo más utilizado a escala mundial y según cálculos estimados sin tener ningún otro que pueda reemplazarlo, debido a ello es que hoy día es el que más se produce debido a todos los beneficios que aporta a la humanidad, cuya producción aumenta a un ritmo considerable quien también trae grandes prejuicios porque mediante su producción el medio ambiente se ve afectado debido a que es el responsable del 9% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. El alto consumo energético y los elevados volúmenes de emisiones de gases de invernadero se convierten en serios retos a la sostenibilidad de la producción de este aglomerante en los próximos años, lo cual contrasta con su creciente demanda (Gartner and Macphee, 2011).

Han sido varias las alternativas estudiadas con el enfoque de minimizar tales impactos y entre las soluciones más extendidas a este problema se encuentra el empleo de materiales cementicios suplementarios como sustitutos parciales del cemento portland, lo que incrementa la resistencia mecánica y la durabilidad en

morteros y hormigones (Martirena, 2003). Al mismo tiempo, la utilización de estos materiales favorece la disminución en el empleo de energías no renovables y contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero por cantidad de aglomerante (Habert et al., 2009).

La reducción de los consumos de clínquer para la producción de diversos y nuevos tipos de cemento se ha convertido en una temática de gran interés por parte de productores e investigadores. El uso de materiales alternativos en la fabricación del cemento se ha desarrollado como alternativa viable con vista a cumplir tanto con los estándares de eficiencia energética y económica como con las necesarias exigencias medioambientales. Los materiales han demostrado su efectividad como sustitutos parciales del cemento portland en la fabricación de hormigones de diversas tipologías y aplicaciones (Castillo et al., 2010).

La tendencia en los aglomerantes estará encaminada hacia la disminución del contenido de clínquer a partir del empleo de materiales cementicios suplementarios y el aumento en el uso de combustibles alternativos en su fabricación. Esto permitirá, además, la elaboración de hormigones con mayor durabilidad. Por lo tanto, se prevé un futuro escenario donde los materiales puzolánicos comenzarán a ser explotados con más intensidad (Alujas, 2010) ya que estos incrementan la resistencia a edades avanzadas y la impermeabilidad del producto final, aunque también tienden a incrementar la demanda de agua.

1.1.3 Cementos con altos volúmenes de sustitución de clínquer a partir del empleo de calizas-arcillas calcinadas (LC₃).

El cemento está constituido esencialmente por clínquer y adiciones menores de yeso como fuente de sulfato, que son añadidas durante el proceso de molienda. Las materias primas habituales para la fabricación del clínquer son las arcillas y la piedra caliza, que son calcinadas, generalmente en hornos rotatorios, hasta temperaturas cercanas a los 1450 °C y luego enfriadas bruscamente. Las tendencias modernas de producción de cemento apuntan a la creciente incorporación de otros materiales con actividad hidráulica y/o puzolánicas, con un

menor costo económico y ambiental, en sustitución de los contenidos de clínquer. Estos cementos adoptan el nombre de “cementos mezclados”. El caso de las puzolanas ya sea como adición o como sustitución del cemento en la fabricación de hormigones, modifican las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, al cual aportan grandes beneficios en los variables usos que se le atribuyen.

Actualmente, uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados y usados los constituyen las arcillas calcinadas en forma de metacaolín. Estos materiales, obtenidos a partir del tratamiento térmico de depósitos naturales de mineral caolín, muestran excelentes propiedades puzolánicas debido fundamentalmente a su composición química, estructura amorfa, y alta superficie específica. Durante este tratamiento térmico, factores como la temperatura y tiempo de calcinación, así como la forma y tamaño de las partículas, influyen en la reactividad del metacaolín (MK)(Bich et al., 2009,Gonçalves et al., 2009, Samet et al., 2007).

Entre los principales efectos del MK en los hormigones se refieren el incremento de las propiedades mecánicas en los primeros momentos de la reacción, con respecto a otras adiciones puzolánicas, ya que la sustitución de CPO por adiciones minerales de carácter puzolánico, tiende a favorecer la formación de fases de monosulfatos cálcicos (ettringita) sobre las fases de hidrosulfatos cálcicos. Otro efecto del MK es el incremento de la resistencia al ataque de sulfatos y a la reacción álcali-sílice, el incremento del refinamiento de la estructura de poros y la disminución en la evolución del calor de hidratación del sistema. También se reporta una disminución significativa en la permeabilidad del hormigón, lo que reduce la movilidad de los agentes agresivos a través de la matriz (Bergaya and Lagaly, 2013).

Los cementos ternarios sobre la base del sistema clínquer – arcilla calcinada – caliza tienen gran ventaja con respecto a los cementos mezclados tradicionales que radica en la posibilidad de elevar el nivel de sustitución de clínquer sin comprometer las propiedades finales del cemento. Esto incide directamente en la

reducción de los costos ambientales, asociados a las emisiones de CO₂, sin que ello implique mayores costos de producción – los cuales pueden ser incluso menores – ni grandes inversiones(Andrés, 2014).

1.2 Durabilidad del hormigón. Generalidades

La durabilidad del hormigón se ha convertido recientemente en el centro de investigación de numerosos autores y especialistas en todo el mundo.

En el caso particular de Cuba, por ser una isla con edificaciones muy cerca del ambiente marino, es de vital importancia el estudio del comportamiento durable de este material frente a los diferentes agentes agresivos externos. Varios son los factores que condicionan las propiedades durables del hormigón. Desde el punto de vista interno, se encuentran la composición y distribución de sus componentes o materias primas, así como las características propias de su diseño estructural. Aquellos con particularidades externas al material, como son el grado de exposición y la agresividad del medio en que se encuentra, también son determinantes de esta propiedad.

El hormigón o concreto es un material compuesto empleado en construcción formado esencialmente por un aglomerante al que se añade: partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos. El aglomerante es, en la mayoría de las ocasiones, cemento mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos que se clasifican en áridos normales, ligeros y pesados de acuerdo a la NC-120 2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones. Cuba

Según la NC-120:2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones. Cuba, los materiales constituyentes del hormigón no pueden contener sustancias dañinas en cantidades tales que puedan tener una influencia negativa en la durabilidad del hormigón o provoquen la corrosión del acero de refuerzo y deberán ser adecuados para el uso previsto del hormigón. Dependiendo de las proporciones de cada uno

CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones 14 hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos

de ellos existe una tipología de hormigones. Se considera hormigón pesado aquel que posee una densidad de más de 3200 kg/m^3 debido al empleo de agregados densos (empleado protección contra las radiaciones), el hormigón normal empleado en estructuras que posee una densidad de 2400 kg/m^3 y el hormigón ligero con densidades de 1800 kg/m^3

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante), por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas armaduras de acero, recibiendo en este caso la denominación de hormigón armado, o concreto pre-reforzado en algunos lugares; comportándose el conjunto muy favorablemente ante las diversas sollicitaciones. Cuando se proyecta una estructura de hormigón armado se establecen las dimensiones de los elementos, el tipo de hormigón, los aditivos y el acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá soportar y de las condiciones ambientales a que estará expuesto.

Las propiedades exigidas para el hormigón en la estructura sólo serán alcanzadas si se cumplen a pie de obra con los procedimientos adecuados de ejecución del hormigón fresco, por lo que además de los requerimientos establecidos en esta norma, se deberán considerar los requerimientos para el transporte, vertido, compactación, curado, terminación de la superficie y cualquier otro tratamiento posterior que tenga que experimentar el hormigón. Muchos de estos requerimientos son con frecuencia interdependientes, si todos estos requerimientos son satisfechos, cualquier diferencia que se produzca entre la calidad del hormigón en la estructura y el de las probetas de ensayo normalizadas, deberá quedar adecuadamente cubierta por los coeficientes parciales de seguridad aplicados a los materiales NC-120:2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones. Cuba.

Las propiedades de un material dependen de su composición y estructura, en el caso del hormigón se debe analizar primeramente la macro- estructura, en la cual

se destacan dos elementos principales, los áridos (granos del árido grueso y del árido fino) que constituyen el esqueleto del material y la pasta de cemento endurecida, que es el material que junta al agregado formando en su conjunto un material pétreo con aspecto de conglomerado. Al apreciarse en una muestra cualquiera de hormigón, el material cementante ocupa el espacio inter-granular entre la mezcla de los áridos, aspecto este que tiene una gran importancia teórica y práctica, pues de su proporción dependen en gran medida las propiedades del material resultante, donde también se incluye su economía.

1.2.1 Propiedades químicas, físicas y mecánicas del hormigón hidráulico

Existen muchos factores que intervienen en la durabilidad del hormigón, ya que está compuesto por partículas de árido dispersas en una pasta de cemento, compuesta a su vez por una parte sólida, poros y agua. Además de estos componentes también se suma las características propias de su diseño estructural, así como también el grado de exposición y la agresividad del medio en el cual se encuentre.

El material más usado por el hombre es el agua, la cual también juega su papel primordial en la construcción, ya que es la encargada de la hidratación en el hormigón, quien conjuntamente con otros materiales forman el llamado gel, que no es más que Silicato de Calcio Hidratado que es un producto de la reacción de hidratación de C_3S y C_2S , la hidratación del C_3S impuro, también llamado Alita, conduce a la formación de $Ca(OH)_2$, también denominado portlandita (CH), y de silicatos de calcio hidratados con una estructura amorfa y de estequiometría variable según la temperatura y cantidad de agua, que son denotados de manera genérica como CSH. El C_2S o Belita reacciona de manera similar al C_3S para formar también CSH y CH.

Los cristales de portlandita ($Ca(OH)_2$) productos de la reacción de hidratación de los silicatos son los encargados de velar por la despasivación del acero de refuerzo cuando tiene lugar la acidificación del hormigón, debido al alto contenido de pH.

La fase ferrita (C4AF) reacciona de manera similar al C₃A pero más lentamente, con la formación de hidratos donde el Fe³⁺ se encuentra sustituyendo parcialmente al Al³⁺ en la estructura. Las ecuaciones de reacción planteadas han sido idealizadas, pues la composición variable de los productos de hidratación, y su tendencia a modificar su constitución en dependencia de la solución de poros, impiden asignarles una estequiometría fija. Es importante resaltar también el carácter exotérmico de estas reacciones y, por tanto, la directa relación que existe entre la hidratación del CPO y el calor de hidratación (Alujas, 2010).

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)

El aspecto de la dosificación del hormigón que más influye en la permeabilidad es la relación a/c; cuanto más baja sea, más impermeable será el hormigón. Otro aspecto fundamental de la fabricación del hormigón es el sistema del curado. La exposición al aire en condiciones de ambiente seco es la más perjudicial. El curado con agua reduce la permeabilidad del hormigón (Ferreira, 2004)

La porosidad es protagónica dentro del tema durabilidad de hormigones ya que a mayor porosidad más fácil penetran los agentes físicos y químicos en el mismo y se degradan sus propiedades con mayor rapidez. Estos ataques provocan pérdidas de consistencia y resistencia, además de corrosión en las armaduras que pueden llevar al colapso de la estructura. Existen dos tipos de poros dentro de la pasta de cemento que se denominan poros capilares, pero dentro del gel mismo existen huecos intersticiales llamados poros de gel o microporos, quienes debido a su pequeño tamaño, no influyen negativamente en la durabilidad y resistencia mecánica del hormigón. No obstante, el agua contenida en ellos puede afectar a la

estabilidad volumétrica del conjunto. Esto implica que pueden afectar a la retracción y fluencia del hormigón (Mehta et al., 2006).

Los poros capilares que presentan tamaños mayores de 50 nm, son los conocidos como macroporos. Estos son los que inciden en mayor medida en todos los mecanismos de transporte a través del hormigón. Facilitan la entrada de agentes agresivos disueltos en los fluidos, por fuerza capilar y de tensión superficial. De este modo los poros capilares influyen negativamente en la resistencia mecánica del material y permeabilidad de dicho hormigón.

La elaboración y las propiedades de curado del hormigón marcan una pauta muy importante en cuanto a sus propiedades estructurales, debido a ello es que se deben conocer todas las propiedades tanto químicas como físicas y mecánicas del mismo para poder alcanzar un material óptimo. Su resistencia a compresión se determina a los 28 días a escala de probetas ensayadas en laboratorio y con condiciones de curado estandarizadas en norma, a menos que se especifique otra.

Las principales propiedades por hacer mención de algunas, se encuentra: la resistencia a compresión, tracción, flexión y a la abrasión, también está la permeabilidad al aire, la adherencia que se pueda lograr, la porosidad, la consistencia, la compacidad y homogeneidad.

1.2.2 Durabilidad en hormigones elaborados con cementos con altas volúmenes de sustitución de clínquer

Dentro de las puzolanas usadas para la fabricación de cementos mezclados y de hormigones, con vista a mejorar sus propiedades durables, se encuentra el metacaolín. Varios han sido los trabajos que han estudiado sus aportes favorables, al ser utilizada como sustituyente del cemento Portland ordinario. Se ha demostrado que el uso de metacaolín acelera la hidratación del cemento Portland y disminuye el contenido de hidróxido de calcio en las mezclas, mejora la permeabilidad y por tanto reduce la penetración de ión cloruro en hormigones expuestos al contacto con agua de mar, así como que aumenta la resistencia

frente a ataque de sulfatos. Además, las mezclas fabricadas con esta adición muestran menores valores de porosidad, absorción de agua y sorptividad (Bai et al., 2003, Al-Akhras, 2006, Justice, 2005, Talero, 2005, Sabir et al., 2001, Gonçalves et al., 2009).

Los mayores esfuerzos han estado encaminados hacia desarrollar las prestaciones del material, de forma tal que sea capaz de soportar los diferentes mecanismos de deterioro a los que estará expuesto. En este sentido, el uso de adiciones minerales activas en la fabricación de hormigones se ha mostrado como una alternativa viable y eficiente para incrementar las propiedades durables de dicho material. Esto se debe básicamente a que aparece un aumento del contenido de los productos de reacción, favorecido por la adicional formación de hidratados de la reacción puzolánica, lo que propicia menor porosidad capilar y por ende superior resistencia y durabilidad (Agarwal, 2006, Lawrence et al., 2005, Papadakis and Tsimas, 2002, Mehta and Monteiro, 2001).

