

UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS

FACULTAD DE CONSTRUCCIONES

INGENIERÍA CIVIL



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Elaboración de base de datos para respaldar los parámetros técnicos a considerar en la normativa cubana para el empleo del Cemento de Bajo Carbono (LC³) en hormigones.

Diplomante: Alney Villegas López

Tutores: Dr. Ing. Sergio Betancourt Rodríguez
Ing. Dayran Rocha Francisco

2015

Pensamiento

Las verdades que revela la ciencia superan siempre a los sueños que destruye.

Ernest Renan

Dedicatoria

A mis padres Armando y Zoraida por brindarme su ejemplo, su fuerza y su apoyo incondicional durante toda mi vida.

A mi hermano por su gran apoyo, por mostrarme el camino y ayudarme a ser mejor cada día.

A mis tíos por ayudarme y quererme como si fuera un hijo más.

A mis primos por animarme cuando pensé que me quedaba solo.

A todos los que comparten conmigo la felicidad de haber llegado al final de mi carrera.

Agradecimientos

A mi tutor Sergio Betancourt por acompañarme en este desafío y por brindarme su apoyo y conocimiento.

Al profesor Dayran por su importantísima ayuda.

A todos mis amigos que nunca me dieron la espalda cuando los necesité a mi lado.

A mis tíos Félix, Odalis, Amarilis y Yosbani por hacerme más fácil la vida de estudiante.

A Milay por su apoyo y ayuda, por haberse ganado mi cariño.

A toda mi familia por ayudarme a cumplir mi sueño.

Gracias.

RESUMEN

El siguiente trabajo presenta una base de datos experimentales realizados para respaldar los parámetros técnicos a considerar en la normativa cubana para el empleo del Cemento de Bajo Carbono (LC³) en hormigones. El uso de la NC 120:2014 “Hormigón Hidráulico-Especificaciones” como guía para evaluar la durabilidad de las muestras de hormigón endurecido es uno de los logros más significativos de la investigación ya que el uso de otras normas internacionales podría falsear los resultados o sus interpretaciones. Se logró recopilar un amplio volumen de información que puede ser utilizado para la evaluación del comportamiento durable de elementos fabricados con hormigones utilizando Cemento de Bajo Carbono y fundamentar la inclusión de este cemento en la normativa cubana, para su puesta en práctica a escala industrial.

Palabras Clave: normativa, Cemento de Bajo Carbono, evaluación, durabilidad.

ÍNDICE

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción..... | 1 |
| Capítulo I: Análisis de la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de los cementos. | 6 |
| 1.1 Cemento Pórtland ordinario..... | 6 |
| 1.1.1 Desarrollo del cemento Portland ordinario | 6 |
| 1.1.2 Características químicas del Cemento Pórtland Ordinario (CPO)..... | 7 |
| 1.2 Desarrollo del empleo de los materiales cementicios suplementarios..... | 8 |
| 1.2.1 Definición y clasificación de las puzolanas | 8 |
| 1.2.2 Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario..... | 10 |
| 1.2.3 Limitantes del empleo de materiales cementicios suplementarios como sustitutos del clínker..... | 10 |
| 1.2.4 Ventajas y desventajas del uso de puzolanas como adición al cemento Portland..... | 13 |
| 1.3 Cemento de bajo carbono compuesto por clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada.. | 14 |
| 1.3.1 Producción del cemento a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada en Cuba | 14 |
| 1.4 Análisis de la normativa de cementos a nivel internacional..... | 14 |
| 1.4.1 Evolución de la normativa europea para la producción de cementos | 14 |
| 1.4.2 Desarrollo de normativa para cementos en Norteamérica | 16 |
| 1.4.3 Influencia de la Organización Internacional de Normalización (ISO) al desarrollo de las normas..... | 17 |
| 1.4.4 Normas para cementos en Latinoamérica, principales cambios en su aplicación | 18 |
| 1.4.5 Aparición de las normas por desempeño | 21 |
| 1.4 Normas de cementos en Cuba | 21 |
| 1.4.1 Antecedentes de las normas para cementos en Cuba..... | 21 |
| 1.5 Conclusiones parciales del capítulo..... | 23 |
| Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con Cemento de Bajo Carbono elaborado a base de clínquer-yeso- caliza-arcilla calcinada..... | 25 |
| 2.1 Instructivo técnico | 25 |
| 2.2 Programa experimental | 32 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.1 Características del programa experimental..... | 32 |
| 2.2.2 Tipos de mezclas y lugar donde se evaluaron | 33 |
| 2.3 Principales aspectos de la NC 120-2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones, a tener en cuenta para la evaluación del cemento de bajo carbono..... | 34 |
| 2.4 Sitios de exposición | 35 |
| 2.5 Programa de durabilidad | 38 |
| 2.6 Descripción de los ensayos, metodología para su ejecución | 39 |
| 2.6.1 Medida de la consistencia..... | 39 |
| 2.6.2 Resistencia a compresión | 39 |
| 2.6.3 Migración de iones mediante el protocolo STADIUM..... | 39 |
| 2.6.4 Medición de la permeabilidad al aire. Método de Torrent | 43 |
| 2.6.5 Determinación de la cantidad de iones cloruro en la muestra. Método de Volhard..... | 46 |
| 2.6.6 Determinación de la profundidad de carbonatación | 48 |
| 2.1 Conclusiones parciales del capítulo..... | 51 |
| Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permita demostrar la aptitud de hormigones producidos con Cemento de Bajo Carbono (LC ³) para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones. | 53 |
| 3.1 Dosificaciones de los hormigones | 53 |
| 3.2 Resistencia a compresión a 3, 7,28 días | 56 |
| 3.3 Resistencia a compresión, hormigón de laboratorio (SIG B45) | 56 |
| 3.4 Resistencia a compresión, hormigón de taller (SIG B45) | 57 |
| 3.6 Ubicación de las muestras..... | 59 |
| 3.7 Resultados de los ensayos realizados..... | 59 |
| 3.7.1 Permeabilidad al aire | 59 |
| 3.7.2 Migración de iones mediante el protocolo STADIUM..... | 63 |
| 3.7.3 Cantidad de iones cloruro en la muestra. Método de Volhard..... | 67 |
| 3.7.4 Carbonatación..... | 69 |
| 3.8 Resultados de los ensayos realizados en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC)..... | 70 |
| 3.8.1 Resistencia a la compresión | 70 |
| 3.8.2 Permeabilidad al aire | 71 |
| 3.8.3 Carbonatación..... | 73 |
| 3.8.4 Permeabilidad al aire contra carbonatación | 74 |
| 3.8.5 Permeabilidad al aire contra resistencia a compresión | 74 |

ÍNDICE

| | |
|-----------------------------------------------|----|
| 3.9 Resultados segunda prueba industrial..... | 75 |
| 3.9.1 Dosificaciones de los hormigones..... | 75 |
| 3.9.2 Resistencia a compresión ECOT | 76 |
| 3.9.3 Resistencia a compresión CIDC | 76 |
| 3.10 Conclusiones parciales del capítulo..... | 77 |
| Conclusiones generales | 79 |
| Recomendaciones..... | 80 |
| BIBLIOGRAFÍA | 81 |
| ANEXOS | 84 |

Introducción

Desde la aparición del cemento su producción ha sido considerada un indicador clave en el desarrollo de un país por diversas razones, la principal es que constituye un producto esencial para la fabricación del hormigón, considerado como el material más usado en la industria de la construcción actualmente. La contribución del hormigón, y por tanto del cemento a la construcción de edificaciones, carreteras, túneles, entre otros, hace que su producción sea reflejo del desarrollo económico de las sociedades a nivel global. Sin embargo, su elevada producción mundial ha derivado en consecuencias negativas como son el agotamiento de los recursos naturales, como las materias primas y los combustibles fósiles empleados en su producción, y la industria no es sustentable en términos medioambientales. La búsqueda de soluciones a esta problemática para mejorar la tecnología y la organización social, de forma que el medio ambiente pueda recuperarse a un ritmo similar al que es afectado por la actividad humana, ha derivado en la sustitución del contenido del clínker del cemento Pórtland para reducir los gastos energéticos de la producción de cemento y las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

El Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) ha logrado desarrollar un nuevo tipo de cemento en el cual se reemplaza un porcentaje del clínker, material más costoso del cemento y responsable de alrededor del 60 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono, por una combinación de arcilla calcinada y carbonato de calcio en forma de piedra caliza. Este proyecto ha contado con la colaboración de la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL). Después de varios años de estudio se realizó una Primera Prueba Industrial de producción de este cemento en nuestro país, y como fase complementaria, se inició la experimentación en obras, con una constante supervisión del equipo técnico. En apoyo a esta etapa se verificó el comportamiento del material y sus productos en condiciones reales, obteniéndose resultados que demuestran la aptitud del nuevo cemento. En marzo de 2015 se lleva a cabo una Segunda Prueba Semi-industrial para corregir algunos parámetros técnicos y actualmente se evalúa el material en sitios de exposición con niveles de agresividad que llegan a ser muy altos, aplicándosele ensayos de durabilidad.

Introducción

La puesta en práctica de la producción de dicho cemento y su comercialización requiere de la existencia de una normativa cubana que establezca las especificaciones para su producción y empleo en hormigones. Actualmente las investigaciones realizadas para llegar a la elaboración de esa normativa son limitadas, y la demanda del mercado son cada vez mayores, por lo que es necesario comprobar si los hormigones elaborados con estos cementos cumplen con los parámetros técnicos establecidos en la NC 120:2014, norma que define estos parámetros para los hormigones elaborados con los distintos cementos en Cuba. Para esto se utilizarán los resultados de los ensayos realizados al Cemento de Bajo Carbono (LC³) fabricado en las dos pruebas industriales realizadas hasta el momento.

A partir de la situación planteada anteriormente se decide formular como problema científico a resolver el siguiente:

¿De qué manera el manejo de los parámetros físico-mecánicos y químicos de hormigones elaborados a partir del 2013, empleando variadas formulaciones de Cemento de Bajo Carbono (LC³), contribuye a la realización de una base de datos que evalúe el comportamiento durable del hormigón endurecido en el tiempo, en comparación con los cementos Pórtland cubanos?

Hipótesis de investigación

La creación de una base de datos experimentales a partir de los resultados obtenidos en laboratorios, plantas y sitios de exposición al evaluar hormigones con Cemento de Bajo Carbono (LC³), facilita la evaluación de los procesos y propiedades durables de los hormigones producidos, acorde a los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Objetivo general:

Elaborar una base de datos que permita modelar a través del análisis casuístico de la data experimental el comportamiento de la durabilidad del hormigón acorde a la NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones, al emplear Cemento de Bajo Carbono (LC³), fabricado a escala industrial.

Objetivos específicos:

1- Fundamentar teórica y metodológicamente la evolución de las normativas relacionadas con la producción y empleo de los cementos ternarios y binarios.

2- Analizar los métodos y procedimientos de producción del Cemento de Bajo Carbono producido en Siguaney (Primera Prueba Industrial) y de los parámetros técnicos de los cementos LC³ y Portland en hormigones producidos en Cuba.

3-Confeccionar una base de datos para el manejo y evaluación de parámetros técnicos definidos en la NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones en hormigones elaborados con Cemento de Bajo Carbono (LC³) en Cuba.

- Recopilación de información científica sobre la evolución histórica del cemento y redacción del estado del arte.
- Análisis crítico de la literatura científica publicada sobre la producción de cementos y sobre el empleo de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario.
- Análisis de los parámetros técnicos establecidos en las normas de los hormigones con cementos producidos en Cuba para comparar con los resultados de los ensayos hechos a los elaborados con Cemento de Bajo Carbono.
- Obtener una base de datos experimentales que fundamente la inclusión de los hormigones elaborados con Cemento de Bajo Carbono en la norma cubana NC 120:2014.

Aportes

Aporte Teórico:

Se brinda una base de datos que reúne todas las especificaciones técnicas como respaldo a la propuesta de norma cubana para la producción y empleo del Cemento de Bajo Carbono (LC³) elaborado a base de clínquer-yeso-caliza-arcilla calcinada.

Aporte Técnico:

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

Aporte Social:

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

ambiental. Además, se dispondrá de documentos con carácter legal, que facilitarán las relaciones contractuales entre productores y usuarios.

Estructura de los capítulos:

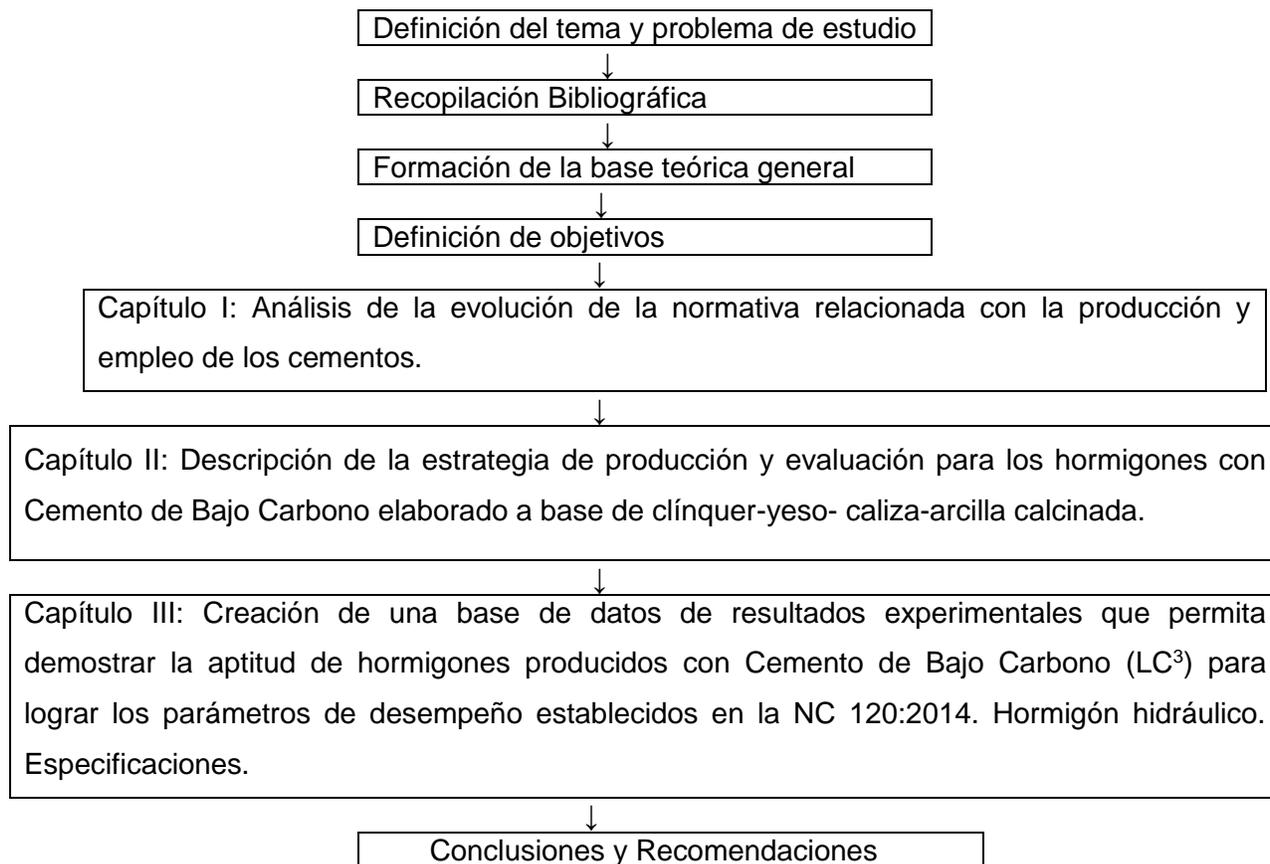
Primer capítulo: Se describe la evolución que ha tenido la normativa de los hormigones en Cuba y el mundo. Se analizan las principales organizaciones de normalización y la normativa de los países líderes en la producción de cemento, haciendo énfasis en los del área latinoamericana. Además se conoce la tendencia actual de la normalización en el mundo.

Segundo capítulo: Se presenta la estrategia de producción del cemento experimental, las condiciones de exposición de las muestras y la descripción de los diferentes ensayos de durabilidad realizados al hormigón elaborado con Cemento de Bajo Carbono según las especificaciones establecidas en la NC 120-2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Tercer capítulo: Se crea una base de datos para la elaboración de una propuesta de norma cubana y se fundamentan los aspectos donde el hormigón con Cemento de Bajo Carbono puede competir con los producidos con otros cementos cubanos.

Posteriormente se brindan las Conclusiones y Recomendaciones del trabajo. Una vez expuestos los tres capítulos se ofrece la Bibliografía utilizada en la realización del trabajo.

Esquema metodológico de la investigación:



Capítulo I: Análisis de la evolución de la normativa relacionada con la producción y empleo de los cementos.

1.1 Cemento Pórtland ordinario

1.1.1 Desarrollo del cemento Portland ordinario

El cemento Pórtland, uno de los componentes básicos para la elaboración del hormigón, debe su nombre a Joseph Aspdin, un albañil inglés que obtuvo la patente para este producto en el año 1824. Su uso generalizado en casi todos los trabajos de construcción, su relativo bajo costo, la posibilidad de lograr una producción masiva y los buenos resultados en sus aplicaciones se han convertido en la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que lo antecedieron, los que han quedado relegados a trabajos menores. (Martirena, 2009).

Actualmente la producción a nivel mundial ha alcanzado niveles sumamente grandes, según el reporte de actividades de (CEMBUREAU, 2013) en 2012 se estimó que la producción global de cemento en ese año alcanzó los 3,6 billones de toneladas, lo que se traduce en un incremento del 3 por ciento en comparación al año anterior. De esta producción mundial, América Latina y el Caribe representan el 4,7 por ciento según las cifras del informe de *International Cement Review*. Este ritmo acelerado continuará según las predicciones para el 2050 de la *World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)* que indican que en un escenario de alta demanda el incremento de la producción alcanzará los 4400 millones de toneladas de cemento, otros pronósticos sitúan la demanda por encima de los 5000 millones (Andrés, 2014).

Esta elevada producción ha llevado a que las emisiones de CO₂ producto de la descarbonatación de las materias primas utilizadas en el proceso de manufactura del cemento y el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía directa e indirecta, alcancen valores insostenibles para el medio ambiente. Sobre la base del modelo estándar de producción de cemento usado actualmente y las tecnologías disponibles, se estima que por cada tonelada de cemento producida se emite entre 0,65 – 0,90 toneladas de CO₂ lo que llevado a los datos de producción anual, sitúan a la industria del cemento como responsable de la emisión de entre el

5 y el 8 por ciento del CO₂ a escala global (Andrés, 2014).

En la producción de CPO la obtención del clínquer es el principal responsable de las emisiones de CO₂ y del consumo de energía, por lo cual se han desarrollado estrategias para obtener cementos de calidad similares o superiores con menos por ciento de clínquer en la mezcla que los componen, esto le ha dado paso a los Materiales Cementicios Suplementarios (MCS).

1.1.2 Características químicas del Cemento Pórtland Ordinario (CPO)

La composición química del CPO tiene una variabilidad limitada, si se tiene en cuenta las características del material, y de forma general, puede expresarse en los siguientes intervalos, tabla (1.1) (Betancourt, 1999).

| Composición | Proporción |
|--------------------------------|-------------------|
| CaO | 60 – 67% |
| SiO ₂ | 17 – 25% |
| Al ₂ O ₃ | 2 – 9% |
| Fe ₂ O ₃ | 0,5 – 6% |

Tabla 1.1 Composición química del CPO

Además, otros elementos químicos que están presente en menores proporciones:

MgO (0 – 0,5%); Na₂O + K₂O (0,5 – 5,0%); SO₃ (1 – 3%), TiO₂, Cr₂O₃, P₂O₅, etc.

El CPO consiste básicamente en una mezcla finamente molida de clínquer y una pequeña cantidad de yeso. El clínquer está compuesto normalmente por cuatro fases principales: alita, belita, aluminato tricálcico y ferrito aluminato tetracálcico. En el caso del cemento se debe incluir entonces al yeso utilizado como retardador del fraguado. Algunas otras fases, como

ciertos sulfatos de álcalis y óxido de calcio están presentes en menores proporciones (Escalona, 2011).