En los hormigones con MK se desarrollan la resistencia a la compresión y a la flexión de forma considerablemente más rápida que en el material convencional y a edades ligeramente más tempranas o idénticas a las del hormigón con humo de sílice. En hormigones con la misma relación agua- material cementante, la resistencia a la compresión aumenta de forma espectacular en todas las edades a medida que se aumenta la proporción (en peso) de MK de alta reactividad. El metacaolín incrementa la resistencia a flexión a edades tempranas (1-3 días) en hasta un 60%. Según (Wong and Razak, 2005) en las probetas de 7 y de 28 días, la incorporación de MK mejoraba la resistencia en un 70 y un 50%, mientras que la sustitución de cemento por MK mejoraba la resistencia en un 67 y un 39%, respectivamente. Además, puede lograrse una resistencia en hormigón de un día de 24 MPa mediante la inclusión de un 10% de metacaolín en tan sólo 305 kg/m³ de cemento de tipo I. (Boddy et al., 2001) demostraron que el MK resulta especialmente eficaz a la hora de reducir la velocidad de difusión de los iones cloruro.

Otros parámetros de durabilidad, como son la reacción álcali-sílice, la resistencia a sulfatos y la resistencia a la corrosión, mejoran hasta un 25% al aumentar las proporciones de MK. (Ramlochan and Thomas, 2000) observaron que los morteros elaborados con cualquier porcentaje (entre un 5 y un 25%) de MK de alta reactividad como sustitución parcial de cementos con un elevado contenido en C3A ($\approx 10\%$ de C3A) pueden considerarse moderadamente resistentes a los sulfatos, mientras que los elaborados con MK de alta reactividad y un cemento con un contenido moderado o bajo de C3A ($< 6\%$ de C3A) pueden considerarse altamente resistentes a los sulfatos. Sin embargo, en probetas de la edad de seis meses o más, se observó que a niveles insuficientes de MK de alta reactividad se logra reducir la resistencia a sulfatos de algunos cementos. Los autores llegaron a la conclusión de que puede ser necesario un 15% como mínimo de MK de alta reactividad para conseguir la resistencia a sulfatos a largo plazo, en función del contenido en C₃A del cemento. Asimismo, la adición de hasta un 15% de metacaolín mejoró la resistencia a la corrosión de la armadura de acero. El rápido consumo del hidróxido cálcico ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y el aumento del C-S-H y de la gehlenita hidratada (C_2ASH_8) generados dan lugar al refinamiento de la estructura porosa, que se ha identificado como el principal mecanismo causante de la mejora de las propiedades del hormigón observadas al añadir MK.

1.2.3 Normativas de la durabilidad en hormigones

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

Mientras que vida útil según la NC-120:2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones. Cuba, es el período de tiempo durante el cual el comportamiento del hormigón en la estructura se mantendrá a un nivel compatible con los

requisitos de prestación de la estructura, siempre que ésta sea adecuadamente conservada.

Las estructuras de hormigón armado son ampliamente utilizadas en la actualidad en la construcción, en un principio se creía que tenían una larga vida útil, sin embargo, las experiencias y la práctica ha demostrado que no es así. Varios ejemplos en la construcción de estructuras de hormigón con problemas ante sus condiciones de prestación son abundantes y de diferente naturaleza, estos se han tenido que explicar, enfrentar y solucionar desde diferentes esferas de trabajo, todas ellas con el objetivo de diagnosticar problemas de durabilidad para conocer los factores y elementos que en ella intervienen (Hernández-Castañeda and Mendoza-Escobedo, 2006).

La durabilidad de una estructura de hormigón es una variable muy compleja, la cual depende simultáneamente de diversos factores. Estos factores se pueden clasificar en dos grupos; los relacionados con el ambiente de exposición en que se encuentra la estructura de hormigón y los que tienen relación con las características propias del hormigón.

Entre los factores del ambiente de exposición del hormigón podemos encontrar variables como; sollicitación a la que estará sometida la estructura, agresividad del ambiente que rodea al hormigón, condiciones climáticas del lugar y eventos puntuales como altas temperaturas de un incendio o bien altas deformaciones de un sismo. Existen factores relacionados con las características propias del hormigón entre ellos: factores a nivel de ejecución proyecto (herramientas empleadas, materiales a utilizar, dosificación, método constructivo, (técnicas de construcción y especificaciones), y mantenimiento de las estructuras (Alonso López de Castro, 2013).

Por lo antes expuesto se puede decir que durabilidad no es más que la capacidad que posee la estructura o la edificación de conservar sus propiedades a través del tiempo, bajo la influencia de factores naturales y de uso o explotación. Al hablar de durabilidad del hormigón se debe tener en cuenta los principios y criterios que

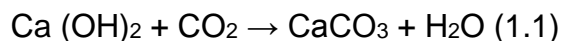
rigen la construcción de estructuras de hormigón, así como las medidas preventivas para evitar el deterioro en los elementos.

1.3 La carbonatación como un influyente en la durabilidad del hormigón

Varios son los mecanismos que se desencadenan alrededor de las estructuras de hormigón que pueden afectar su durabilidad. Dentro de los más agresivos se encuentran el ataque de sulfatos, la carbonatación del hormigón y la penetración de iones cloruro. La carbonatación es de vital importancia debido a su repercusión en el deterioro de las armaduras de refuerzo en el hormigón armado, ya que debilitan su capa de protección, desencadenando de esta manera la corrosión.

1.3.1 Carbonatación

La carbonatación del hormigón se produce cuando el anhídrido carbónico CO₂ presente en el aire reacciona en presencia de humedad con el Ca (OH)₂ para formar carbonato de calcio según muestra la siguiente ecuación:



Este proceso va reduciendo progresivamente la alcalinidad del hormigón, que pasa de un valor de pH en torno a 12 - 13 a tener valor de 9.5 o incluso inferiores.

El daño por carbonatación ocurre más rápidamente cuando existe un espesor de recubrimiento pequeño, aunque en caso de que el recubrimiento del refuerzo tenga una estructura de poros muy manifiesta que permita la difusión del CO₂ de forma rápida, este fenómeno puede ocurrir aunque el espesor sea considerable. También puede ocurrir cuando las reservas alcalinas sean pobres en la solución de poros, fenómeno que se da cuando el contenido de cemento en la mezcla es pobre. (Ferreira, 2004)

Si los poros del hormigón se encuentran secos, el CO₂ se difunde fácilmente, pero la carbonatación no puede ocurrir debido a la falta de agua. Este caso solo se presenta en hormigones que están sobresecados, como ocurre en climas muy secos. Por otra parte si los poros están llenos de agua hay apenas alguna carbonatación debido de la poca difusión de CO₂ en el agua, este es el caso de estructuras que se encuentran sumergidas. Finalmente si los poros están parcialmente llenos de agua, la carbonatación puede proceder hasta un espesor donde los poros del concreto están secos.

Asumiendo que la concentración de CO₂ es prácticamente la misma y relativamente constante en cada ambiente, el factor que más influye en el proceso de carbonatación es la humedad del hormigón. Según (Hernández López, 2009), las circunstancias más propicias para la carbonatación son las correspondientes a humedades intermedias (HR ≈ 50-70%) y más aún las alternancias de humectación y secado.

Un efecto secundario de la carbonatación es el encogimiento que trae acompañado. Cuando el hormigón armado se ve envuelto en ciclos de secado y humedad el encogimiento debido a la carbonatación se vuelve irreversible y esto conduce a la fisuración de la superficie del hormigón armado (Alonso López de Castro, 2013).

1.3.2 Influencia de la carbonatación en estructuras de hormigón armado

La carbonatación del hormigón es un aspecto muy preocupante dadas las graves consecuencias que puede acarrear, derivadas de la corrosión de las armaduras ocultas en el hormigón, responsable de la sustentación de las estructuras, edificaciones y las obras públicas.

La principal causa de deterioro en estructuras de concreto es la corrosión del acero de refuerzo, generalmente iniciada por mecanismos de carbonatación y difusión de cloruros. La carbonatación es un proceso químico donde el dióxido de carbono se difunde a través de los poros capilares interconectados del concreto, y reacciona con algunas de las fases hidratadas del cemento tales como el hidróxido

de calcio (CH) y los silicatos cálcicos hidratados (CSH), aunque también puede reaccionar con otras fases no hidratadas como el silicato tricálcico (C₃S) y el dicálcico (C₂S). Estas diferentes reacciones afectan la micro-estructura y propiedades de la pasta cementicia, al promover la disminución de la alcalinidad en la solución del poro y con ello un decremento en los valores de pH desde 12,5 a 9,5, todo esto contribuyen a la destrucción de la película pasivante protectora del acero de refuerzo. La velocidad de carbonatación en los concretos es afectada por las características de la atmósfera de exposición tales como humedad relativa, concentración de CO₂ y temperatura.

El hormigón es un material muy poroso, el cual permite la penetración en su interior del CO₂ del aire a través de los poros. Cuando esto sucede se produce la reacción del CO₂ con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido de calcio del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida, formándose carbonato de calcio (Pérez Méndez, 2010). En términos simplificados, la reacción para la fase acuosa se puede describir como: ver (figura 1.1)

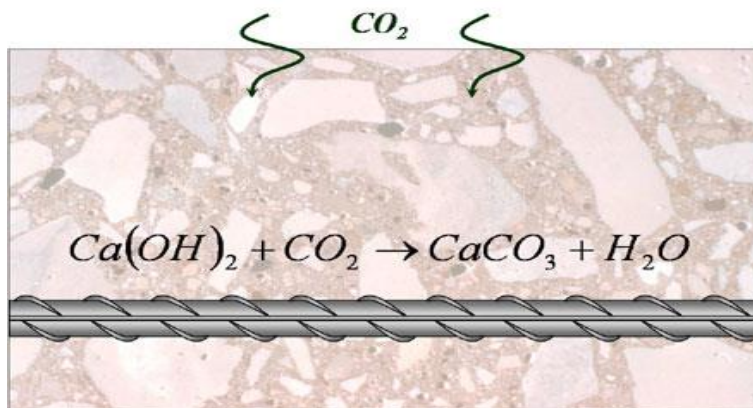


Figura 1.1: Ecuación que describe la reacción para la fase acuosa.

La carbonatación es un proceso lento que ocurre en el hormigón. Si la degradación del hormigón producto a este fenómeno aparece rápidamente, es porque desde su puesta en obra el mismo está fisurado, mal dosificado, o presenta un alto grado de porosidad. La figura 1.2 muestra un modelo simplificado del proceso de la carbonatación del hormigón.

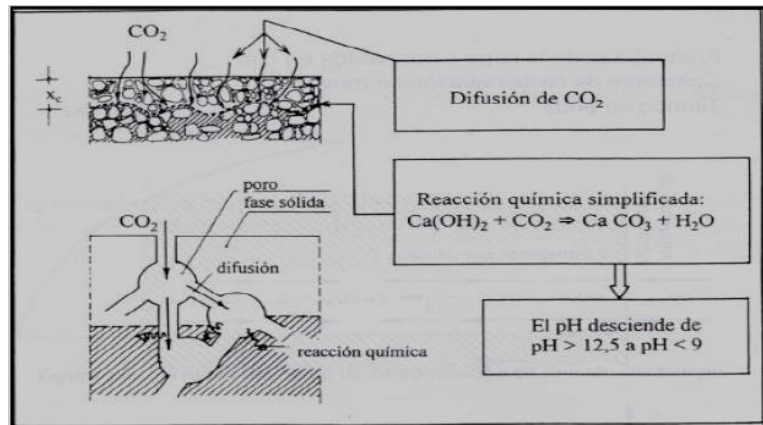


Figura 1.2: Proceso de carbonatación del hormigón. (Imagen tomada de Tesis de máster de Leticia Rafaelina Pérez Méndez).

1.4 Permeabilidad y calidad del hormigón de recubrimiento

Los problemas de durabilidad son frecuentes en estructuras de hormigón, asociados principalmente a la despasivación y corrosión de las armaduras, al ataque químico (por sulfatos) y a los ciclos de congelación y deshielo, estos han puesto en tela de juicio los enfoques tradicionales para la especificación y control de las estructuras de 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). Esta capa de recubrimiento debe proteger a las armaduras contra la corrosión inducida por la carbonatación o por ingreso de cloruros, la misma es también la más afectada por ataques químicos, congelación.

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 (ver figura 1.3). Así la calidad real de esa capa vital es ignorada lo que explica en gran medida, el desempeño insatisfactorio de muchas estructuras desde el punto de vista de su durabilidad (Ebensperger and Torrent, 2010).

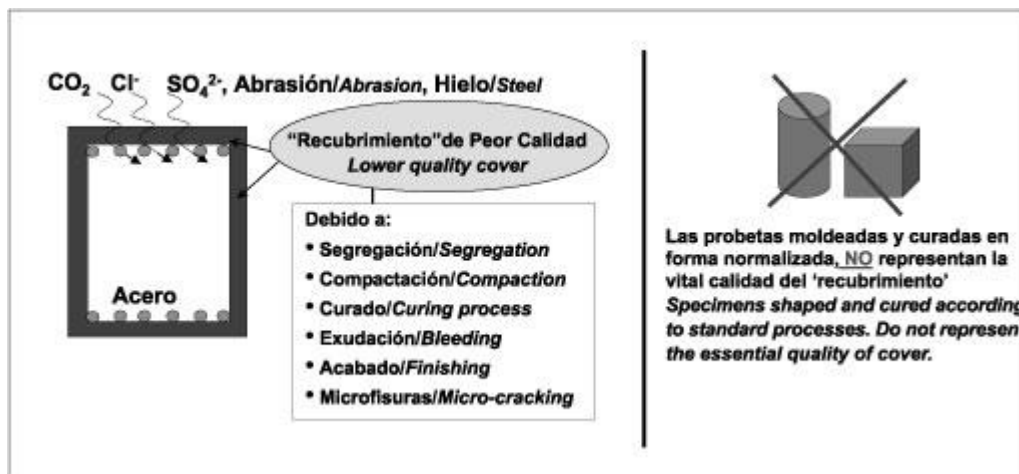


Figura 1.3: Concepto de Hormigón Superficial (Recubrimiento).

La medición in situ de la permeabilidad al aire es una técnica rápida, completamente no destructiva y que provee información importante para calificar la calidad de las capas superficiales del hormigón, típicamente, el hormigón de recubrimiento. La permeabilidad al aire del hormigón tiene relación directa con su durabilidad potencial, pero también aporta información acerca de la calidad de ejecución y la existencia de defectos no visibles.