Características químicas de las materias primas:

| Materia Prima | Aportes a los crudos del cemento |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Calizas | Aportan la cal (CaO) y ocasionalmente MgO cuando las calizas empleadas son algo dolomíticas. |
| Arcillas | Proporcionan la sílice (SiO ₂), la alúmina (Al ₂ O ₃) y a veces también óxido férrico (Fe ₂ O ₃). |
| Yeso | Aporta el SO ₃ . |

Tabla 1.2 Aporte de las materias primas al CPO

1.2 Desarrollo del empleo de los materiales cementicios suplementarios

1.2.1 Definición y clasificación de las puzolanas

El término puzolana encierra a todos los materiales que muestren reactividad con cal, fragüen, endurezcan y desarrollen resistencia en presencia de humedad. Según su naturaleza, las puzolanas pueden clasificarse en dos grandes grupos como naturales y artificiales. Las puzolanas naturales son rocas naturales que no precisan nada más que la molienda para poder ser empleadas como material puzolánico. Se encuentran distribuidas en zonas volcánicas del planeta, donde la proyección violenta de magma en la atmósfera trae consigo la formación de material vítreo. Cuando la salida al exterior de magma se produce en una forma menos violenta, da como resultado una ceniza volcánica de similar composición química, pero mucho menos reactiva. Una de sus características es que predominen en ellas en su composición química el silíceo, el aluminio y el hierro (Cook, 1986).

La norma cubana NC TS 528/2007 asume la definición y especificaciones de las puzolanas a partir de los elementos expresados por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM), como aquellos productos naturales o artificiales, silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente a temperatura ambiente con el Ca(OH)₂ para formar compuestos con propiedades cementantes .

La (ASTM) establece la clasificación para las puzolanas según su composición química en dos grupos:

Las puzolanas con bajo contenido de CaO que se denominan según el tipo en N y F, el tipo N son las naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas; y varios materiales que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas. Las del tipo F son cenizas volantes producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso.

Las puzolanas que presentan alto contenido de CaO clasifican como tipo C, son cenizas volantes producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de cenizas además de tener propiedades puzolánicas, también tienen propiedades cementicias (ASTM, 2003).

Uno de los sistemas de clasificación más completos es el presentado por Massazza, en el cual según su origen las puzolanas son divididas en dos grandes grupos: naturales y artificiales.

Las puzolanas naturales incluyen ciertos tipos de rocas piroclásticas, tanto coherentes como incoherentes; rocas altamente silíceas procedentes de materiales alterados de origen mixto; y rocas sedimentarias organógenas o materiales de simple deposición. Las rocas piroclásticas pueden subdividirse en verdaderas puzolanas (materiales incoherentes inalterados) y rocas piroclásticas que han sido afectadas diagenéticamente. Las puzolanas piroclásticas coherentes son depósitos volcánicos en los cuales han tenido lugar procesos diagenéticos que han modificado tanto la estructura como la composición mineralógica de las mismas (Betancourt, 1997).

Las puzolanas artificiales comprenden las arcillas y pizarras calcinadas, así como los residuos de productos cerámicos; las arcillas activadas térmicamente; y una serie de subproductos tanto industriales como agrícolas, entre los que se encuentran el humo de sílice, las cenizas volantes, residuos agrícolas e industriales quemados, etc. Los suelos arcillosos y las pizarras adquieren actividad puzolánica notable cuando son tratadas térmicamente. Para evitar el consumo energético en su obtención, en algunos países se usan preferentemente los residuos de productos cerámicos (Betancourt, 1997).

1.2.2 Arcillas calcinadas como material cementicio suplementario

Los minerales arcillosos son el producto de la meteorización sobre minerales primariamente ígneos como los feldspatos, o formados durante la alteración diagenética a bajas temperaturas. En estado natural presentan muy baja reactividad, pero su estructura cristalina puede ser alterada o destruida por medio de un tratamiento térmico, dando lugar a una puzolana muy reactiva (Liang L.H, 2000).

Las arcillas no calcinadas poseen reactividad al combinarse con cal, pero el rango en que las reacciones se desarrollan es demasiado lento y las resistencias no son lo suficientemente altas para que estas sean consideradas como MCS por la industria del cemento. Para cumplir con las normativas actuales de resistencia a edades tempranas, demanda de agua y durabilidad consideradas para la fabricación de cemento, las arcillas deben ser modificadas estructuralmente – activadas – para aumentar su reactividad y rendimiento. Para lograr este objetivo se calcinan en un rango de temperatura que puede variar entre 700- 900° C, teniendo en cuenta que el tiempo de calcinación influye en la reactividad de la puzolana por lo cual debe ser menor de 2 horas.

1.2.3 Limitantes del empleo de materiales cementicios suplementarios como sustitutos del clínker.

Debido a que los materiales puzolánicos necesitan de la cal y agua para reaccionar, y manifestar propiedades cementantes, el nivel de adición de estos al cemento se ve limitado por la cantidad de portlandita que puede ser generada por determinada cantidad de clínquer.

La reacción puzolánica permite la fijación del Ca(OH)_2 presente en la solución de poros del cemento hidratado bajo la forma de hidrosilicatos insolubles, lo cual también contribuye a incrementar la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón. Al permitir el reemplazo de significativos volúmenes de cemento Pórtland en el aglomerante, se reducen los costos de producción y medioambientales, al disminuir el volumen de emisiones de CO_2 y los costos energéticos por unidad de masa del aglomerante (Navias, 2014).

Un factor esencial en la formulación de los cementos mezclados para su producción industrial es la relación puzolana – clínquer, definido por los porcentajes de sustitución de este último. La

diversidad de valores es bien amplia, por lo que es imposible establecer patrones en este sentido. No obstante, existen normativas que regulan las proporciones de clínquer a emplear, en dependencia de las características de la adición que se utilice y de las futuras aplicaciones o cualidades que se requieran.

La siguiente tabla resume los requerimientos de la norma americana ASTM C595 y de la europea EN 197 en cuanto al contenido de cemento Pórtland para los diferentes tipos de cementos mezclados (Abascal, 2012).

| Norma | Tipo de cemento | Contenido de Clínquer | Minerales mezclados |
|-----------------------|----------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ASTM C595 (2009) | Cemento Pórtland de escorias | 30-75 % | Escorias de alto horno |
| ASTM C-595 (2009) | Cemento Pórtland de escoria modificada | >75% | Escorias de alto horno |
| ASTM C-595 (2009) | Cemento Pórtland Puzolánico | 60-85% | Puzolanas |
| ASTM C-595 (2009) | Cemento Pórtland Puzolánico Modificado | < 30% | Puzolanas |
| ASTM C-595 (2009) | Cemento de escorias | < 30% | Escorias de alto horno |
| EN-197 | CEM I Cemento Portland | 95-100% | Pequeñas adiciones |
| EN-197 (2011) | CEM II* | 65-94% | Escorias de alto horno, humo de sílice, puzolanas naturales o calcinadas, cenizas volantes, esquistos calcinados y caliza. |
| EN-197 (2011) | CEM III** | 5-34% | Escorias de alto horno |
| EN-197 (2011) | CEM IV*** Cemento Puzolánico | 45-79% | Humo de sílice, puzolanas, cenizas volantes |
| EN-197 (2011) | CEM V**** Cementos | 30-64% | Escorias de alto horno, puzolanas, cenizas volantes |

| | | | |
|--|------------|--|--|
| | Compuestos | | |
|--|------------|--|--|

Tabla 1.3 Requerimientos de la norma americana ASTM C595 y de la europea EN 197 en cuanto al contenido de cemento Portland para los diferentes tipos de cementos mezclados

*Incluye sub-clasificación dependiendo del tipo de mineral mezclado

**Incluye sub-clasificación dependiendo del contenido de escorias: 66-80,81-95%.

***Incluye sub-clasificación dependiendo del contenido de Puzolanas: 21-35,36-55%

****Incluye sub-clasificación dependiendo del tipo de mineral mezclado: 36-60,62-80%

Los cementos de escorias y CEM III** según la ASTM y EN-197 respectivamente, como se puede apreciar son los que muestran mayores valores de sustitución del clínquer. Esto se debe básicamente a que estas adiciones son las que poseen mayor propiedad hidráulica por sí solas, ya que son consideradas como auto-cementantes. No obstante, para aplicaciones estructurales con este tipo de cemento, los productos de hidratación y su grado de formación son insuficientes. Por tal motivo siempre se usa, aunque sea mínimo, determinado por ciento de cemento Portland como catalizador, ya que este brinda la portlandita y el yeso necesarios para acelerar la hidratación de las escorias (Dopico, 2008).

En el caso de las puzolanas naturales, como las tobas volcánicas, se ha demostrado que la relación óptima puzolana – cemento necesaria para obtener un máximo de resistencia a la compresión en hormigones es aproximadamente de 0,28, es decir casi un 30 por ciento de sustitución de CPO. Similares niveles se encuentran para las arcillas calcinadas, o metacaolín, cuando son usadas como adiciones minerales para la producción de cementos mezclados y hormigón. Los reportes varían en cuanto a la cantidad de material necesario para remover la totalidad de hidróxido de calcio en las mezclas. Algunos indican valores de 20 por ciento de sustitución del CPO por metacaolín para poder quitar toda la portlandita en un hormigón a los 28 días, mientras otros reportan que se necesita entre 30 y 40 por ciento de metacaolín para poder eliminar toda la cal presente en pastas de metacaolín – CPO con una relación agua/aglomerante de 0,5 y curadas por 28 días en agua saturada con cal (Castillo, 2010).

1.2.4 Ventajas y desventajas del uso de puzolanas como adición al cemento Portland

La portlandita (CH) aportada durante la hidratación del CPO puede representar en una pasta completamente hidratada hasta un 28 por ciento en masa respecto a la masa inicial de CPO. El CH no contribuye a la resistencia mecánica y puede ser extraído de la masa del hormigón en sucesivos ciclos de humedecimiento y secado, aumentando la porosidad e incrementando la permeabilidad y la susceptibilidad al ataque de agentes químicos externos como las aguas de ambientes marinos saturadas de cloruros, o las aguas subterráneas ricas en sulfatos. La alta concentración de grandes cristales de CH alineados a lo largo de la zona de transición interfacial localizada entre el agregado y la pasta, conducen a la aparición de zonas con alta porosidad y baja resistencia mecánica que son el camino usual de fractura en el hormigón (Alujas, 2010).

Como posible solución a esta problemática las puzolanas pueden reaccionar con parte de la CH presente en la pasta hidratada, densificando la microestructura de la pasta y refinando la estructura de poros, con el consiguiente incremento de la impermeabilidad y la resistencia mecánica. Al mismo tiempo, como el CH presente en la pasta es susceptible a formar fases con potencial expansivo al reaccionar con agentes externos como los sulfatos, su reducción favorece la resistencia al ataque químico. También se ha reportado la disminución en la aparición de grietas por retracción. Puede afirmarse que con la sustitución del CPO por materiales puzolánicos, se mantienen o mejoran las propiedades físicas y de durabilidad (Alujas, 2010).