Según (Torrent and Fernández Luco, 2010) este método de permeabilidad al aire posee una gran aplicación en tareas de diagnóstico del estado de una estructura o elemento, como por ejemplo: aplicaciones en pisos industriales, para la detección de capas débiles y fisuras subparalelas, la detección de juntas frías no visibles en un estructura de gran volumen y en la valoración de la homogeneidad en la aplicación de un revestimiento superficial. A partir de estos ejemplos, se muestra

que la medición de la permeabilidad al aire constituye una herramienta de diagnóstico y control de ejecución de importancia creciente. Su característica de ser absolutamente no destructiva y la rapidez de las medidas aportan un importante valor agregado, sobre todo en tareas de verificación de la calidad de estructuras recuperadas.

La técnica de la medida de la permeabilidad al aire puede utilizarse para la detección de fallos y defectos en la ejecución del hormigón, de una manera no destructiva. En numerosas circunstancias, la medida de la permeabilidad al aire constituye un indicador cuantitativo de la presencia o ausencia del defecto, cuyo valor documental como valor de referencia es incuestionable para definir el problema. El análisis de los valores de permeabilidad medidos debe realizarse de manera comparada, adoptando referencias convenientes, usualmente de zonas no comprometidas de la estructura y es esencial que su interpretación se realice de manera apropiada. La identificación de las zonas defectuosas permite la adopción de tareas de reparación y mantenimiento de manera preventiva, previniendo o retardando la ocurrencia de fenómenos patológicos en el futuro. Asimismo, puede aplicarse para verificar la idoneidad de la reparación efectuada (Torrent and Fernández Luco, 2010).

Para lograr obtener un recubrimiento de baja permeabilidad se deben tener en cuenta diversos procedimientos, para asegurar el buen desempeño del mismo, como son:

- Aplicación correcta de prácticas tradicionales como el concreto de baja permeabilidad, sin adición de agua, bien procesada en obra aplicando las prácticas establecidas en las normas vigentes.
- El uso de hormigones de alto desempeño como por ejemplo:
 - Hormigones autocompactantes (mejor y más uniforme compactación).
 - Hormigones “autocurantes”.
 - Hormigones de retracción compensada.

- Aplicación de técnicas especiales como son:
 - Acabados especiales.
 - Extracción de agua del recubrimiento (Membranas Permeables de Encofrado y Tratamiento por Vacío).

1.4.1 Fenómeno de la permeabilidad de líquidos y gases. Procesos de transporte

Una hidratación deficiente no sólo deja mayor cantidad de poros, y poros de mayor tamaño, sino que también la conectividad de la red de poros es mayor y por ende menor su tortuosidad. Este conjunto de características conduce a que la capacidad de transporte de fluidos se verá incrementada ante un curado deficiente, lo que se evidencia por un aumento de la permeabilidad a líquidos y gases y mayor coeficiente de difusión, entre otras características (Fernández Luco, 2009).

La penetración de sustancias nocivas en el hormigón es una consecuencia directa de la estructura porosa del material. Existen cuatro mecanismos fundamentales de transporte; la preponderancia o intensidad de uno u otro mecanismo dependerá del tipo de sustancia de que se trate, de las condiciones de exposición a que se enfrente la estructura y al grado de saturación de los poros del hormigón. La cinética de los cuatro mecanismos es diferente, pero todos están determinados en gran medida por la estructura de poros del hormigón de recubrimiento (diámetro, volumen y conectividad) y también por el grado de saturación de dichos poros (Torrent, 2003).

La figura 1.4 muestra los cuatro mecanismos básicos de transporte de masa e iones a través del hormigón, los cuales actúan generalmente combinados.

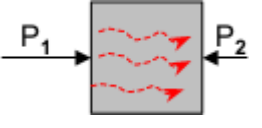
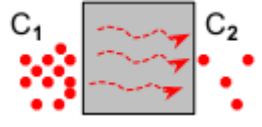
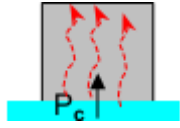

Esquema	Mecanismo	Apreciable en
	Permeabilidad: Gradiente de presión a través del elemento	Cisternas y presas que retienen agua u otros fluidos
	Difusión: Gradiente de concentración a través del elemento ($C_1 > C_2$)	Carbonatación y penetración de Cl^- en elementos sumergidos
	Absorción: Presión capilar en la interface agua/aire	Penetración de agua de lluvia o de Cl^- en zona de mareas ($SO_4^{=}$ en suelos)
	Electromigración: Movimiento de iones a través de los poros debido a un potencial eléctrico	Migración de iones durante el desarrollo de la corrosión del acero

Figura 1.4: Mecanismos de Transporte.

En general, los parámetros que definen cada mecanismo de transporte (coeficiente de permeabilidad, difusividad, coeficiente de succión capilar, resistividad eléctrica) están interrelacionados. Esto significa que un hormigón con una estructura más densa y compacta (pocos poros y pocos interconectados) presentará una baja permeabilidad, una baja difusividad, una baja absorción y baja conductividad eléctrica (alta resistividad).

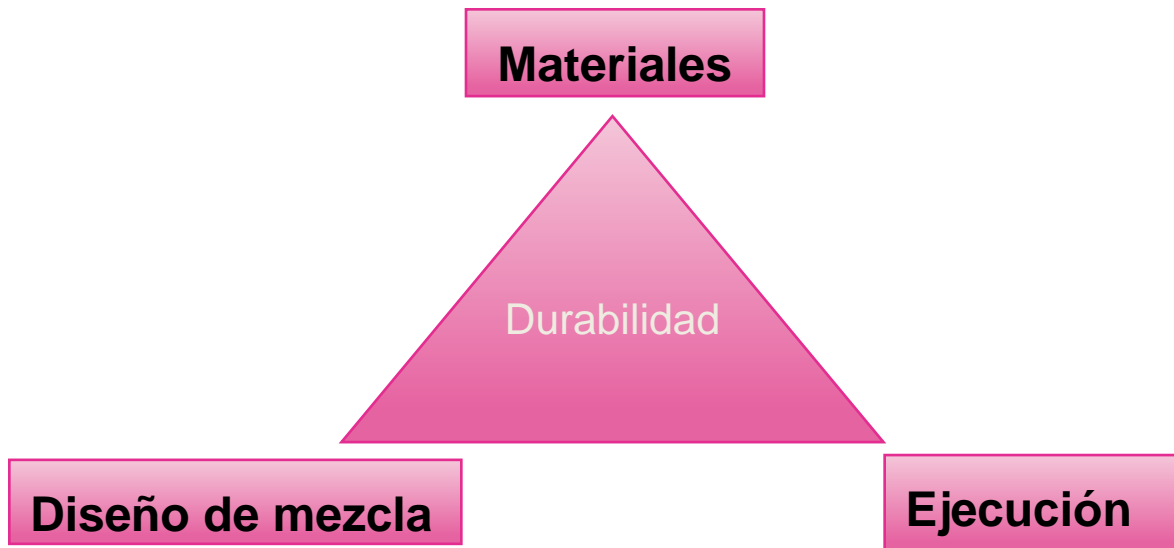
Existen diferentes métodos capaces de valorar la capacidad de transporte de fluidos y gases del hormigón de recubrimiento entre los que se encuentran: la medida de espesores de carbonatación y la medida de la permeabilidad al aire, estos son muy utilizados mundialmente para evaluar el comportamiento durable de las estructuras de hormigón hidráulico.

1.4.2 Factores que afectan la medición de permeabilidad y que condicionan la calidad del recubrimiento del hormigón

- ❖ Entre los factores que afectan las mediciones de permeabilidad se puede mencionar:
 - La porosidad del hormigón.
 - La conectividad y tortuosidad de la estructura de poros.
 - El tamaño medio de poros.
 - La temperatura de la muestra en el momento del ensayo.
 - El contenido de humedad de la muestra durante el ensayo.
 - Evaporación de agua libre debido al vacío generado.
 - Obturación del paso de aire en los poros saturados.
 - La viscosidad del aire (función de la temperatura y presión en condiciones estándar).
- ❖ Dentro de los factores que condicionan la calidad del recubrimiento se tienen:
 - Las condiciones de ejecución, compactación y curado.
 - Relación agua/cemento.
 - Grado de hidratación del cemento.
 - Contenido unitario de cemento.
 - Clase resistente del hormigón.

- Utilización de adiciones minerales activas.
- El empleo de cementos especiales.

Factores que condicionan la calidad del recubrimiento del hormigón



La vida útil de un elemento depende en gran medida de la permeabilidad y espesor del recubrimiento, las cuales 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).

Por lo expuesto anteriormente se puede concluir diciendo que la durabilidad de una estructura depende de muchos factores, del cumplimiento de estos dependerá en gran medida el resultado que se quiera obtener en la elaboración de

hormigones menos permeables, que garanticen la calidad requerida para el recubrimiento de una estructura.

1.4.3 Método Torrent como ensayo no destructivo para evaluar la permeabilidad al aire en Cuba

Existen diversos métodos de ensayo para la medida de la permeabilidad a los gases en condiciones reales (in situ). Algunos de estos métodos funcionan con bombas de vacío y otros con gases a presión, pero los primeros son más seguros, en lo que a la seguridad en la manipulación de equipamiento se refiere. Algunos métodos son levemente intrusivos, ya que necesitan de un pequeño orificio sobre el hormigón, mientras que otros son totalmente no destructivos porque apoyan una suerte de “campana” sobre el hormigón que se mantiene adherida por efecto de la presión atmosférica. Con el principio de la campana o celda, hay equipos de simple o doble celda. Estos últimos son algo más evolucionados porque el anillo exterior de la celda funciona como anillo de guarda, evitando las corrientes espurias y posibilitando que el flujo en la celda interna sea unidimensional, lo que permite una estimación razonable del coeficiente intrínseco de permeabilidad.

En la actualidad uno de los métodos no destructivos que más se utiliza mundialmente para evaluar in-situ la penetrabilidad de sustancias nocivas al interior del hormigón es el Torrent Permeability Tester (figura 1.5), el cual resulta un método rápido y muy apropiado para el estudio tanto de especímenes, como de estructuras de hormigón. Este dispositivo de ensayo no destructivo, diseñado para la medición "in situ" de la permeabilidad al aire del recubrimiento de hormigón. Se basa en crear vacío dentro de una celda colocada sobre la superficie del mismo y en medir la velocidad con que la presión retorna al valor atmosférico.

CAPÍTULO 1. Comprensión de la temática durabilidad de hormigones hidráulicos producidos con diferentes tipos y contenidos de cementos binarios y ternarios en ambientes trópico-marinos 32

Las características del método son: una celda con doble cámara y un regulador que equilibra la presión en la cámara central (de medición) y en la cámara exterior (anillo de guarda). Esto asegura un flujo unidireccional de aire hacia la cámara



central, eliminando todo flujo espúreo transversal. Los datos de la medición son procesados por un microprocesador que indica el valor del coeficiente de permeabilidad al finalizar el ensayo, que dura de 2 a 12 minutos.

Figura 1.5: Equipo de Permeabilidad al aire Torrent (Torrent Permeability Tester).

En base a numerosos resultados obtenidos con el método, tanto en el laboratorio como en obra, se propone una clasificación de la calidad del recubrimiento en función de su permeabilidad al aire medida a una edad de 1 a 3 meses (hormigones jóvenes'). La Clase 1 corresponde a hormigones de alta resistencia (> 60 MPa), bien compactados y curados, en tanto que la clase 5 corresponde a hormigones de baja resistencia (< 15 MPa) mal curados (Torrent, 1999).

Clase N°	Descripción	Kt (10-16 m ²)
1	Excelente	< 0.01
2	Muy Buena	0.01 - 0.1
3	Normal	0.1 – 1
4	Pobre	1 – 10
5	Muy Mala	> 10

Por lo antes mencionado se puede concluir diciendo que este método es adecuado para medir la resistencia del hormigón de recubrimiento a la penetración por distintos mecanismos de agentes agresivos que afectan la durabilidad de las estructuras, además de que se puede correlacionar muy bien con otros métodos para medir fenómenos de transporte en el hormigón, con la ventaja de ser más rápido y totalmente no destructivo.

Existen diversos métodos de ensayo para la medida de la permeabilidad a los gases en condiciones reales (in situ). Algunos de estos métodos funcionan con bombas de vacío y otros con gases a presión, pero los primeros son más seguros, en lo que a la seguridad en la manipulación de equipamiento se refiere. Algunos métodos son levemente intrusivos, ya que necesitan de un pequeño orificio sobre el hormigón, mientras que otros son totalmente no destructivos porque apoyan una suerte de “campana” sobre el hormigón que se mantiene adherida por efecto de la presión atmosférica.

Con el principio de la campana o celda, hay equipos de simple o doble celda. Estos últimos son algo más evolucionados porque el anillo exterior de la celda funciona como anillo de guarda, evitando las corrientes espurias y posibilitando que el flujo en la celda interna sea unidimensional, lo que permite una estimación razonable del coeficiente intrínseco de permeabilidad.

Existen diversos métodos de ensayo para la medida de la permeabilidad a los gases en condiciones reales (in situ). Algunos de estos métodos funcionan con bombas de vacío y otros con gases a presión, pero los primeros son más seguros, en lo que a la seguridad en la manipulación de equipamiento se refiere. Algunos métodos son levemente intrusivos, ya que necesitan de un pequeño orificio sobre el hormigón, mientras que otros son totalmente no destructivos porque apoyan una suerte de “campana” sobre el hormigón que se mantiene adherida por efecto de la presión atmosférica.