Las principales desventajas reportadas para el empleo de puzolanas son las bajas resistencias mecánicas alcanzadas a edades tempranas y la necesidad del empleo de súper-plastificantes o de relaciones agua/aglomerante mayores que para la pasta que contiene solo CPO, si se quiere mantener una laborabilidad constante de la mezcla. Para el caso de sistemas con altos volúmenes de sustitución por puzolanas muy reactivas también pueden manifestarse fenómenos asociados al agotamiento de la CH, con la consiguiente desestabilización de las fases hidratadas ricas en Ca y para el caso de hormigones reforzados, la desestabilización de la capa pasiva que protege al acero como consecuencia de la disminución del pH (Alujas, 2010).

1.3 Cemento de bajo carbono compuesto por clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

1.3.1 Producción del cemento a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada en Cuba

En Cuba se trabaja para crear las condiciones óptimas con el fin de producir un cemento industrial ecológico, con bajo contenido de clínker, proceso que se inició con la calcinación de arcilla en la fábrica de cemento Siguaney, en la central provincia de Sancti Spiritus y el cual cuenta con dos pruebas industriales realizadas.

El trabajo conjunto de especialistas cubanos y de la Universidad Politécnica de Lausana, Suiza, se basa en la sustitución de hasta un 45 por ciento del clínker utilizado en el proceso, por una mezcla del material metacaolín y piedra caliza, esta última sin quemar, lo cual evitará la emisión de toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera (Antoni M 2013).

Por cada tonelada de cemento Portland producida hasta ahora, se genera de 650 a 900 kg de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero, de ahí la importancia de concretar esta innovación, capaz de reducir 32 por ciento las emisiones tóxicas en relación con el cemento tradicional. Además el nuevo procedimiento permite disminuir el costo de energía hasta un 29 por ciento en comparación con el proceso anterior. Este cemento ecológico resulta de gran utilidad en aplicaciones que no lleven refuerzo, que incluyen la producción de bloques de hormigón, tejas de techo, y en general en todos los trabajos de terminación, además de ser muy útil a la industria petrolera por sus propiedades refractarias (Sánchez, 2014).

1.4 Análisis de la normativa de cementos a nivel internacional

1.4.1 Evolución de la normativa europea para la producción de cementos

La comercialización del cemento en Europa requiere del cumplimiento de dos procesos para avalar el producto, estos son la normalización y la certificación. Con estos procesos se busca como objetivo establecer vías para comprobar la calidad de los cementos.

La normalización en Europa comenzó con la creación en 1961 del Comité Europeo de Normalización, CEN, para llevar a cabo la normalización de todos los productos. Dentro del mismo se estableció toda una serie de Comités Técnicos, entre ellos el TC 51 de: "Cementos y

Cales de Construcción" creado en el año 1973, previsto para elaborar las normas de dichos productos o materiales.

Entre los años 1973 y 1992 se elaboró y perfeccionó un proyecto de norma europea para cementos, pero con carácter provisional. Publicada en 1992 como "norma experimental", con la designación ENV 197 1:92, solo incluía los llamados cementos comunes, entendiendo por tales los utilizables en hormigón masivo, armado y pretensado.

Dado el elevado número de tipos de cementos "comunes y no comunes", entendiendo por éstos últimos los dotados de alguna característica adicional especial, o aplicación específica, no imputables a los "comunes", el CEN/TC 51 decidió dividir el Proyecto ENV 197 en distintas partes. En la primera ENV 197-1 incluía sólo los cementos cuyo endurecimiento se basa principalmente en la hidratación de los silicatos de calcio anhidros del clínquer Pórtland. Otras partes sucesivas irían incluyendo otros tipos de cemento con otros mecanismos diferentes de endurecimiento, por ejemplo, los llamados "cementos de aluminato de calcio" o con comportamiento específico añadido como resistencia a los sulfatos y/o al agua de mar, bajo calor de hidratación y bajo contenido de álcalis (Calleja, 2002).

La norma EN 197-1:2000 fue transferida a la española UNE-EN 197- 1:2000 de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), organización que ha elaborado normas en consonancia con las normas del Comité Europeo de Normalización (CEN), que recogen definiciones, denominaciones, composición y especificaciones, tanto de los cementos como de sus componentes, así como sobre el control de calidad de los mismos. Todo ello con el fin de garantizar la seguridad y durabilidad del producto resultante.

En 2011 se aprobó la primera revisión de la norma europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2000, la cual se denomina EN197-1:2011. Esta revisión se inició en la reunión del Plenario del CEN/TC 51 de *Montreaux de 2009*. Por otro lado, el 19 de marzo de 2010 se reunió el grupo de trabajo 1 CEN/TC 51/WG 6 "Definiciones y terminología del cemento", en la sede de DIN (*Deutsches Institut fur Normung*) en Berlín, para estudiar los 196 comentarios, técnicos y editoriales resultantes de la encuesta de la prEN197-1 finalizada el 20 de enero de 2010 donde los resultados arrojaron que 26 países la aceptaron como norma europea, 3 se abstuvieron y 1 votó en contra (Sanjuán and Argiz, 2012).

Las novedades que posee la UNE-EN 197-1:2011 es que se incorporan las normas UNE-EN 197-1:2000/A1:2004 (Cemento LH), UNE-EN 197-1:2000/A3:2007 (Cenizas volantes silíceas, V) y UNE-EN 197-4:2004 (Cementos de escorias de horno alto de baja resistencia inicial, LES) junto con los borradores de norma EN 197-1/prA2 (Cementos comunes resistentes a los sulfatos) y EN 197-4/prA1 (Cementos de escorias de horno alto de baja resistencia inicial resistentes a los sulfatos) como se muestra en la fig.1.1 (Abascal, 2012).

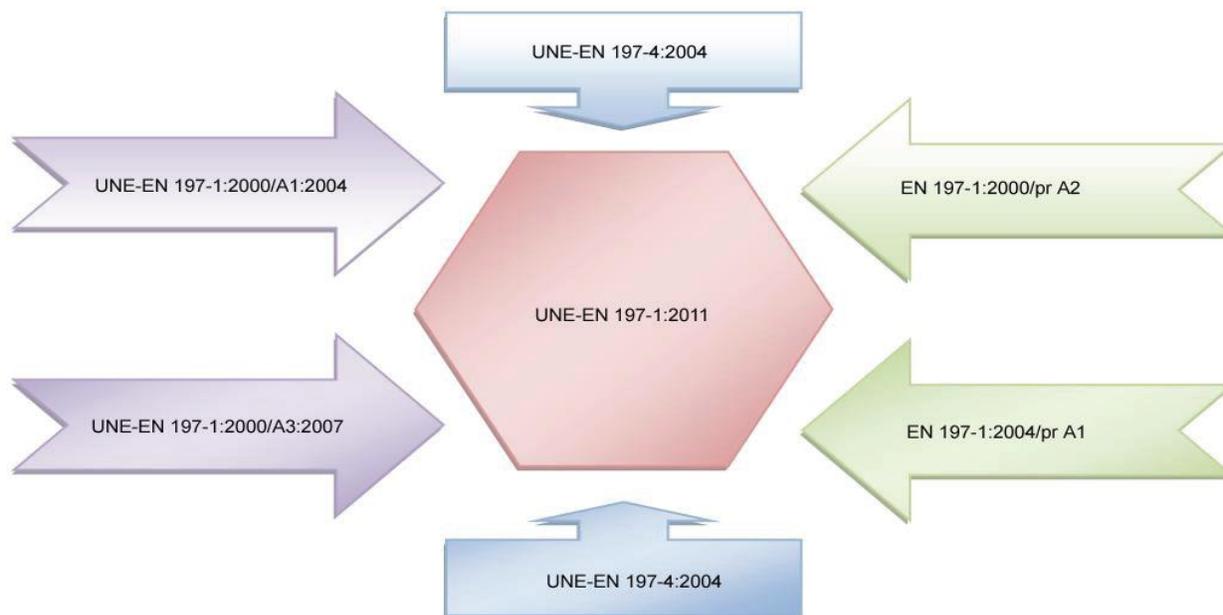


Figura 1.1 Composición de la UNE-EN 197-1:2011.

1.4.2 Desarrollo de normativa para cementos en Norteamérica

Los Estados Unidos de América juegan un papel importante en la normalización de productos a nivel mundial, a través de ASTM International organismo que fue fundado en mayo de 1898. Charles Benjamín Dudley, entonces responsable del Control Calidad de Pennsylvania aprobó su creación como la Sección Americana de la Asociación Internacional para probar materiales. En el año 1902, la sección americana se constituye como organización autónoma con el nombre de: Sociedad Americana para probar materiales. El desarrollo de la normalización en los años 1923 al 1930 llevó a un gran desarrollo de la ASTM. El campo de aplicación se amplió, y en el curso de la segunda guerra mundial la ASTM tuvo un rol importante en la definición de los materiales, consiguiendo conciliar las dificultades bélicas con las exigencias de

calidad de la producción en masa, Era por lo tanto natural un cierto reconocimiento de esta expansión y en 1961 ASTM se volvería universalmente conocida en el mundo técnico como *American Society for Testing and Materials*. Actualmente la ASTM abarca un campo de acción muy amplio, el que comprende todos los tipos de materiales incluyendo los revestimientos y los procesos de producción del cemento (López, 2014).

En la década del setenta se realizaron intentos para regular el sistema de normas. El usuario estaba dispuesto a aceptar la lentitud y los controles, las conversaciones abiertas y los interminables debates en el proceso de desarrollo de normas. Hoy en día, las normas están comenzando a ser consideradas como documentos de comercio. Ahora se buscan resultados que lleven a sus productos al mercado y que les permitan lograr sus objetivos. La tendencia internacional a la normalización va a continuar y se va a intensificar (Cotera, 1998).

Las normas de ASTM se crean usando un procedimiento que adopta los principios del Convenio de barreras técnicas al comercio de la Organización Mundial del Comercio (*World Trade Organization Technical Barriers to Trade Agreement*). El proceso de creación de normas de ASTM es abierto y transparente; lo que permite que tanto individuos como gobiernos participen directamente, y como iguales, en una decisión global consensuada. Las normas de ASTM International se usan en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos y transacciones comerciales por todo el mundo. Son unos de los componentes integrales de las estrategias comerciales competitivas de hoy en día (López, 2014).