Con el principio de la campana o celda, hay equipos de simple o doble celda. Estos últimos son algo más evolucionados porque el anillo exterior de la celda funciona como anillo de guarda, evitando las corrientes espurias y posibilitando que el flujo en la celda interna sea unidimensional, lo que permite una estimación razonable del coeficiente intrínseco de permeabilidad.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo

- Los materiales cementicios suplementarios ayudan a la resistencia del hormigón en cuanto a los ataques agresivos del medio al que esté expuesto. Además de contribuir a la significativa reducción de las emisiones de CO₂ a la atmosfera.
- Los poros con dimensiones entre 2 y 50 nm, son los que facilitan el transporte de sustancias solubles en líquidos o gases, lo cual determina la durabilidad del hormigón, por lo que se hace necesario encontrar un material menos permeable, que presente mejor comportamiento ante ambientes degradantes del hormigón.
- Los estudios de durabilidad demuestran que ella depende de si se realiza una correcta dosificación y curado del hormigón y así se obtendrá menor porosidad y por consiguiente una microestructura más densa, lo cual hará que el hormigón posea una mayor durabilidad.
- Los ensayos a nivel mundial que acreditan el comportamiento duradero del hormigón, permiten evaluar las propiedades que poseen y así determinar la utilización.
- Los ensayos para la determinación del coeficiente de permeabilidad al aire en hormigones hidráulicos brindan una gran información sobre sus características, con la cual se puede evaluar el comportamiento durable de los mismos.

CAPÍTULO 2. Comportamiento físico-mecánico y químico de especímenes de hormigón producidos en la EPI Remedios y Laboratorio del CIDC a partir de cementos de bajo carbono de Siguaney

El objetivo fundamental de esta investigación fue determinar la durabilidad en cuanto a la carbonatación y permeabilidad al aire de hormigones fabricados con cemento Portland (P-35) y con un aglomerante ternario mediante la sustitución del contenido de clínquer del 45 % de cemento Portland por combinaciones de arcilla calcinada/carbonato de calcio denominado (SIG B-45).

El capítulo presenta de manera secuencial el desarrollo experimental llevado a cabo para la evaluación. Se describe la caracterización de los materiales empleados, la metodología seguida en la elaboración de las diferentes dosificaciones de hormigones y los equipos y metodología de ensayos de durabilidad realizados.

Los hormigones se elaboraron en lugares diferentes y expuestos a disímiles condiciones ambientales, una primera etapa se desarrolló en la EPI Remedios, provincia de Villa Clara y una segunda etapa en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC), en la provincia de La Habana. Los ensayos correspondientes a la carbonatación se realizaron en La Habana, mientras que los de permeabilidad al aire por el método de Torrent se efectuaron en sus lugares de orígenes.

2.1 Primera Etapa (EPI).

2.1.1 Características de los materiales utilizados

2.1.1.1 Cementos

Los tipos de cementos utilizados fueron dos: cemento P-35 de la fábrica de cemento Carlos Marx, de Cienfuegos y cemento SIG-B45 de la fábrica de cemento de Siguaney. Los datos de análisis químico, realizado en la propia fábrica de cemento, del SIG-B45 se muestran en la tabla 2.1

Tabla 2.1 Análisis químico cemento SIG-B45

Compuesto químico	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RI	PPI	CaO libre
%	27.33	4.58	4.58	49.80	1.30	3.65	12.59	7.11	0.90

Los aglomerantes empleados fueron caracterizados según los ensayos estandarizados en la NC 95:2011 —Cemento Portland. Especificaciones para evaluar su conformidad. En la tabla 2.2 se muestra las características físico-mecánicas fundamentales de los aglomerantes empleados.

Tabla 2.2 Características Físico-Mecánicas de los Cementos

ENSAYO	UNIDAD	Cemento	
		P-35	SIG-B45
Tiempo de Fraguado Inicial	min	140	135
Tiempo de Fraguado Final	h	4.51	2.9
Consistencia Normal	%:	25.4	25.0
Peso Unitario Suelto	kg/m ³	—	—
Finura de Molido Tamiz 170	%	0.10	—
Peso Específico Real del Cemento	g/cm 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	—

2.1.1.2 Áridos

El árido grueso proveniente del machaqueo de origen calizo procede de la cantera —Raúl Cepero Bonillall (Palenque), Remedios, de 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. La caracterización de estos materiales se recoge en las tablas 2.3 y 2.4 respectivamente.

Se evaluó la conformidad de los áridos según la NC 251 2005. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos, para evaluar la conformidad. Los ensayos para caracterizar estos materiales se realizaron según las normas cubanas de granulometría NC-178 2002. Áridos. Granulometría. Cuba, partículas de arcilla NC 179: 2002, peso específico y absorción NC-187 2002. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. Cuba y material más fino que el tamiz 200 NC 182: 2002, dichos ensayos fueron realizados por la ENIA Villa Clara.

Tabla 2.3 Características físico-mecánicas de árido grueso

ENSAYOS	UM	Cantera Palenque
Material más Fino que el Tamiz 200	%	0.28
Partículas de arcilla.	%	0.06
Partículas planas y alargadas	%	2.7
Peso específico corriente	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/m ³	1387
Masa Volumétrica Compactada	kg/m ³	1530

Tabla 2.4 Características físico-mecánicas de áridos finos.

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/m ³	1563	1563
Masa Volumétrica Compactada	kg/m ³	1709	1709

2.1.1.3 Granulometría de los áridos utilizados

La granulometría es una de las características de mayor transcendencia de un árido. Su importancia está fundamentada principalmente en su influencia sobre los siguientes factores (Cánovas, 2007) :

- La docilidad del hormigón, y, consecuentemente, en la dosificación de cemento y de agua.
- La segregación y exudación de la mezcla, o sea, en las propiedades del hormigón fresco y en las propiedades del hormigón endurecido a través de la resistencia, estabilidad de volumen y durabilidad.

Para determinar la curva granulométrica, se procedió al tamizado del árido según la serie de tamices de la NC-178 2002. Áridos. Granulometría. Cuba. Los resultados de este procedimiento se muestran en la tabla 2.5 “Granulometría de los áridos” fueron caracterizados según los ensayos estandarizados en la NC 95:2011 —Cemento Portland. Especificaciones para evaluar su conformidad.



Figura 2.1 Árido grueso y fino utilizado

Tabla 2.5 Granulometría de los áridos.

Tamiz(mm)	% Pasado		
	Gravilla Palenque	Polvo Palenque	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	

2.1.1.4 Aditivo

Se ha empleado aditivo superplastificantes Dynamon SX32, suministrado por MAPEI, los datos técnicos suministrados por el fabricante se recogen en la Tabla 2.6 —Características del aditivo Dynamon SX32II. La dosificación para este producto en volumen de este puede variar entre 0,5 y 1,5 litros por cada 100 kg de cemento.

Tabla 2.6 “Característica del aditivo Dynamon SX-32”

Composición química	Base de polímeros acrílicos no sulfonados
Densidad (g/cm ³)	1,08 ±0,02 a 20° C
pH	6,5 ±1
Residuo seco (%)	22,1±1,1
Contenido de Cloruro (%)	<0,1

Contenido de Álcali (Na_2O) equivalente (%)	<3,5
Clasificación	Supé fluidificante

2.1.2 Diseño experimental

En el diseño experimental de la investigación se resumen los métodos de dosificación de los hormigones utilizados, así como todo el procedimiento a realizar para el estudio de las propiedades y durabilidad.

2.1.2.1 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones utilizados

La trabajabilidad, resistencia y durabilidad de estos hormigones vienen dados de la mano, y para lograrlas es prudente determinar una proporción óptima en la que se deben colocar diferentes componentes en su masa.

Existen varios métodos para diseñar las dosificaciones de los hormigones y principalmente basados en el contenido de cemento, entre la bibliografía descrita está Fuller, Bolomey y Faury entre otros, mientras que basados en la resistencia a compresión para hormigones convencionales se encuentra la A.C.I. y para los hormigones secos está O`Reilly, la Peña.

Para los hormigones de la EPI Remedios se empleó el método de O`Reilly para la dosificación de las mezclas. Este método está basado en la obtención deseada de una resistencia a compresión especificada, también se ajusta muy bien a los áridos de nuestro país, ya que el mismo fue desarrollado con este propósito. En la tabla 2.7 se exponen las dosificaciones empleadas en los distintos hormigones elaborados en la EPI Remedios.

Tabla 2.7 Dosificación de las mezclas de hormigón.

	Dosificación gravimétrica kg		Dosificación volumétrica m ³		Gasto de materiales / m ³	
	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa
MATERIALES	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa	20 MPa	25 MPa
Cemento SIG 45	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
R. a/c Amasada	0.47	0.47	---	---	---	---
R. a/c Efectiva	0.40	0.40	0.4	---	---	---

Observaciones:

Las dosis de aditivo están expresadas en L/m³.

Asentamiento Proyecto : 12 ± 3 cm

2.1.2.2 Elaboración y conservación

La elaboración de los elementos prefabricados fue con un hormigón mezclado en planta, los materiales utilizados fueron: gravilla, arena, cemento, agua y aditivo, quedando ubicados en el sitio de exposición del cayo Santa María.

2.1.2.3 Elementos elaborados

Fueron elaborados los bloques de hormigón de distintas dimensiones, luego de 360 días se le extrajeron los testigos y fueron cubiertos de nailon y sellados en bolsas de polietileno.

2.2 Segunda Etapa (CIDC).

2.2.1 Características de los materiales utilizados

2.2.1.1 Cementos

Se emplearon dos tipos de cemento, P-35 producido en la fábrica de cemento Carlos Marx de Cienfuegos y cemento SIG B45 de la fábrica de Siguaney. Este último se utilizó en finuras de molido diferentes, 83,6 % y 96,4%. Las características de estos cementos fueron expuestas en las tablas 2.1 y 2.2.

2.2.1.2 Áridos

Los áridos empleados son obtenidos de las canteras Alacranes y Victoria de La Habana. El árido grueso que se obtiene en la cantera Alacranes es un árido de machaqueo de origen calizo. El árido fino obtenido en la cantera Victoria es una arena lavada. La tabla 2.8 muestra las características físico- mecánicas de estos áridos.

Tabla 2.8 Características físico-mecánicas de los áridos.

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/m ³	1471	1357
Masa Volumétrica Compactada	kg/m ³	1586	1454

2.2.1.3 Granulometría de los áridos utilizados

Tabla 2.9 Granulometría de los áridos

Características Granulométricas		
Tamiz	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	—

2.2.1.4 Aditivo

El aditivo GENIOTEC SF/20, fue el utilizado para la elaboración de estos hormigones, el mismo es un aditivo superplastificante que el fabricante clasifica como del tipo F según la Norma ASTM C 494 y que 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.

Tabla 2.10 Características del aditivo GENIOTEC SF/20

Estado físico	Líquido
Color	Carmelita oscuro
Contenido de sustancia seca (%)	40 ± 1

Densidad(g/cm ³)	1,20 ±0,02
Valor 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

2.2.2 Diseño experimental

2.2.2.1 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigones utilizados

En los hormigones producidos en el CIDC se empleó el método de Toufar, este método es basado en el contenido de cemento por lo que su principio es determinar la menor cantidad de espacios intergranulares. El resultado del diseño de los hormigones por este método se expresa en la tabla 2.11

Tabla 2.11 Dosificación de las mezclas de hormigón.

MATERIALES	Dosificación gravimétrica kg	
	CPO	SGR
Cemento	70,9	68,68

Arena la Victoria	131,73	131,73
Granito13-5 Alacranes	170,75	170,75
Agua	29,78	28,85
Aditivo SF 20	0,908	1,717
R. a/c Amasada	0,42	0,42
R. a/c Efectiva	0,42	0,42

2.2.2.2 Elaboración y conservación de las probetas

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 s cada capa ver *Fig. 2.2*. Se utilizó cámara de curado con humedad relativa mínima de 95% y temperatura de 23 ± 2 °C según indica la norma NC-221 2002. Elaboración de probetas para ensayos. Cuba, ver *Fig. 2.3*.

Elaboración de probetas para ensayos.



Fig. 2.2. Compactación de las muestras



Fig. 2.3 Muestras en cámara de curado

2.2.2.3 Probetas elaboradas

En el CIDC de La Habana se elaboraron 14 probetas cilíndricas y seis en forma de cubos con cemento remolido de bajo carbono (SGR) y las probetas patrones 15 cilíndricas y 6 cúbicas con cemento Portland (P-17), de estas dos series a todas las probetas ya sean cilíndricas como cúbicas se le determinó permeabilidad al aire. Luego de cada serie se seleccionaron al azar, una cilíndrica de cada edad de curado (0; 3; 28 días) y se le determinó carbonatación y para el ensayo de resistencia a compresión se procedió de la misma manera, lo que analizando dos muestras de cada edad. Todas las probetas cilíndricas eran de 150x300 mm y las cúbicas de 150x150 mm.

2.3 Métodos y procedimientos llevados a cabo en las dos etapas

2.3.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón depende de cómo la combinación de varios factores afecta la porosidad de la pasta y de la zona de transición. Tales factores incluyen básicamente las propiedades y proporciones de los materiales que componen el hormigón, grado de compactación y de curado (Mehta et al., 2006).

La resistencia a compresión de estos hormigones se realizó en probetas cilíndricas de dimensiones 150x300 mm (Ver fig. 2.4) y los testigos de 50 mm de diámetro (Ver fig. 2.5), fabricados según la NC 221:2002. Previamente al ensayo se realizó el refrentado de las probetas con mortero de azufre para el caso de los hormigones elaborados en CTDMC, según lo especificado en las normas ASTM C 1231:2007 y (ASTM-C-617/M-12, 2012). El procedimiento utilizado en este ensayo fue el descrito por la (NC-244, 2003) “Hormigón endurecido. Determinación de la Resistencia a Compresión de Probetas Cilíndricas”



Fig. 2.4 Ensayo de resistencia a compresión de las probetas del CIDC.



Fig. 2.5 Ensayo de resistencia a compresión de las probetas de la EPI.

2.3.2 Carbonatación

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones se basa en la determinación de la reducción de la alcalinidad que provocan las transformaciones químicas derivadas del proceso de carbonatación, la cual puede comprobarse visualmente mediante los cambios de coloración que sufre un indicador.

Aparatos y utensilios

a) Indicador

Se utilizó como indicador una disolución de fenolftaleína al 1 por 100 disuelta en alcohol etílico al 70 %. Para preparar 100 cm³ de disolución de indicador, se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico del 99 por 100 de pureza y se adicionan después 30 cm³ de agua destilada.

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

(hormigón carbonatado). Para valores entre 8 y 9.5 toma tonalidades entre rosa y rojo púrpura.

b) Dispositivo de medida

Puede utilizarse cualquier instrumento o utensilio de medición longitudinal que posea una precisión de 0.5 mm.

c) Brocha de 1 pulgada.

d) Pulverizador.

e) Taladro percutor o cincel y martillo.