1.4.3 Influencia de la Organización Internacional de Normalización (ISO) al desarrollo de las normas

Integrada por 163 países miembros, la Organización Internacional de Estándares (ISO), es una red de los Institutos de Normas Nacionales que tiene su Secretaría Central en Ginebra (Suiza) y funciona sobre la base de un miembro por país para la toma de decisiones. Las normas desarrolladas por ISO son voluntarias, comprendiendo que es un organismo no gubernamental y no depende de ningún otro organismo internacional, por lo tanto, no tiene autoridad para imponer sus normas a ningún país. Sin embargo debido a que provienen de un organismo internacional son aceptadas y exigidas como referentes de calidad, ecológicos, de confidencialidad, de procesos, es decir, que las certificaciones ISO son solicitadas por consumidores intermediarios y finales (Standardization, 2000).

Las normas ISO se idearon originalmente desde comienzos de 1990 para empresas de la industria de fabricación, no obstante, su aplicación se ha difundido con extremada rapidez a otros sectores de la economía. La evolución experimentada en los últimos años ha llevado a un reconocimiento generalizado del valor de un certificado ISO y de su función como pilar de la calidad. Esta asociación certifica a las organizaciones de normalización de todo el mundo incluyendo el CEN, AENOR y ASTM (Rojas, 1998).

El alto prestigio alcanzado por ISO derivó en que el CEN se interesara por firmar un contrato conjunto conocido como el acuerdo de Viena, mecanismo de cooperación entre ambas organizaciones que permite el intercambio de información y hasta la posibilidad para la organización ISO de introducir un observador en los comités técnicos del CEN y viceversa.

ISO cuenta con organismos nacionales de normalización de países grandes y pequeños, industrializados, en desarrollo y en transición, en todas las regiones del planeta por lo que se ha convertido en un organismo de gran peso en cuestiones de normalización a nivel mundial. Posee más de 18400 normas que proveen a las empresas, el gobierno y la sociedad de herramientas prácticas en las tres dimensiones del desarrollo sostenible: económica, ambiental y social.

Las normas ISO hacen una contribución positiva al desarrollo actual. Ellas facilitan el comercio, la difusión del conocimiento, la transferencia de los avances innovadores. El trabajo es realizado por expertos en el tema que vienen directamente de los sectores industrial, técnico y de negocios, que han identificado la necesidad de la norma y que posteriormente la pondrán en uso (Survey, 2005).

1.4.4 Normas para cementos en Latinoamérica, principales cambios en su aplicación

Los orígenes de la industria del cemento en América Latina se remontan a 1872, cuando se estableció en Rosario (Argentina), una pequeña fábrica que producía cemento romano para el mercado local. Esta iniciativa tuvo una cortísima existencia, como otras surgidas al cabo de poco tiempo en el mismo país, a causa de que los costes de producción doblaban los precios del cemento importado. Hubo que esperar hasta 1895 para asistir al nacimiento de la moderna

industria del cemento en Latinoamérica, basada, naturalmente, en la fabricación del cemento portland. Nació en La Habana (Cuba), por obra de dos comerciantes españoles. La fábrica estaba dotada de un equipo modesto, su capacidad productiva ascendía tan sólo a 20 toneladas diarias y dejó de operar en el año 1910 (Tafunell, 2006).

La región Suramericana y del Caribe ha crecido en el uso y producción de cemento a un ritmo vertiginoso, tal es así que la producción de cemento ha sobrepasado los 180 millones de toneladas según el informe de (CEMBUREAU, 2013). Brasil como potencia económica emergente en la región es el país líder en la producción de cemento superando las 46 millones de toneladas anuales. Es necesario destacar que existen otros productores de importancia en la región como son México, Colombia y Argentina. Por su importancia en la producción regional el estudio del desarrollo de la normativa de estos países se hace indispensable para los productores más pequeños del área.

Brasil tiene fuertes raíces en el uso de hormigón, las primeras iniciativas para la instalación de una fábrica de cemento en el país se remontan a finales del siglo XIX. A partir de 1926, con la instalación de una fábrica en Sao Paulo, y otra en 1933 en Río de Janeiro, empezó la implantación de la industria del cemento en Brasil y en consecuencia la sustitución del cemento importado por el nacional (Carvalho, 2011).

Entre 1945 y 1955, nuevas fábricas fueron construidas, haciendo el país autosuficiente en producción de cemento, y desde entonces la industria sigue las diferentes etapas de desarrollo, siempre invirtiendo, ampliando y atendiendo al mercado de manera satisfactoria, contando hoy en día con 79 unidades de producción. La industria es pionera en el uso intensivo de cemento con adiciones, así como el uso de biomasa, uno de los países que más utiliza este tipo de combustible (Carvalho, 2011).

La eficiencia de la industria del cemento se basa en tres pilares que contribuyen sustancialmente a la reducción de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y una producción más limpia: eficiencia energética, combustibles alternativos y adiciones al cemento (Carvalho, 2011).

De acuerdo con las normas brasileras, la utilización de adiciones como escoria de alto horno y cenizas volantes en la producción de diferentes tipos de cemento, es una de las principales alternativas para reducir las emisiones y ahorrar materias primas no renovables. Según la

normativa en Brasil el cemento Pórtland permite de 1-5 por ciento de adiciones, el cemento de alto horno de un 35-70 por ciento de escoria y el cemento puzolánico de 15-50 por ciento de puzolana (Carvalho, 2011).

Otro ejemplo es la industria mexicana que se caracteriza por tener una estructura de mercado altamente concentrada en pocas empresas. El proceso de concentración se ha agudizado a partir del proceso de liberalización, ya que en 1995 existían 35 plantas en el país, con una capacidad de producción de 41 millones de toneladas y una producción anual de 23.9 millones. En el 2011 con tres plantas menos (32) tenían 21.9 por ciento más capacidad de producción (51 millones de toneladas). México no sólo es autosuficiente en la producción de cemento, sino que es un exportador que ha fortalecido sus exportaciones, al igual que su inversión en la adquisición de plantas cementeras en otros países, indicación que ha consolidado a la industria cementera mexicana (Kumaran, 2008). Las normas mexicanas especifican que para el Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno (CPEG) se permite de un 6-60 por ciento y para el Cemento Portland Compuesto (CPC) admite una sustitución de puzolana de un 6-35 por ciento (EDIFICACIÓN 2009).

Argentina con una producción que sobrepasa los 9 millones anuales aunque dista mucho de los grandes productores europeos, es uno de los productores referentes de la región latinoamericana. Su industria posee un gran grado de concentración empresarial en el cemento, como consecuencia del proceso de adquisiciones y fusiones, dejó como saldo sólo cuatro las empresas que dominantes en el mercado del cemento: Loma Negra, Minetti, Cementos Avellaneda y Petroquímica Comodoro Rivadavia (Di-Sebastiano, 2009). Las normas empleadas por esta nación se definen de acuerdo con el Instituto Argentino de Normalización como las normas IRAM del cemento Pórtland y toman como base a las normativas presentadas por el Comité Europeo de Normalización. Estas normas IRAM permiten una sustitución en el cemento puzolánico (CPP) de un 15-50 por ciento (Becker, 2000).

La industria colombiana ha evolucionado en la producción de cementos con adiciones, la infraestructura cementera del país ha estado a tono con los avances logrados en países más desarrollados y han hecho uso de las adiciones por más de 30 años. Las materias primas utilizadas para la elaboración de estos cementos son caliza, arcilla, yeso, escorias y puzolanas. En Colombia existen varias clases de cemento, sus propiedades y características varían

dependiendo del porcentaje de dosificación que se aplique de cada materia prima (Cañón, 2008).

En estos países las normas de ASTM y AENOR han tenido una tradición natural para su uso o adaptación, no obstante, su utilización en muchas ocasiones ha sido de forma parcial o con desconocimiento de los principios bajo los cuales fueron concebidas. Como consecuencia de ello, en ocasiones se producen complicados y largos procesos de adaptación local por el desconocimiento en la implementación de las normas. Algunos de los estándares que se utilizan a menudo en el sector de la construcción o de materiales, no incorporan aspectos relacionados con prácticas comunes en los países de América Latina (Lascarro, 2014).

1.4.5 Aparición de las normas por desempeño

Recientemente, se han desarrollado las normas de desempeño. En el caso del cemento, las normas de desempeño son valiosas para el ingeniero que debe diseñar, construir estructuras de concreto y además que se proyectan al futuro, y al mismo tiempo la tecnología de la construcción se dirige a racionalizar la inversión con criterios reguladores de desempeño (Sánchez, 2014).

Las normas de desempeño proporcionan seguridad en el comportamiento del cemento, según los métodos de prueba requeridos, evitando los inconvenientes propios del desarrollo de las prescripciones para cada producto, mientras que las normas prescriptivas sobre composición del cemento pueden impedir el desarrollo de nuevos productos. Así fue como se determinó en algunos países que las normas no podían limitar el acceso al mercado de un producto. Además se fomentó la innovación dentro de la industria del cemento, con productos que deben cumplir con metas de “performance”, reemplazando los requerimientos propios del desarrollo de regulaciones prescriptivas para cada tipo de producto (Cotera, 1998). Es por este motivo que debemos orientarnos al desarrollo de normas de cementos en las cuales las condiciones de desempeño primen sobre los requisitos prescriptivos.

1.4 Normas de cementos en Cuba

1.4.1 Antecedentes de las normas para cementos en Cuba

La Oficina Nacional de Normalización, reconocida como NC, es el Organismo Nacional de Normalización de la República de Cuba que representa al país ante las Organizaciones

Internacionales y Regionales de Normalización. Dicho Organismo representa a Cuba ante la Organización Internacional de Normalización (ISO), la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), la Comisión del Codex Alimentarius (CODEX), la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM), Obstáculos Técnicos al Comercio de la Organización Mundial del Comercio (OTC/OMC), la Cooperación Euroasiática de Instituciones Metroológicas (COOMET) y la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), entre otras (CEPEC, 2013).

Fomentar la eficaz elaboración y el cumplimiento de las normas y otros documentos normativos, así como promover el uso de los mismos para contribuir al aumento de la disciplina tecnológica y la eficiencia de la producción y los servicios, posibilitar la introducción del avance científico-técnico, facilitar el comercio, la protección al consumidor, la salud, la seguridad y el medio ambiente ha sido la principal tarea de la Oficina Nacional de Normalización (Standards, 2001).

Los Comités Técnicos de Normalización son los encargados de la preparación de las Normas Cubanas. La aprobación de las Normas Cubanas es competencia de la Oficina Nacional de Normalización y se basa en evidencias de consenso. Cuba dispone de más de 4 000 normas cubanas, y más del 50 por ciento de estas se encuentran armonizadas con las internacionales, se trata de una base normalizativa importante para un país pequeño, que nos colocan en el segundo bloque de naciones con más nivel de armonización internacional (Rivera, 2014).

En el caso de las normas relacionadas con cementos el Comité Técnico de Normalización del Cemento es el encargado de su elaboración, teniendo como principal objetivo establecer los requisitos, clasificación y designación que deben cumplir. Éste Comité de Normalización representa varias instituciones como son los Ministerios de la Industria Básica, Educación Superior, de la Construcción, Fuerzas Armadas Revolucionarias y del Azúcar. Además de otras instituciones como el Poder Popular, Centro Nacional de Envase y Embalaje, Unión de Empresas de Asbesto Cemento y Oficina Nacional de Normalización.

Como documento de obligatoria consulta para la elaboración de normas en Cuba se encuentra la NC 1: 2005 Reglas para la estructura, redacción y edición de las normas cubanas y otros documentos relacionados, documento donde se especifican las reglas para la estructura, redacción y edición de los documentos destinados a convertirse en Normas Cubanas, Especificaciones Técnicas y Especificaciones Disponibles al Público. Dichas reglas, dirigidas a

los documentos que no constituyen adopciones idénticas, están destinadas a garantizar que tales documentos se redacten de la manera más uniforme posible, independiente de su contenido técnico (Standards, 2005).

La redacción de estas normas se corrige usando como guía la norma NC 333: 2004 “Guía para la elaboración de normas de productos”, que establece un conjunto de principios aplicables para la redacción y la elaboración de una norma de producto o grupo de productos. Esta guía es aplicable a todos los tipos de productos, excluyendo los servicios y el software, sin embargo no es aplicable para la adopción de normas extranjeras.

1.5 Conclusiones parciales del capítulo

1. El uso de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario no es permitido en nuestro país debido a la no existencia de normas.
2. El hecho de que el Cemento de Bajo Carbono elaborado a base de clínquer-yeso-caliza-arcilla calcinada no esté incluido en la normativa cubana, limita su producción industrial en Cuba por la carencia de un documento legal que lo avale.
3. En la elaboración de la normativa para cementos a nivel mundial se ha convertido en una tendencia actual que las condiciones de desempeño primen sobre los requisitos prescriptivos para permitir la aparición de nuevos productos y tener seguridad en el comportamiento del cemento, según los métodos de prueba requeridos.
4. La Organización internacional de Estándares (ISO), la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), el Comité Europeo de Normalización (CEN) y la Asociación Americana para Probar Materiales (ASTM) son las organizaciones de avanzada en temas de normalización a nivel mundial.
5. La base normativa de Cuba presenta un elevado nivel de armonización internacional que incluye más del 50 por ciento de las normas creadas en el país. Esto demuestra el

nivel de desarrollo logrado en el país a partir del trabajo de los Comités Técnicos de Normalización.

6. Del estudio realizado de la literatura se evidencia la necesidad de elaborar una base de datos experimentales, que fundamente científicamente la posibilidad de utilizar el Cemento de Bajo Carbono en la fabricación de hormigones, y que propicie su inclusión en la normativa cubana.

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con Cemento de Bajo Carbono elaborado a base de clínquer-yeso- caliza-arcilla calcinada

Para lograr la generalización de la producción y empleo del cemento de bajo carbono elaborado sobre la base de clínquer-yeso-caliza-arcilla calcinada en Cuba, se requiere de un proceso de transformación en la base normativa, de manera tal que progresivamente se vaya asimilando la nueva tecnología. La adecuada evaluación del producto mediante ensayos experimentales es uno de los requisitos indispensables para demostrar y certificar su calidad. Es así que debe contarse con normas que permitan evaluar tanto a las materias primas como los productos terminados.

Para el caso de los hormigones, en Cuba la norma NC 120: 2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones, define los parámetros (prescriptivos y de desempeño) que debe reunir dicho material. En la misma se establece que el hormigón hidráulico debe ser elaborado con los cementos que cumplen con las Normas NC 95:2011, NC 96:2011, NC 98:2001, NC 99:2001 y NC 100:2001, por lo que debe trabajarse en función de lograr incluir aquí al cemento de bajo carbono. Para lograr dicho propósito se necesita demostrar científicamente la aptitud de dicho cemento para lograr las especificaciones establecidas, lo cual justifica plenamente la realización de este trabajo.

En el presente capítulo se expone como se realizó el proceso de producción del cemento en la prueba industrial realizada, se describen los ensayos que se le aplicaron y las condiciones de exposición a las que fueron expuestas las muestras.

2.1 Instructivo técnico

El instructivo técnico es un documento que va dirigido a las diferentes empresas constructoras y de producción de materiales de Villa Clara, donde se explican los antecedentes de la investigación, cómo se financia y los objetivos propuestos en la misma. Este documento se elaboró con el objetivo de obtener la autorización para producir 120 toneladas de Cemento de Bajo Carbono en la fábrica de Siguaney, que se utilizaron en los diferentes ensayos de durabilidad. El mismo cuenta con una serie de datos referidos a las dosificaciones del cemento

para la elaboración de los hormigones y morteros que posteriormente se ensayaron. A continuación se presenta el documento referido:

INSTRUCTIVO TÉCNICO

Dirigido a:

- Empresa de Producciones Industriales Villa Clara
- Empresa Constructora Militar #3
- Industria de Materiales de Construcción de Villa Clara
- Empresa de Mantenimiento Constructivo de Villa Clara
- Empresa Constructora de Obras de Arquitectura, ECOAI 1
- Constructores por esfuerzo propio seleccionados

Antecedentes:

- La Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, desarrolla a través del Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales, (CIDEM), el Proyecto titulado “Utilización de arcillas calcinadas en la formulación de cementos de bajo contenido de clínquer” que tiene como objetivo general potenciar la implementación de la producción de un cemento de muy bajo contenido de clínquer, como una medida para la mejora de la eficiencia de la producción de cemento en Cuba
- El Ministerio de la Construcción a través de la Dirección de Desarrollo Tecnológico, financia el referido proyecto a partir de Contrato de Prestación de Servicios Científicos Técnicos suscrito con el Centro Internacional de La Habana, S.A. (CIH) con la intención de cubrir los costos de la producción experimental.
- Dando cumplimiento a uno de los principales objetivos del proyecto de referencia consistente en probar en variadas aplicaciones el cemento que se ha desarrollado, se han producido 120 ton de este cemento, denominado “SIG B45”, y con este se ha montado un programa completo de utilización de este cemento, que incluye la producción de una variada gama de productos con este cemento.

Objetivo del instructivo:

- Brindar a los usuarios del cemento “SIG B45” producido en la fábrica de cemento Siguaney las dosificaciones
- el programa de ensayos al que serán sometidos los materiales que serán producidos, y su para la producción de los elementos que se han planificado.
- Brindar instrucciones sobre proceso de evaluación y certificación que realizará el CIDEM, de conjunto con la Empresa Nacional de Investigaciones Aplicadas, ENIA, en Villa Clara

Aprobado por:

Dr. José Fernando Martirena Hernández
Director
Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales,
CIDEM



Lugar y fecha: Santa Clara, 27 de Septiembre de 2013

Diagrama de flujo del proceso de evaluación del cemento SIG B45

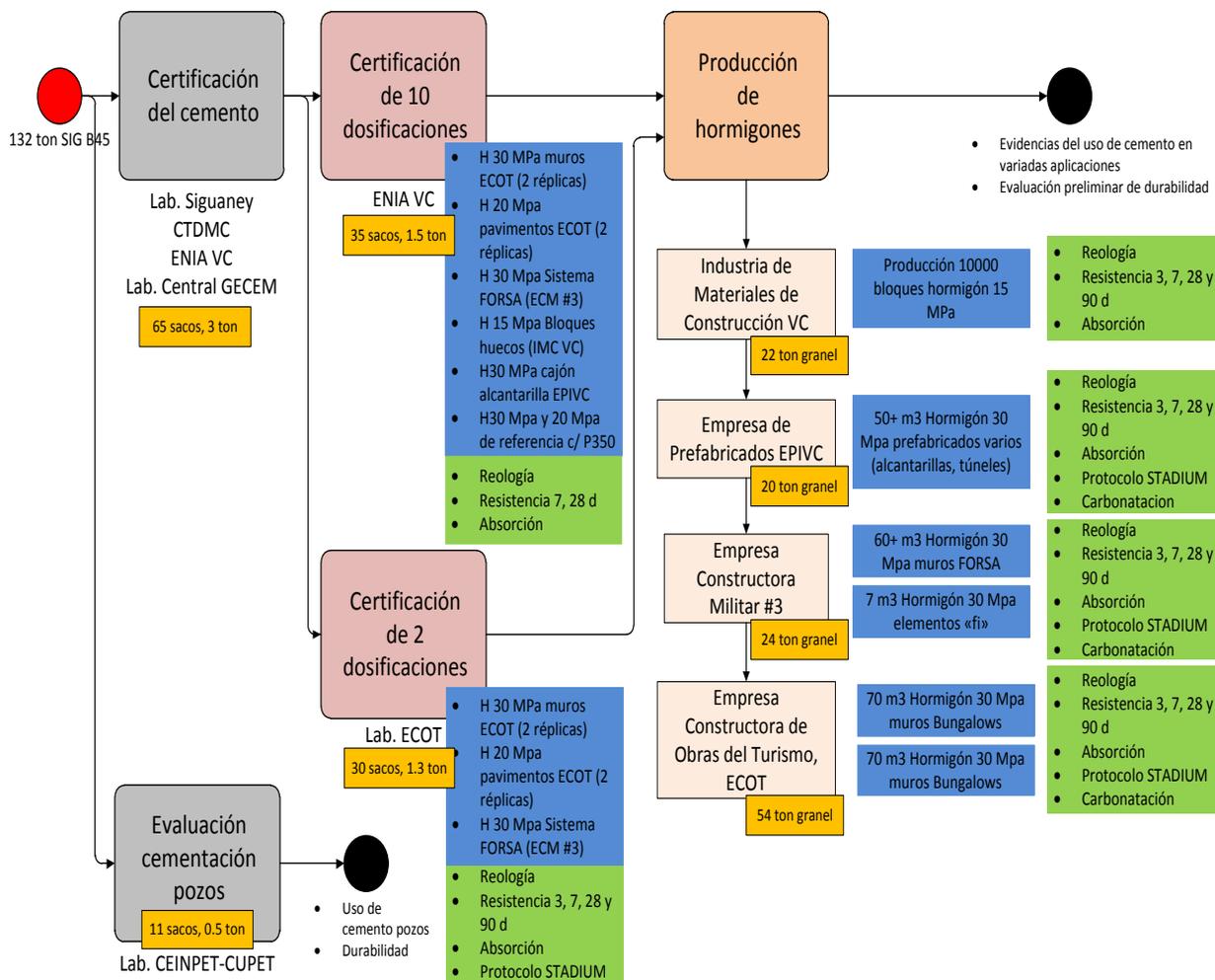


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de evaluación del cemento SIG B45

El esquema muestra el camino que se ha seguido para la evaluación del cemento de bajo carbono. Destaca las instituciones involucradas en la certificación del cemento (ENIA de Villa Clara y la Empresa Constructora de Obras del Turismo (ECOT CSM), evaluación de cementación (Laboratorio CEINPET-CUPET), las diferentes empresas donde se elaboraron los hormigones y para qué se usaron. Además muestra la diversa gama de estudios y ensayos que se realizaron a los productos finales de estos hormigones.