Procedimiento

La medida de la penetración del frente carbonatado se realizó sobre una cala practicada en seco en el elemento objeto de estudio, que alcance la profundidad de colocación del o los refuerzos, o sobre porciones tomadas directamente del elemento objeto de estudio, nunca sobre polvo extraído del mismo.

No es necesario que la cala o muestra tenga una geometría particular, basta que posea unas dimensiones suficientes como para medir la profundidad de la capa carbonatada desde la cara exterior del elemento. Para las determinaciones “in situ” las muestras no deben tomarse en zonas donde el recubrimiento de hormigón se encuentre suelto o existan fisuras, excepto cuando expresamente interese comprobar si esas regiones se han carbonatado. En todos los casos la medida se debe efectuar sobre una superficie limpia de partículas sueltas, por lo que debe limpiarse previamente con brocha u otros medios auxiliares debiendo siempre proceder sin demora, con el propósito de evitar que la superficie se carbonate. En el caso de muestras, de no resultar posible aplicar el indicador de inmediato, las mismas podrán guardarse en un recipiente hermético, con el menor contenido de aire posible, hasta que puedan ser ensayadas, recomendándose no exceder un espacio de tiempo mayor de 24 horas. Aplicación del indicador, la disolución del indicador puede aplicarse con pulverizador, o cualquier otro medio que permita extender una capa relativamente fina y uniforme sobre la superficie en cuestión.

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

Medida de la profundidad de carbonatación

Luego de la aplicación, pasado 1 o 2 minutos y antes de transcurrir 15 minutos, se efectuara la medición de la profundidad de carbonatación, es decir la longitud de la zona incolora medida desde la superficie, determinándose los valores máximo, mínimo y la media aritmética. El procedimiento no debe tardar más de 20 min. Las medidas se realizaran con una regla u otro instrumento de medición capaz de garantizar una precisión de 0.5 mm.

El ensayo fue realizado según estas especificaciones establecidas en la NC 355:2004 Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios.



Fig. 2.6 Muestras para el ensayo de carbonatación del CIDC.



Fig. 2.7 Muestras para el ensayo de carbonatación de la EPI.

2.3.3 Humedad de la superficie de los elementos

Es de gran importancia destacar que cuando el hormigón está húmedo, los valores de permeabilidad a los gases son significativamente más bajos que cuando está seco, lo que puede desvirtuar la evaluación de la calidad del hormigón de recubrimiento, especialmente cuando se la mide "in situ". Por este un aspecto de relevancia y a tener en cuenta, se determinaron los valores del % de humedad que presentan los elementos ensayados. (Ver fig. 2.8)



Figura 2.8: Equipo para medir la humedad.

2.3.4 Permeabilidad al aire. Método de Torrent

El método de Torrent fue el utilizado para medir la permeabilidad al aire sin afectar la integridad de los especímenes, ya que es un método no destructivo creado por la norma Suiza en el 2003.

Descripción del método

La disposición del instrumental del aparato se esquematiza en la Figura 2.9. El mismo posee una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda. Consiste en una cámara interna *i* y una cámara externa *e*. También tiene un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

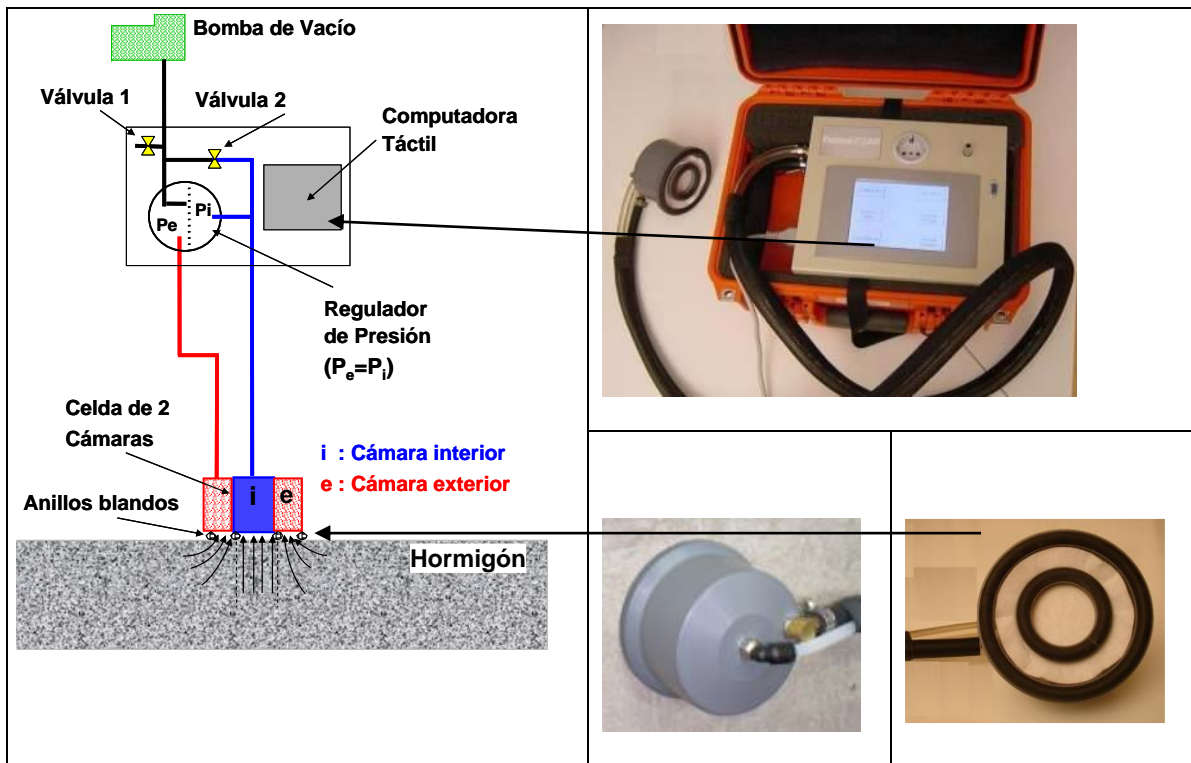


Figura 2.9 Esquema y detalles del “Método Torrent”. (Tomado de Torrent, 2010)

Procedimiento operacional del equipo.

1. Crear vacío en ambas cámaras mediante la bomba, manteniendo la válvula 1 abierta y la 2 cerrada.
2. 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 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.
3. 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.
4. El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al fin del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire K_t (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.
5. La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire a presión atmosférica.

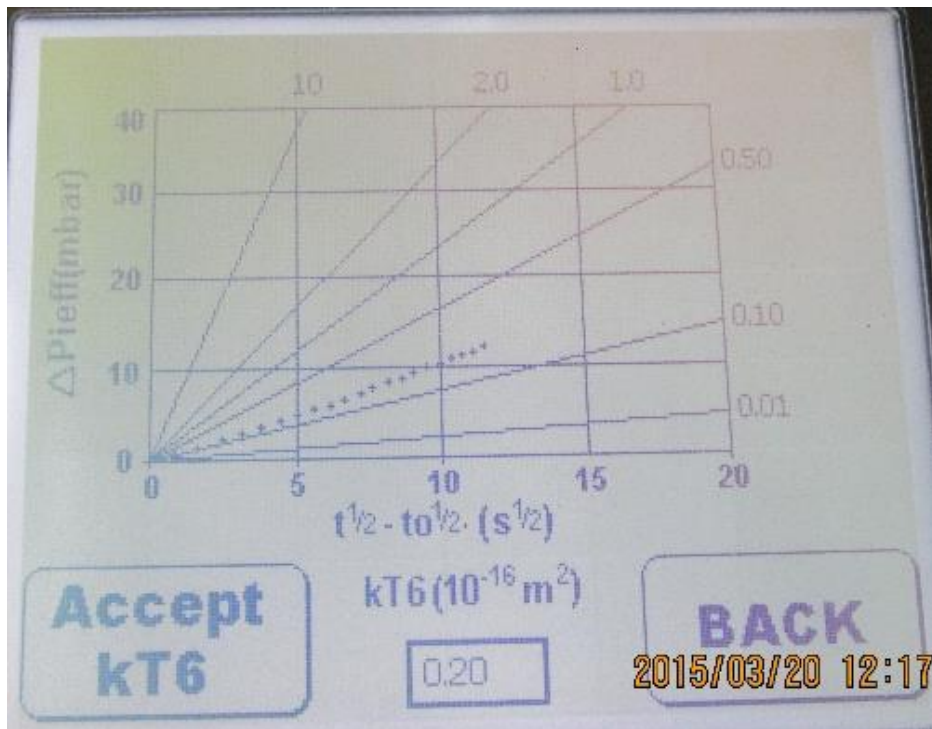


Fig. 2.10 Pantalla del Permea- TORR.

Dado que en este método la geometría del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad, tal como se describe en (Torrent and Frenzer, 1995), aplicando la Ecuación 2.1.

$$k_t = \left(\frac{V_c}{A} \right) \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left(\frac{\ln \left(\frac{p_a + p}{p_a - p} \frac{p_a - p_0}{p_a + p_0} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right) \quad (2.1)$$

Donde:

Kt: coeficiente de permeabilidad al aire [m²]

Vc: volumen de la cámara interior [m³]

A: área de la cámara interior [m²] μ: viscosidad dinámica del aire [Ns/m²] ε: porosidad del hormigón [-] pa: presión atmosférica [N/m²]

p_0 : presión en la cámara interior al inicio del ensayo ($t_0= 60$ s) [N/m²]

p : presión en la cámara interior al final del ensayo t ($t \leq 360$ s) [N/m²]

Posteriormente se clasifica el hormigón según la tabla 2.12 en función del coeficiente K_t .

Tabla 2.12 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de K_t .

Clasificación	K_t (10^{-16} 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

2.4 Resultados obtenidos

2.4.1 EPI

En la siguiente tabla 2.13 se muestran los resultados de los ensayos de carbonatación, resistencia a compresión y permeabilidad al aire de los testigos extraídos del sitio de exposición fabricados en la EPI.

Muestra	Resistencia de diseño	Cemento kg/m ³	a/c	Resistencia (MPa)				Carbonat (mm)	Permeabilidad al aire	
				3	7	28	360		28	360
M381	25 MPa	360	0,47	-	21,00	31,40	36,40	1,9	0,023	0,001
M-25	25 MPa	360	0,47	-	18,50	30,80	27,50	2,61	0,1	0,16
M-32										
P-35	25 MPa	300	0,40	17,40	-	27,90	17,29	5,43	0,34	0,01
M-30	20 MPa	330	0,47	-	19,00	24,40	15,00	5,79	0,25	0,12
M-35										
P-35	20 MPa	270	0,59	15,10	-	26,80	27,10	4,42	0,18	-

Tabla 2.13 Resultados de la EPI.

2.4.2 CIDC

Tipos	Resistencia de diseño	Cemento kg/m ³	a/c	Resistencia(MPa)			Carbonat (mm)	Permeabilidad al aire
				7	28	90		
SGR	30 MPa	404	0,42	19,59	31,16	33,15	1,55	0,360
P	30 MPa	417	0,42	28,01	36,47	40,96	no	0,57

Tabla 2.13 Resultados del CIDC.

Los resultados obtenidos en el CIDC de los ensayos realizados a los especímenes elaborados con cemento LC₃remolido (SGR) y el patrón o Portland se pueden apreciar en la tabla 2.14, para apreciar una información más detallada de dichos resultados puede remitirse al [anexo I y II](#).

2.5 Conclusiones parciales del capítulo

- Las mezclas producidas con el aglomerante SIG B45, requirieron una mayor cantidad de aditivo, obteniéndose un asentamiento superior, en comparación con los hormigones producidos con el cemento Portland ordinario P-35.
- Los especímenes fabricados con el aglomerante ternario SIG B45 obtuvieron valores de resistencia a compresión similares a los obtenidos con el cemento Portland P-35.
- La permeabilidad al aire en especímenes de hormigón producidos con el aglomerante SIG B45 es inferior, en comparación con los valores obtenidos de este coeficiente en hormigones elaborados con cemento P-35.
- La medición de la permeabilidad al aire por el método de Torrent en probetas, es una medida adecuada de la calidad del hormigón estudiado y constituye un paso de avance ya que es una forma rápida y segura.

CAPÍTULO 3. Análisis del comportamiento de elementos y especímenes de hormigón hidráulico.

El presente capítulo realiza un análisis integral de la experimentación realizada a lo largo de la investigación concebida, mediante el análisis de los resultados obtenidos de ensayos realizados a especímenes y elementos de hormigón, producido con aglomerantes de Bajo Contenido de Carbono SIG B45 y Cemento Portland P-35, con la finalidad de determinar algunas propiedades físico mecánicas de este material compuesto de gran aplicación en la actualidad. También se puede percibir como al transcurrir el tiempo los especímenes de bajo carbono se hacen más durables.

En el apartado 3.1 se realiza el análisis de todos los corolarios logrados en el CIDC.

En el apartado 3.2 se estudian todos los resultados obtenidos en la EPI.

3.1 Análisis de resultados del CIDC

3.1.1 Estudio de la resistencia a compresión

En la figura 3.1 se exponen los resultados de la resistencia a compresión de los distintos especímenes comprobados para edades de curado de 0, 3 y 28 días. Cada valor corresponde a la media de 3 probetas ensayadas, comparándose las muestras LC³ con cemento remolido y los patrones elaborados con cemento Portland.