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

Dosificaciones para hormigones:

| (a) Hormigones de 20 y 25 Mpa. Producciones in situ y prefabricados, áridos del Purio y S. Soto | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------|--------------------------------------------|--------|----------------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg | | dosificación volumétrica m ³ | | gasto de materiales para 1 m ³ | | Resist. Especificada (MPa) | Consumo de cemento (kg/m ³) | Resistencia media estimada fcm (kg/cm ²) | Rendimiento (referido a la media) |
| | 20 Mpa | 25 Mpa | 20 Mpa | 25 Mpa | 20 Mpa | 25 Mpa | | | | |
| Cemento SIG 45 | 305 | 325 | 1 | 1 | 0.305 t | 0.325 t | 20 | 305 | 23 | 0.75 |
| Arena de El Purio | 592 | 604 | 1.546 | 1.479 | 0.417 m ³ | 0.425 m ³ | 25 | 325 | 29 | 0.89 |
| Arena S. Soto. | 254 | 259 | 0.702 | 0.671 | 0.189 m ³ | 0.193 m ³ | | | | |
| Gravilla 19-10 mm Arriete | 954 | 973 | 2.72 | 2.602 | 0.734 m ³ | 0.748 m ³ | | | | |
| Agua | 180 | 160 | 0.667 | 0.556 | 180 L | 160 L | | | | |
| Aditivo Mapefluid N 100 RC | 3.102 | 3.305 | --- | --- | 3.102 L | 3.305 L | | | | |
| R. a/c Amasada | 0.59 | 0.49 | --- | --- | --- | --- | | | | |
| R. a/c Efectiva | 0.5 | 0.4 | --- | --- | --- | --- | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | | |
| Las dosis de aditivo están expresadas en L/m ³ . | | | | | | | | | | |
| Asentamiento Proy : 12 ± 3 cm | | | | | | | | | | |
| (b) Hormigones de 20 y 25 Mpa. Producciones in situ y prefabricados, áridos Palenque | | | | | | | | | | |
| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg | | dosificación volumétrica m ³ | | gasto de materiales para 1 m ³ | | Resist. Especificada (MPa) | Consumo de cemento (kg/m ³) | Resistencia media estimada fcm (kg/cm ²) | Rendimiento (referido a la media) |
| | 20 Mpa | 25 Mpa | 20 Mpa | 25 Mpa | 20 Mpa | 25 Mpa | | | | |
| Cemento SIG 45 | 330 | 360 | 1 | 1 | 0.33 | 0.360 t | 20 | 330 | 23 | 0.70 |
| Polvo Palenque | 807 | 780 | 1.841 | 1.633 | 0.538 m ³ | 0.520 m ³ | 25 | 360 | 29 | 0.81 |
| 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 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | --- | --- | --- | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | | | | |
| Las dosis de aditivo están expresadas en L/m ³ . | | | | | | | | | | |
| Asentamiento Proy : 12 ± 3 cm | | | | | | | | | | |

Tabla 2.1 Resumen de dosificaciones

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

(c) Hormigones para producción de bloques huecos de hormigón

| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg/m3 | | dosificación volumétrica m3 | | gasto de materiales para 1 m3 | |
|-------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|-----------|
| | blq 10 cm | blq 15 cm | blq 10 cm | blq 15 cm | blq 10 cm | blq 15 cm |
| Cemento SIG 45 | 280 | 290 | 1 | 1.00 | 1.00 | 0.290 t |
| Arena Sergio Soto | - | 800 | - | 2.11 | - | 0.59 |
| Polvo Purio | 883 | - | 2.41 | - | 0.58 | |
| Granito Purio | 1079 | 1200 | 3.11 | 3.30 | 0.75 | 0.84 |
| Agua | 126 | 113 | 0.68 | 0.44 | 126 lt | 113 lt |
| R. a/c Amasada | 0.45 | 0.39 | | | --- | --- |
| R. a/c Efectiva | | | | | --- | --- |

Observaciones:
Asentamiento= 0 cm

Tabla 2.2 Resumen de dosificaciones para bloques de hormigón

Dosificaciones para morteros

| Muestra No. | Tipo Mortero | Características del uso del mortero | Dosificación Volumétrica | Dosificación gravimétrica para 1 m3 (kg) | | | | | Gasto de material para 1 m3 (kg) | | | | Res Flex-Trac 28 d Mpa | Res. Comp. 28 d Mpa | Fluidez (mm) |
|-------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|------------------------|-------------|----------------|------|----------------------------------|------------------------|-------------|----------------|------------------------|---------------------|--------------|
| | | | | Cemento SIG B45 | arenas Sin benef (70%) | Benef (30%) | Hidrato de cal | Agua | Cemento SIG B45 | arenas Sin benef (70%) | Benef (30%) | Hidrato de cal | | | |
| 1 | I | Muros no portantes y colocación de losas hidráulicas. | 1-6-2 (T-4) | 152 | 755 | 325 | 215 | 403 | 0.135 | 0.565 | 0.242 | 0.269 | 0.8 | 4.5 | 190 |
| 2 | II | Muros portantes de ladrillos y bloques, resano, repello grueso, colocación de pisos de terrazo. | 1-5-1 (T-4) | 160 | 664 | 286 | 113 | 280 | 0.142 | 0.497 | 0.213 | 0.142 | 1.8 | 4.6 | 190 |
| 3 | III | Repello fino, enchapes de azulejos y piezas de cerámica, pisos de azulejos y piedra natural. | 1-4-1 (T-16) | 230 | 762 | 329 | 163 | 356 | 0.204 | 0.571 | 0.245 | 0.204 | 1.8 | 5.7 | 193 |

OBSERVACIONES: Los diseños recomendados se usarán sólo con CEMENTO SIG B45
(T-4) Arena tamizada por el Tamiz N° 4.
(T-16) Arena tamizada por el Tamiz N° 16.

Tabla 2.3 Dosificaciones para morteros

Cronograma tentativo de ejecución de los ensayos:

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

| Empresa | Producción | ensayo | fecha toma | fecha resultado | moldes y accesorios | logística | Comentarios | Resp. Técnico |
|------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------|------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Ind. Materiales de Construcción VC | Bloques huecos de hormigón | res comp 7, 28 d | 12/09/2013 | 10/10/2013 | - | ENIA e IMC se ocupan de hacer traslado y rotura | Favor guardar un mínimo de 4 lotes de 20 unidades para ensayos posteriores | Leng |
| | Bloques huecos de hormigón | absorción 28 d | 12/09/2013 | 10/10/2013 | - | - | - | Leng |
| | Baldosas hidráulicas | absorción 28 d | 02/10/2013 | 30/10/2013 | - | IMC se ocupa de realizar ensayos | Favor guardar un mínimo de 4 lotes de 20 unidades para ensayos posteriores | Leng |
| ECM #3 | Bloques huecos de hormigón | res comp 7, 28 d | 30/10/2013 | 28/10/2013 | - | traslado de muestras a la ENIA para rotura | Favor guardar un mínimo de 2 lotes de 20 unidades para ensayos posteriores | Alina o Jesus (Planta Manuelita) |
| | Bloques huecos de hormigón | absorción 28 d | 30/10/2013 | 28/10/2013 | - | - | - | Alina o Jesus (Planta Manuelita) |
| | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | res comp 7, 28 d | 03/10/2013 | 31/10/2013 | 6 moldes cilíndricos de 15 x 30 cm | toma de 6 probetas x serie de hormigón, y rotura en laboratorio propio | Favor informar resultados a CIDEM | Alina o Jesus (Planta Manuelita) |
| | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | STADIUM | 03/10/2013 | 31/10/2013 | 6 moldes cilíndricos de 10 x 20cm | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Alina o Jesus (Planta Manuelita) |
| | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | Carbonat. | 03/10/2013 | 31/10/2013 | 3 moldes cilíndricos de 15 x 30 cm | toma de 3 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | Favor identificar las probetas y entregar a CIDEM | Alina o Jesus (Planta Manuelita) |
| EPI VC | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | res comp 7, 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 6 moldes cilíndricos de 15 x 30 cm | toma de 6 probetas x serie de hormigón, y rotura en laboratorio propio | Favor informar resultados a CIDEM | Naranjo |
| | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | STADIUM | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 6 moldes cilíndricos de 10 x 20cm | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Naranjo |
| | Hormigon prefabricado 20 y 25 MPa elementos varios | Carbonat. | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 3 moldes cilíndricos de 15 x 30 cm | toma de 3 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | Favor identificar las probetas y entregar a CIDEM | Naranjo |