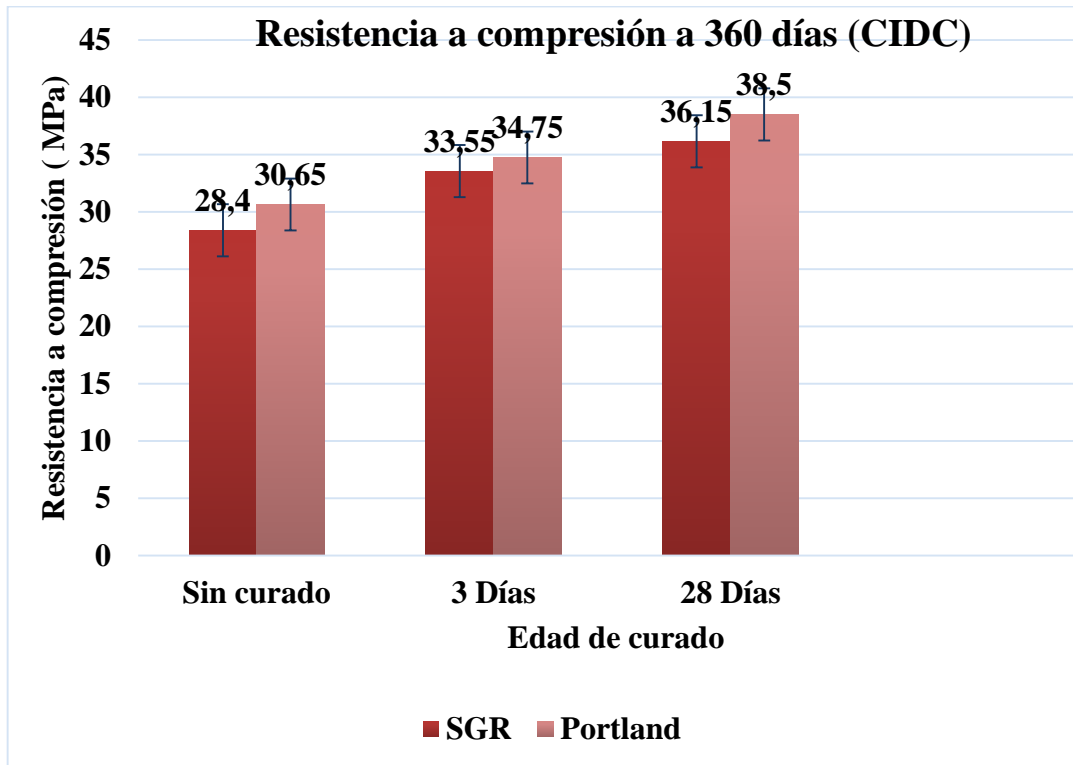


Fig. 3.1 Resistencia de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

Como se puede apreciar en la figura 3.1 a medida que se curaron mejor las probetas, fue aumentando la resistencia de dichos especímenes, ya que se hidrata mejor el cemento y se hace más impermeable, siendo siempre mayor la de las probetas elaboradas con cemento Portland que las del LC³ aunque la diferencia no es notable, debido a que este era un cemento envejecido, mientras que el Portland era cemento fresco traído de la fábrica de Cienfuegos.

3.1.2 Estudio de la carbonatación

En la figura 3.2 se muestran los resultados de la carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento LC³ para edades de curado de 0, 3 y 28 días. Cada valor corresponde a la media de 3 probetas ensayadas.

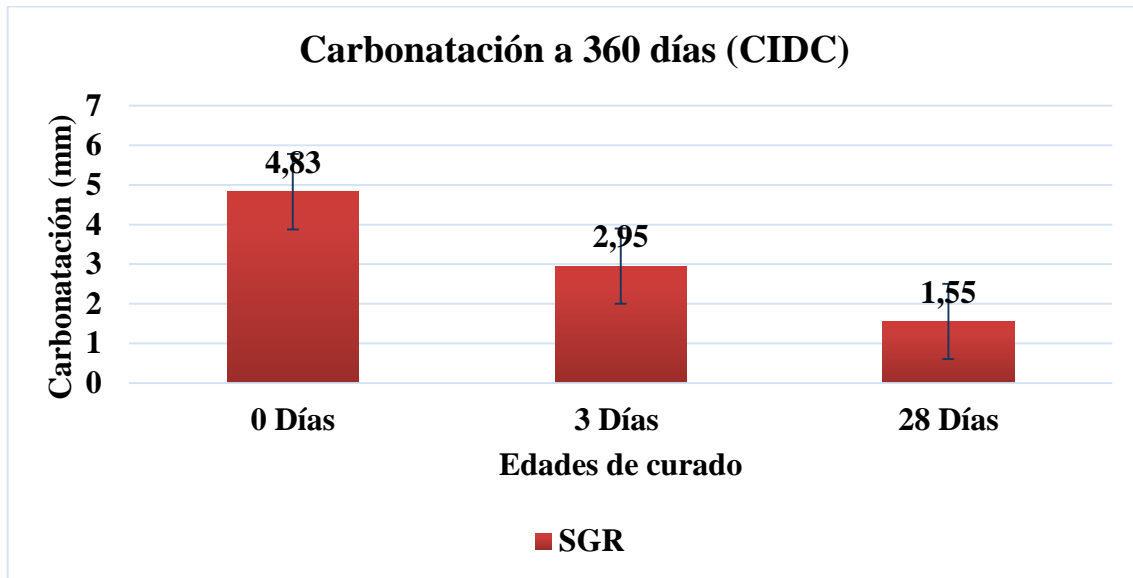


Fig. 3.2 Carbonatación de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

En la figura 3.2 se muestra como a medida que el tiempo va distando la carbonatación se hace menor, ya que disminuye la estructura de poros de los hormigones elaborados con este cemento, puesto que se impermeabilizan los poros capilares y los conductos se hacen más cortos.

3.1.3 Estudio de la permeabilidad al aire

En la figura 3.3 que se muestra a continuación, se puede estimar el comportamiento del coeficiente de permeabilidad al aire en los especímenes de cemento Portland y LC³ analizados para edades de curado de 0, 3 y 28 días. Cada valor corresponde a la media de 5 probetas ensayadas.

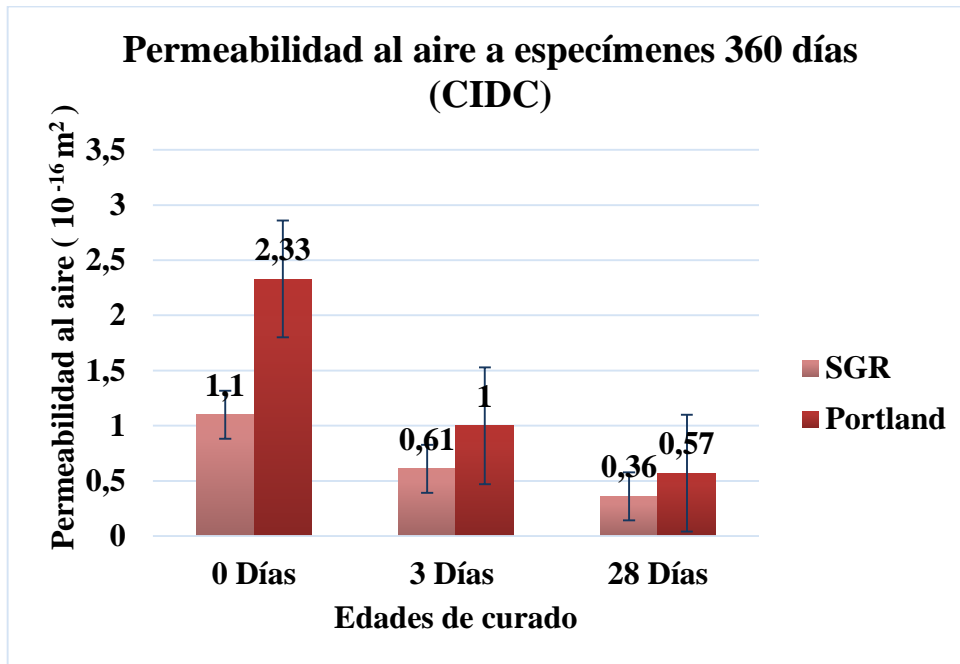


Fig. 3.3 Permeabilidad al aire de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

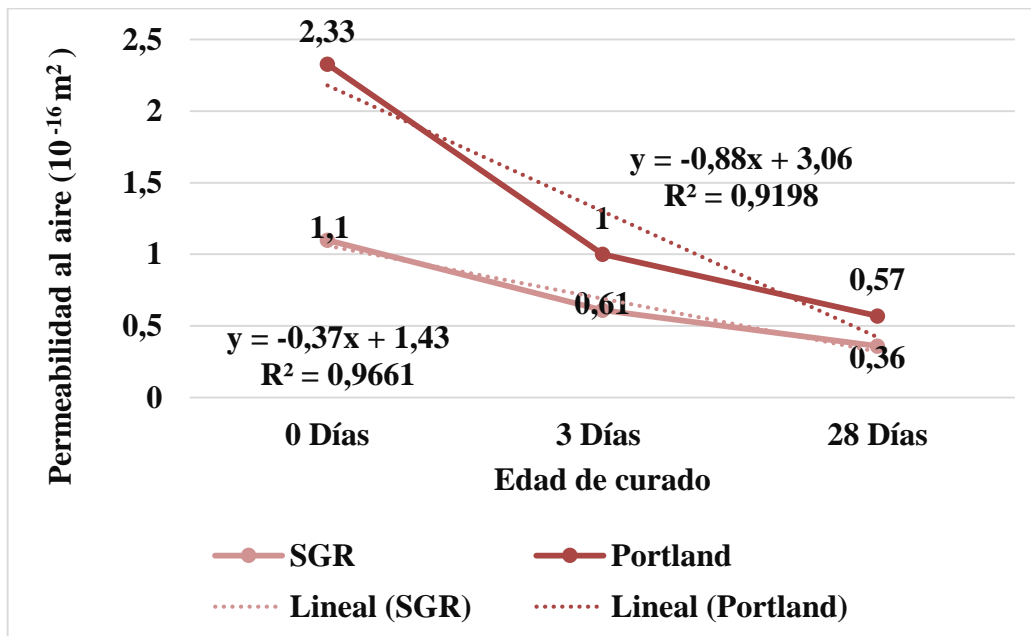


Fig. 3.4 Permeabilidad al aire de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

Las figuras 3.3 y 3.4 muestran que los valores de SGR (LC^3) siempre son menores que los del Portland debido a que este hormigón fue elaborado con un cemento mucho más fino que el Portland puesto que era un cemento envejecido y se remolió una vez más, por lo que los espacios intergranulares quedaron más ocupados, se compacta mejor y es menos permeable. También se puede ver como la línea de tendencia del LC^3 tiene mejor ajuste que la del Portland.

3.1.4 Análisis de permeabilidad contra carbonatación

En la figura 3.5 se exponen los resultados de la permeabilidad al aire contra carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento de bajo carbono (LC^3), comprobados para edades de curado de 0, 3 y 28 días.

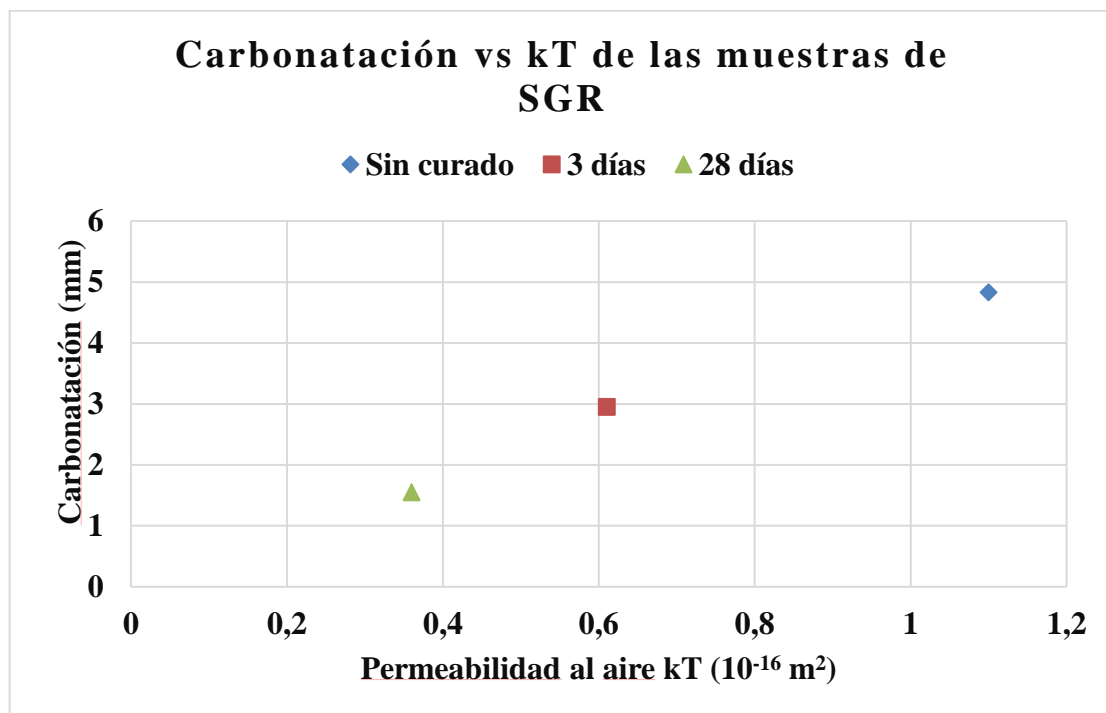


Fig. 3.5 Permeabilidad al aire vs Carbonatación a 360 días, sometido a diferentes regímenes de curado para especímenes elaborados con LC^3 .

En la figura 3.5 se muestra la carbonatación tiene una estrecha relación con la permeabilidad al aire y a medida que este coeficiente es menor las muestras se carbonatan menos ya que a mayor porosidad más fácil penetran los agentes

físicos y químicos en el mismo y se carbonata con mayor rapidez, y siendo el curado de 28 días el de mejor resultado siempre.

3.1.5 Análisis de permeabilidad contra resistencia a compresión

En la figura 3.6 se exponen los resultados de la permeabilidad al aire contra resistencia a compresión de los distintos especímenes elaborados con cemento de bajo carbono (LC³), comprobados para edades de curado de 0, 3 y 28 días.

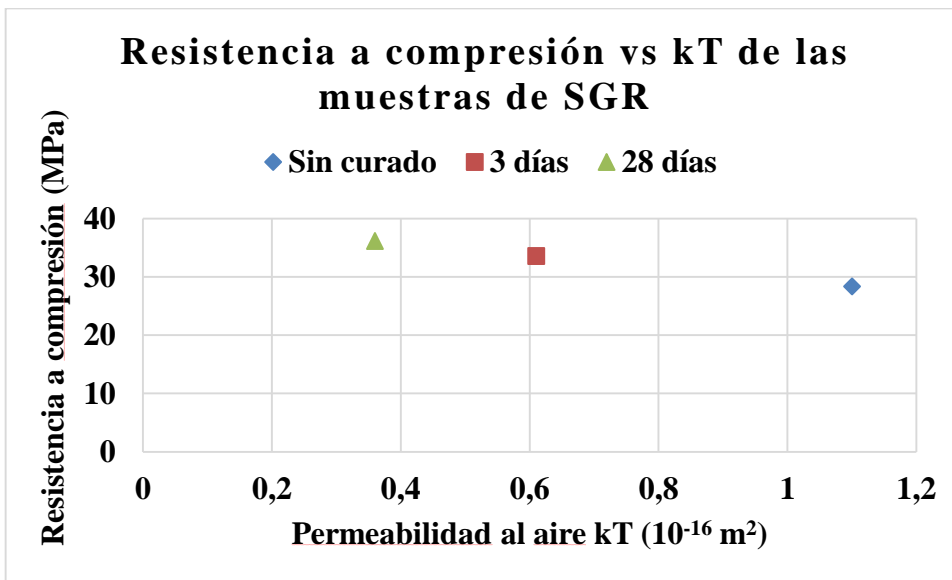


Fig. 3.6 Permeabilidad al aire vs Resistencia a compresión a 360 días, sometido a diferentes regímenes de curado para especímenes elaborados con LC³.

El transporte de un fluido está controlado por la permeabilidad del hormigón, cuanto menos poroso sea un hormigón, mayor resistencia tendrá y, si ha tenido un buen curado, será menos permeable, como se pudo apreciar en la figura 3.6, y a medida que tiene un mejor curado se obtiene resultados mayores en cuanto a resistencia.

3.2 Análisis de resultados de la EPI

3.2.1 Estudio de la resistencia a compresión

En la figura 3.7 se exponen los resultados de la resistencia a compresión de los distintos especímenes, comparándose las muestras elaborados con cemento LC³ y los patrones Portland.

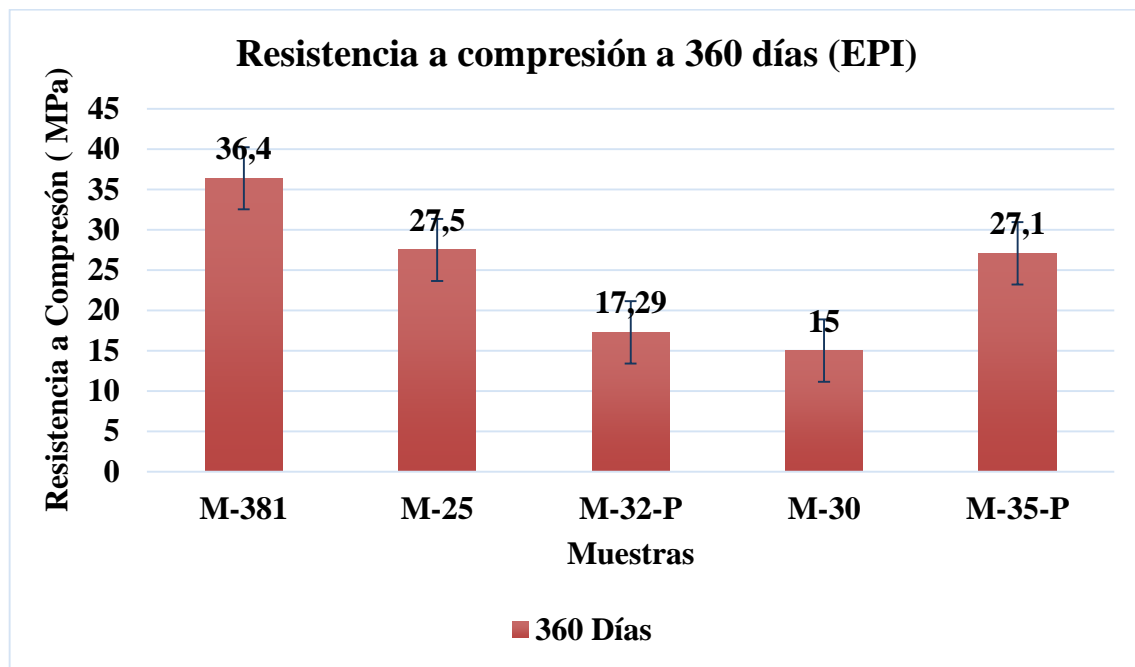


Fig. 3.7 Resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días.

Como se puede apreciar la muestra M-381 presentó los mejores resultados en cuanto a resistencia a compresión a 360 días.

3.2.2 Estudio de la carbonatación

En la figura 3.8 se muestran los resultados de la carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento LC³ y Portland.

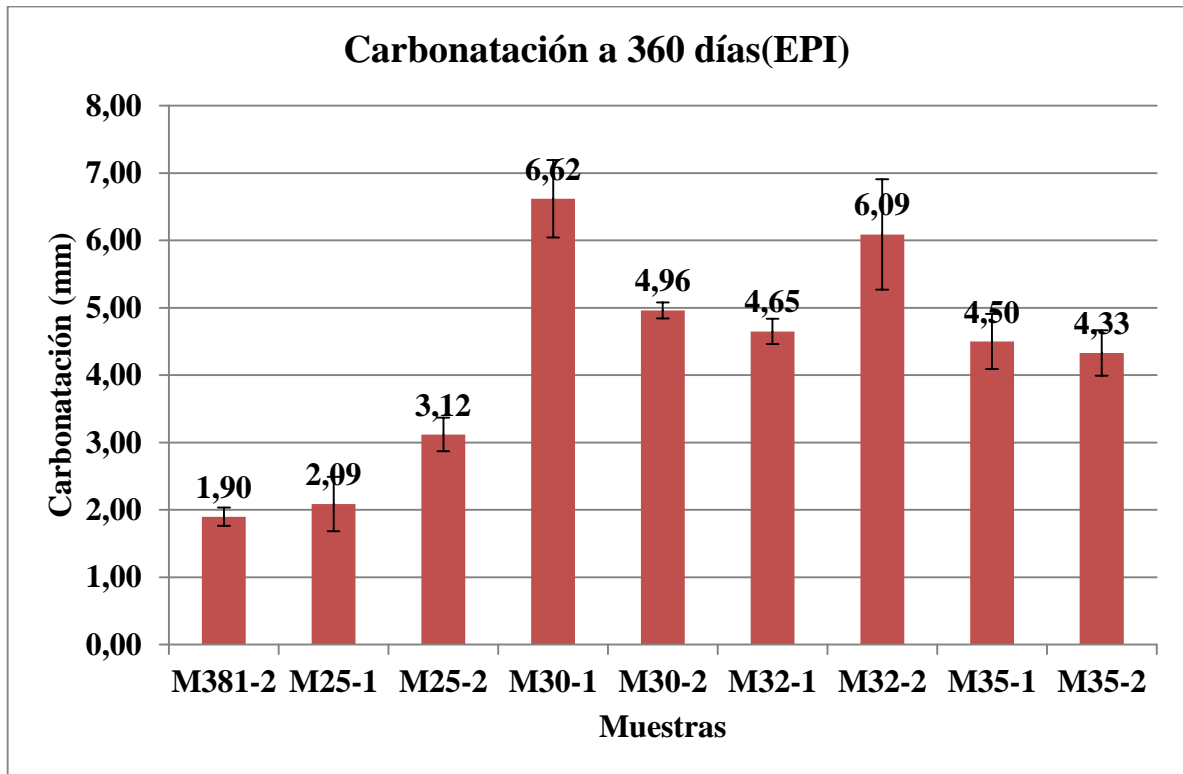


Fig. 3.8 Carbonatación de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días.

Se puede concluir que indudablemente los mejores resultados los arroja la muestra M-381 siendo elaborada con LC³ además de ser la muestra de mayor tiempo de elaborada, mientras que la M-30 también elaborada con LC³ no da resultados iguales pero la misma está diseñada para una menor resistencia y posee menos contenido de cemento, pero aun así los especímenes elaborados con LC³ son más resistentes en el tiempo a la carbonatación que los elaborados con Portland.

3.2.3 Estudio de la permeabilidad al aire

En la figura 3.9 que se muestra a continuación, se puede estimar el comportamiento del coeficiente de permeabilidad al aire en los especímenes de cemento Portland y LC³.

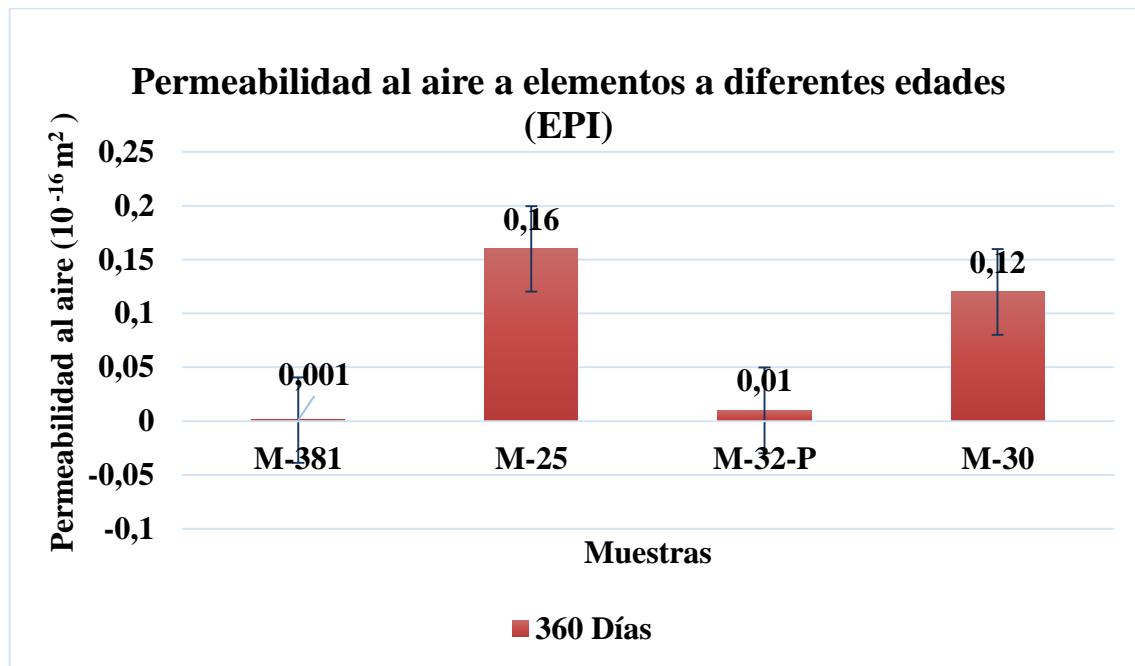


Fig. 3.9 Permeabilidad al aire de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días.

En este caso la muestra M-35 no pudo ser ensayada debido a que no cumplía con los parámetros de porcentaje de humedad, pero también coincide con los ensayos anteriores donde la muestra M-381 de LC³ provee los mejores resultados, aunque no están muy distantes unos de otros siendo, valores bajos por lo que los hormigones son poco permeables y en el caso de M-32 elaborada con cemento Portland es el que le sigue al M-381 porque fue el de menor relación agua cemento y cuanto más baja sea, más impermeable será el hormigón.

3.2.4 Análisis de la permeabilidad al aire contra carbonatación

En la figura 3.10 se exponen los resultados de la permeabilidad al aire contra carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento de bajo carbono (LC³) y Portland.

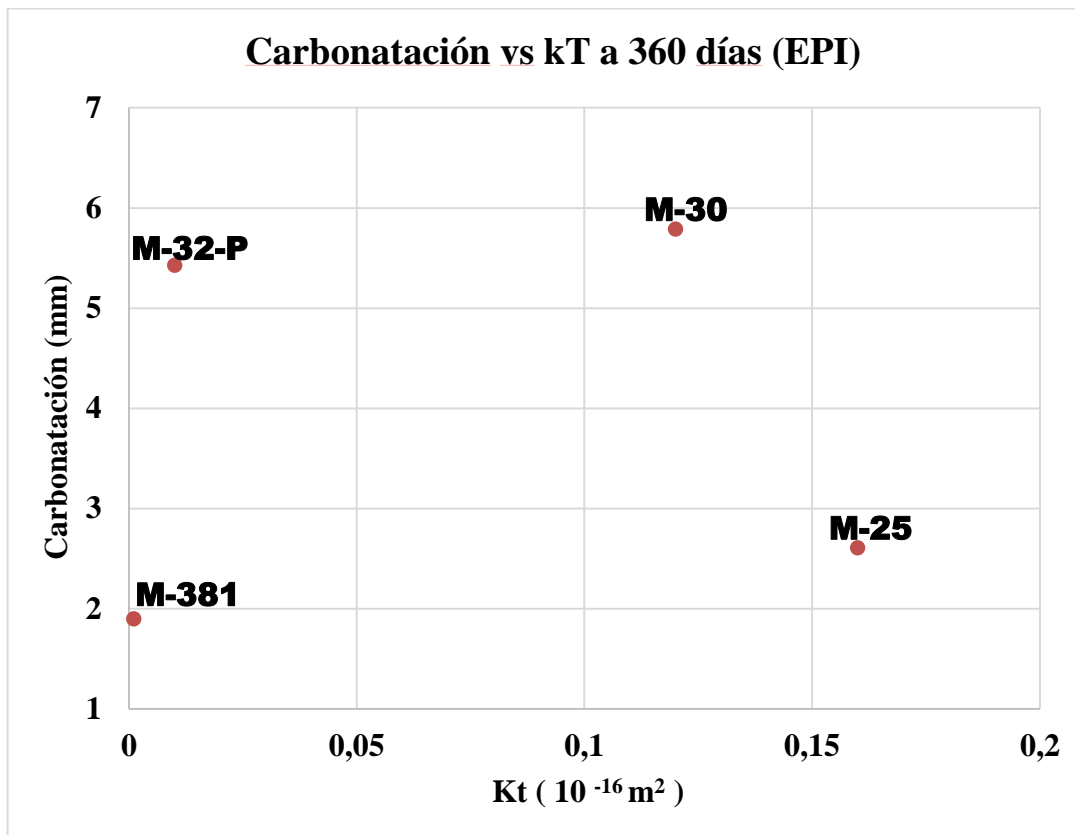


Fig. 3.10 Permeabilidad al aire vs Carbonatación a 360 días, para especímenes elaborados con LC³ y Portland.

Como se muestra en la figura 3.10 no cabe dudar que los resultados del hormigón elaborado con cemento LC³ es más durable que el cemento Portland, siendo más impermeable y menos carbonatado.

3.2.5 Análisis de la permeabilidad al aire contra resistencia

En la figura 3.11 se exponen los resultados de la permeabilidad al aire contra resistencia a compresión de los distintos especímenes elaborados con cemento de bajo carbono (LC³) y Portland.

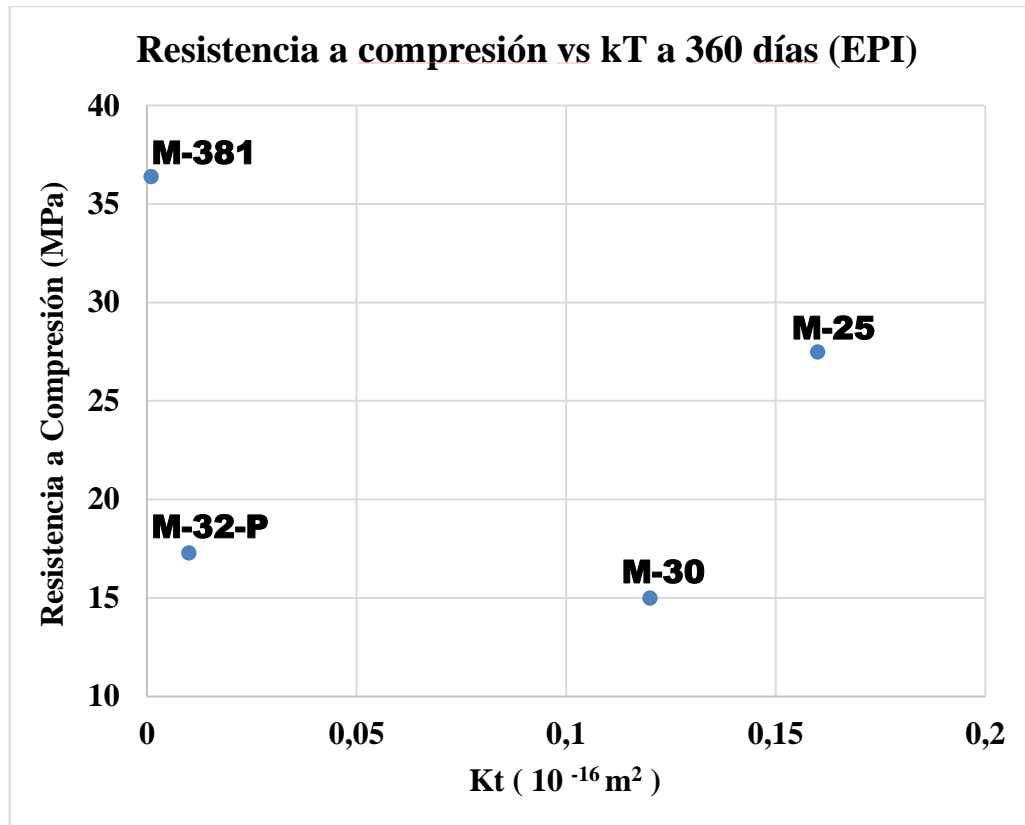


Fig. 3.11 Permeabilidad al aire vs Resistencia a compresión a 360 días, para especímenes elaborados con LC³ y Portland.

En la figura anterior se arriban a las mismas conclusiones quedando en la cima de mejores resultados la muestra M-381 fabricada con LC³ a pesar que los resultados de permeabilidad no distan mucho unos de los otros, siendo una permeabilidad muy buena.

3.3 Conclusiones del capitulo

Los resultados obtenidos en esta investigación, a partir de los ensayos (resistencia a compresión, carbonatación y ensayo de permeabilidad al aire por el método de Torrent); demostraron que los hormigones elaborados con cemento SIG-B45

puede mejorar la durabilidad e incluso supera al cemento Portland en muchos escenarios.

Las siguientes conclusiones parciales evidencian cualitativamente este planteamiento:

- La resistencia a compresión a 360 días en el CIDC, de las muestras elaboradas con LC³ es inferior que la de hormigones elaborados con Portland, debido a la diferencia de edades de los cementos.
- La permeabilidad al aire por el método de Torrent fue inferior en todos los hormigones fabricados con LC³ con respecto a las muestras fabricadas con Portland, en el caso del CIDC debido a una menor finura.
- La muestra M-381 de la EPI la cual es elaborada con LC³ fue la que reflejó mejores resultados por encima del Portland de manera general, tanto en permeabilidad al aire, carbonatación y resistencia a compresión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- ✚ La utilización del método de Torrent para medir la permeabilidad al aire de los hormigones supone una gran ventaja al ser un método no destructivo.
- ✚ La incorporación de Materiales Cementicios Suplementarios (MCS), en las mezclas de hormigón influye de manera efectiva en la resistencia al ataque de agentes agresivos en el hormigón.
- ✚ El empleo del cemento LC³ arrojó mejores resultados de carbonatación, lo que puede ser interpretado como una disminución en la estructura de poros de los hormigones elaborados con este cemento, puesto que se impermeabilizan los poros capilares.
- ✚ Los resultados de la resistencia a compresión es directamente proporcional al grado de curado que posean los especímenes, tanto en LC³ como en Portland, debido a que se hidrata mejor el cemento y se hace más impermeable.

Recomendaciones

- Continuar el estudio de los hormigones para conocer el comportamiento en el tiempo de dichos especímenes en cuanto a carbonatación, permeabilidad al aire y resistencia a compresión.
- Estudiar dichas propiedades en hormigones con un mismo diseño de experimento, dosificación y materiales pero en ambientes diferentes para establecer una comparación y arribar a resultados de mayor información.

- Continuar con el estudio de la muestra M-381 elaborada con cemento de bajo carbono a partir de los resultados que aportó a dicha investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, S. 2006. Pozzolanic activity of various siliceous materials. *Cement and Concrete Research*, 36, 1735-1739.
- AL-AKHRAS, N. M. 2006. Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and concrete research*, 36, 1727-1734.
- ALONSO LÓPEZ DE CASTRO, J. L. 2013. *Concepción de un sitio de exposición en Cuba para el estudio de la durabilidad de hormigones en ambientes marinos*. . Marta Abreu de Las Villas.
- ALUJAS, A. 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*. Universidad Central de Las Villas.
- ANDRÉS, L. M. V. 2014. *CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA - CALIZA*. Marta Abreu de las Villas.
- BAI, J., WILD, S. & SABIR, B. 2003. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater. *Cement and Concrete Research*, 33, 353-362.
- BERGAYA, F. & LAGALY, G. 2013. *Handbook of clay science*, Newnes.
- BICH, C., AMBROISE, J. & PÉRA, J. 2009. Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Applied Clay Science*, 44, 194-200.
- BODDY, A., HOOTON, R. & GRUBER, K. 2001. Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 31, 759-765.

- CÁNOVAS, M. F. 2007. Hormigón, Colegio de Ingenieros de Caminos. *Canales y Puertos, Madrid*.
- CASTILLO, R., FERNÁNDEZ, R., ANTONI, M., SCRIVENER, K., ALUJAS, A. & MARTIRENA, J. F. 2010. Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista ingeniería de construcción*, 25, 329-352.
- CEMENT, A. P. 1993. ASTM C 150, Type I or II, except Type III may be used for cold-weather construction. *Provide natural color or white cement as required to produce mortar color indicated*, 1.
- EBENSPERGER, L. & TORRENT, R. 2010. Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. *Revista ingeniería de construcción*. Santiago, Chile.
- FERNÁNDEZ LUCO, L. 2009. Importancia del curado en la calidad del hormigón de recubrimiento. Métodos experimentales para identificar o prevenir el curado deficiente.
- . Instituto español del cemento y sus aplicaciones (IECA).
- FERREIRA, R. M. 2004. Probability-based durability analysis of concrete structures in marine environment.
- GARTNER, E. M. & MACPHEE, D. E. 2011. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41, 736-749.
- GONÇALVES, J., TAVARES, L., TOLEDO FILHO, R. & FAIRBAIRN, E. 2009. Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick. *Construction and Building Materials*, 23, 1971-1979.
- HABERT, G., CHOUPAY, N., ESCADEILLAS, G., GUILLAUME, D. & MONTEL, J. 2009. Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*, 43, 322-330.
- HERNÁNDEZ-CASTAÑEDA, O. & MENDOZA-ESCOBEDO, C. 2006. Durabilidad e infraestructura: retos e iMPacto socioeconómico. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 7, 57-70.
- HERNÁNDEZ LÓPEZ, Y. E. 2009. Evaluación de microsílíce en la reparación de vigas de hormigón armado contaminado con cloruros.

- JUSTICE, J. M. 2005. Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials.
- LAWRENCE, P., CYR, M. & RINGOT, E. 2005. Mineral admixtures in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength. *Cement and concrete research*, 35, 1092-1105.
- 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, J. 2003. Una alternativa ambientalmente coMPatible para disminuir el consumo de aglomerantes de clínquer de cemento Pórtland: El aglomerante calpuzolana como adición mineral activa. Resumen de la Tesis. p 65. *Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones*.
- MEHTA, P. & MONTEIRO, P. 2001. Chapter 8: Admixtures. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. [Links].
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. & EDUCATION, M.-H. 2006. *Concrete: microstructure, properties, and materials*, McGraw-Hill New York.
- NC 95 2011. Cemento Portland-Especificaciones.
- NC-179: 2002. Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo.
- NC-182: 2002. Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (no. 200). Método de ensayo
- NC-355:2004. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicios.
- NC-251 2005. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos, para evaluar la conformidad.
- NC-178 2002. Áridos. Granulometría. Cuba.
- NC-187 2002. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. Cuba.
- NC-250 2005. Requisitos de durabilidad para el diseño y construcción de edificaciones y obras civiles de hormigón estructural.

- NC-120 2007. Hormigón Hidráulico. Especificaciones. Cuba.
- NC-221 2002. Elaboración de probetas para ensayos. Cuba.
- NC-244 2003. Hormigón endurecido. Determinación de la Resistencia a Compresión de Probetas Cilíndricas. Cuba.
- NC-355 2004. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio
- PAPADAKIS, V. & TSIMAS, S. 2002. Supplementary cementing materials in concrete: Part I: efficiency and design. *Cement and Concrete Research*, 32, 1525-1532.
- PÉREZ MÉNDEZ, L. R. 2010. *Vida útil residual de estructuras de hormigón armado afectadas por corrosión* Trabajo de fin de Máster Universidad politécnica de Madrid
- RAMLOCHAN, T. & THOMAS, M. 2000. Effect of metakaolin on external sulfate attack. *ACI Special Publication*, 192.
- SABIR, B., WILD, S. & BAI, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441-454.
- SAMET, B., MNIF, T. & CHAABOUNI, M. 2007. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: formulation of blended cement. *Cement and Concrete Composites*, 29, 741-749.
- TALERO, R. 2005. Performance of metakaolin and Portland cements in ettringite formation as determined by ASTM C 452-68: kinetic and morphological differences. *Cement and Concrete Research*, 35, 1269-1284.
- TORRENT, R. 1999. UN METODO RAPIDO Y NO-DESTRUCTIVO PARA MEDIR LA PERMEABILIDAD AL AIRE DEL HORMIGON
- Buenos Aires - Argentina: Instituto del Cemento Portland Argentino
- TORRENT, R. 2003. Nuevo Enfoque para Asegurar la Vida Util de Estructuras de Hormigón Armado. *In: LTD., H. G. S. & DIVISION, C. A. (eds.). Holderbank - Suiza.*

-
- TORRENT, R. & FERNÁNDEZ LUCO, L. 2010. La medición in situ de la permeabilidad al aire: una herramienta para el diagnóstico y el control de calidad de ejecución Córdoba, Argentina: Facultad de Ingeniería
- WONG, H. & RAZAK, H. A. 2005. Efficiency of calcined kaolin and silica fume as cement replacement material for strength performance. *Cement and Concrete Research*, 35, 696-702.

ANEXOS

Anexo I Resultados de los ensayos realizados en el CIDC a los especímenes de LC₃

Muestra	Edad de curado (días)	Humedad (%)	Kt	Promedio	Carbonat (mm)	Condiciones Ambientales		Resistencia (MPa)
						Humedad (%)	Temperatura (°C)	
1	0	4,3	1,5	1,1	4,83	72	25,4	28,4
		3,8						
2		4,5	0,8					
		3,5	6					
3		4,4	0,9					
		3,7	2					
4		4,5	1,1					
		3,7	2					
1	3	4	0,4	0,63	2,95	72	25,4	33,55
		3,4	9					
2		4,5	0,4					

Anexos

		3,5	7					
3		4,1	0,5			72	25,4	
		3,5	9					
4		4,2	0,7			72	25,4	
		3,5	6					
5		4,2	0,8			72	26,9	
		4,3	4					
1		4,1	0,3	0,354	1,55	72	25,4	
		-	4					
2		4,1	0,3			72	25,4	
		3,3	6					
3	28	4,4	0,3			72	26,9	36,15
		3,5	8					
4		4,5	0,3			72	26,9	
		3,3	2					
5		4,8	0,3			72	26,9	
		3,8	7					

Anexos

Anexo II Resultados de los ensayos realizados en el CIDC a los especímenes patrones

Muestra	Edad de curado (días)	Humedad (%)	Kt	Promedio	Carbonat (mm)	Condiciones Ambientales		Resistencia (MPa)
						Humedad (%)	Temperatura(°C)	
1	0	4,6	1,95	2,32	0	66	27,5	30,65
		3,7						
2		4,4	1,715					
		4,1						
3		4,3	4,25					
		3,9						
4		4,1	1,4					
		3,6						
1	3	4,7	0,71	0,99	0	66	27,5	34,75
		4						
2		4,8	1,13					
		4						
3		4,5	0,71					
		3,7						
4		4,5	1,11					
		3,7						
5		4,1	1,2					

Anexos

		3,5							
6		4,8	1,11						
		4							
1	28	4,7	0,57	0,57	0	66	27,5	38,5	
		4							
2		4,5	0,51						
		3,8							
3		4,2	0,44						
		4,1							
4		4,6	0,67						
		3,9							
5		4,4	0,65						
		3,8							