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

| | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------|------------|------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Emp. Mtto. Const. (Talleres en Sagua la Grande y Manicaragua) | Bloques huecos de hormigón | res comp 7, 28 d | 02/10/2013 | 30/10/2013 | - | Trasladar una muestra de bloques a la ENIA para ensayos | Favor guardar un mínimo de 2 lotes de 10 unidades para ensayos posteriores en CIDEM | P. Seijo |
| | Bloques huecos de hormigón | absorción 28 d | 02/10/2013 | 30/10/2013 | - | - | - | P. Seijo |
| | Tejas de microconcreto TMC | absorción 28 d | 02/10/2013 | 30/10/2013 | - | Trasladar una muestra de tejas a la ENIA para ensayos | Favor guardar un mínimo de 2 lotes de 5 unidades para ensayos posteriores en CIDEM | P. Seijo |
| | Hormigón estructural de 20 y 25 MPa viguetas y tabletas | res comp 7, 28 d | 02/10/2013 | 30/10/2013 | 6 moldes cilíndricos de 15 x 30 cm | toma de 6 probetas x serie de hormigón, y rotura en laboratorio ENIA | Guardar al menos 2 viguetas y 4 tabletas de muestra | P. Seijo |
| ECOAI 1 | Morteros de albañilería | res comp. 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 2 juegos de moldes metálicos de mortero de 4 x 4 x 16 cm | toma de 3 prismas por cada serie de mortero, curar agua hasta 28 d y ensayar en la | CIDEM se ocupa de la toma de muestras y lleva los moldes metálicos propios | Leng |
| | Morteros de albañilería | absorción 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 2 juegos de moldes metálicos de mortero de 4 x 4 x 16 cm | toma de 3 prismas por cada serie de mortero | CIDEM se ocupa de la toma de muestras y lleva los moldes metálicos propios | Leng |
| | Hormigones de 20 y 25 Mpa fundido in situ | res comp 7, 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 6 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm (plásticos) | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Leng |
| | Hormigones de 20 y 25 Mpa fundido in situ | STADIUM | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 6 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm (plásticos) | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Leng |
| Constructores privados | Morteros de albañilería | absorción 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 2 juegos de moldes metálicos de mortero de 4 x 4 x 16 cm | toma de 3 prismas por cada serie de mortero | Usar moldes metálicos de la fábrica Siguaney | Maria Luisa |
| | Hormigones de 20 y 25 Mpa fundido in situ | res comp 7, 28 d | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 6 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm (plásticos) | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Maria Luisa |
| | Hormigones de 20 y 25 Mpa fundido in situ | STADIUM | 04/10/2013 | 01/11/2013 | 7 moldes cilíndricos de 10 x 20 cm (plásticos) | toma de 6 probetas x serie de hormigón, curado en agua hasta 28 d y traslado a CIDEM | CIDEM hace entrega de las 6 probetas cilíndricas plásticas de 10 x 20 cm | Maria Luisa |

Tabla 2.4 Cronograma de ejecución de ensayos

Programa completo de ensayos a los materiales producidos

| | Tipo de ensayo a realizar | ¿Dónde se aplica? | Frecuencia | Accesorios necesarios | Cant muestras | Moldes 15 x 30 | Moldes 10 x 20 | Moldes 4x4x16 | Comentarios |
|---|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Resistencia a compresión | En todos los hormigones y en bloques huecos | 7 y 28 días | Probetas cilíndricas de 15 x 30 cm o de 10 x 20 c | 3 por edad | 6 | - | - | Los cilindros deben ser curados en agua hasta la fecha de ensayo |
| 2 | Absorción de agua | En algunos hormigones y en bloques huecos | después de 28 días | Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a las que se cortan anillos | 3 x serie | - | 1 | - | Los ensayos se harán en el laboratorio de la ECOT, incluido corte de anillos |
| 3 | Protocolo STADIUM hormigones | En la gran mayoría de los hormigones producidos | después de 28 días | Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a las que se cortan anillos | 3 x serie | - | 3 | - | Los ensayos se harán en el laboratorio de la ECOT, incluido corte de anillos |
| 4 | Protocolo STADIUM Morteros | En algunos morteros producidos, según indicación | después de 28 días | Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a las que se cortan anillos | 3 x serie | - | 3 | - | Los ensayos se harán en el laboratorio de la ECOT, incluido corte de anillos |
| 5 | Carbonatación hormigones | En la gran mayoría de los hormigones producidos y en algunos morteros | después de 28 días | Probetas cilíndricas de 10 x 20 cm (hormigones) y prismas de 4 x 4 x 16 (morteros) | 3 x serie | - | 3 | - | Preservar en tanque de agua hasta que se den indicaciones |
| 6 | Carbonatación morteros | En algunos morteros producidos, según indicación | después de 28 días | Prismas de mortero de 4 x 4 x 16 cm, tomados como muestra | 3 x serie | - | - | 1 | Preservar en tanque de agua hasta que se den indicaciones |

Tabla 2.5 Programa completo de ensayos a los materiales producidos

2.2 Programa experimental

2.2.1 Características del programa experimental

| | Ensayo a realizar | Características y requisitos |
|---|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Reología de pastas, morteros y hormigones | <u>Pastas</u> : mini-cono y cono de Marsh (UCLV y CTDMC) <u>Morteros</u> : mesa de sacudidas (donde sea posible) <u>Hormigones</u> : cono de Abrams (todos), mesa abatible y reómetro manual (ECOT) |
| 2 | Propiedades mecánicas | <u>Cemento</u> : ensayos estandarizados cemento <u>Hormigones</u> (ENIA): Resistencia a compresión 7, 28 días; (ECOT, CTDMC, UCLV): Resistencia a compresión 3, 7, 28 y 90 días. (Todos) Absorción de agua a 28 días |
| 3 | Migración de cloruros y secado (movimientos de humedad), protocolo STADIUM | <u>Morteros</u> : solamente con fines investigativos (enero-junio 2014) <u>Hormigones migración</u> : dos réplicas en probetas cilíndricas de 10 cm por serie, ensayo a partir de 28 días en dos edades diferentes. <u>Hormigones secados</u> : dos réplicas en probetas cilíndricas de 10 cm por serie, ensayo a partir de 28 días en dos edades diferentes. |
| 4 | Carbonatación | <u>Morteros</u> : solamente con fines investigativos (enero-junio 2014) <u>Hormigones</u> : Probetas en tres regímenes de curado (sin curado, 3 d y 7 d), con mezcla de referencia P350, colocados en al menos dos condiciones de HR/temperatura (exteriores e interiores) |
| 5 | Otros ensayos | <u>Pastas</u> : estudios de la microestructura de morteros (XRD, MIP, SEM) <u>Morteros</u> : estudios de la microestructura de morteros (XRD, MIP, SEM) <u>Hormigones</u> : estudios microestructurales e muestras de 28 d |

Tabla 2.6 Características del programa experimental

2.2.2 Tipos de mezclas y lugar donde se evaluaron

| | Detalles de la dosificación a certificar | Para | Comentarios |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------|
| 1 | Hormigón de 20 MPa, producido con cemento P-35, asentamiento 18 cm, usado como mezcla de referencia, áridos El Purio | Referencia | Referencia de comparación |
| 2 | Hormigón de 30 MPa, producido con cemento P-35, asentamiento 18 cm, usado como mezcla de referencia, áridos El Purio | Referencia | Referencia de comparación |
| 3 | Hormigón de 30 MPa, producido con cemento SIG B45, áridos del Purio, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | ECOT/EPIVC /ECM #3 | En reserva para sí reabriera la planta de áridos |
| 4 | Hormigón de 20 MPa, producido con cemento SIG B45, áridos del Purio, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | ECOT | En reserva para sí reabriera la planta de áridos |
| 5 | Hormigón de 30 MPa, producido con cemento SIG B45, árido grueso Palenque, árido fino Arimao, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | ECOT/EPIVC /ECM #3 | ECOT tiene en batching planta áridos Camagüey y Arimao |
| 6 | Hormigón de 20 MPa, producido con cemento SIG B45, árido grueso Palenque, árido fino Arimao, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | ECOT | ECOT tiene en batching planta áridos Camagüey y Arimao |
| 7 | Hormigón de 30 MPa, producido con cemento SIG B45, árido grueso Camagüey, árido fino Arimao, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | ECOT/EPIVC /ECM #3 | ECOT tiene en batching planta áridos Camagüey y Arimao |
| 8 | Hormigón de 20 MPa, producido con | ECOT | ECOT tiene en batching |

| | | | |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| | cemento SIG B45, árido grueso Camagüey, árido fino Arimao, asentamiento 18 cm (misma cantidad de cemento que la dosificación certificada, garantizar similar a/c en base a incrementar SP) | | planta áridos Camagüey y Arimao |
| 9 | Hormigón de consistencia seca para bloques, 220 kg cemento/m ³ , asentamiento 0, resistencia a compresión 15 MPa (mezcla experimental producida con cemento B45) | Ind. Mat. VC | Utilizar áridos en disponibilidad en taller de producción de bloques |
| 10 | Hormigón de consistencia seca para bloques, 220 kg cemento/m ³ , asentamiento 0, resistencia a compresión 15 MPa (mezcla estándar producida con cemento P-35) | Referencia | Utilizar áridos en disponibilidad en taller de producción de bloques |

Tabla 2.7 Resumen de mezclas y lugares de ensayos

2.3 Principales aspectos de la NC 120-2014 Hormigón hidráulico.

Especificaciones, a tener en cuenta para la evaluación del cemento de bajo carbono

La NC 120-2014 es una norma única de especificaciones para hormigones hidráulicos de cemento Pórtland. Esta norma se confeccionó partiendo del principio básico de que el hormigón tiene que cumplir en la estructura con un determinado desempeño, tanto en resistencias mecánicas como en durabilidad, independientemente de donde se hayan producido y las tecnologías de transporte, vertido, compactación y curado que se utilicen.

Esta norma establece las especificaciones técnicas generales para los materiales componentes del hormigón hidráulico así como para su preparación. Para la evaluación del mismo parte de considerar la agresividad atmosférica y química a la cual estén sometidas las estructuras, definiendo cuatro rangos.

Esta norma hace referencia a los requisitos básicos a cumplir por los materiales componentes del hormigón regulando las cantidades de sustancias dañinas que contengan y que puedan derivar en la corrosión del acero de refuerzo y otros daños de menor envergadura.

Referente al contenido de cloruro plantea los diferentes valores a cumplir según el tipo de estructura, el ensayo a realizar para su determinación establecido en la NC 272:2003. Como método para determinar la sorptividad establece los requerimientos definidos en la NC 967.

Además evalúa el comportamiento del hormigón ante otros fenómenos como por ejemplo el fuego, define condiciones de entrega del hormigón fresco y métodos de comprobación de calidad de dicho hormigón in situ.

Por tratarse de una norma que evalúa el desempeño del hormigón en la estructura, por tener un carácter actual (vigente desde el año 2014), se ha tomado como guía para la evaluación del cemento de bajo carbono y así definir si este cemento cumple con los requerimientos para ser producido a escala industrial en nuestro país.

2.4 Sitios de exposición

La NC 120:2014 establece para los hormigones hidráulicos cuatro niveles de agresividad para evaluar su comportamiento. Estos niveles son:

Muy alta

- Estructuras situadas en las proximidades de la línea costera hasta 500 metros del mar en la costa norte y hasta 100 metros en la sur.

Alta

- Estructuras situadas en la franja costera a más de 500 metros y hasta tres kilómetros del mar en la costa norte y a más de 100 metros y hasta un kilómetro en la costa sur

Media

- Estructuras situadas en la franja costera a más de tres kilómetros y hasta 20 kilómetros de la costa norte y a más de un kilómetro y hasta 20 kilómetros de la costa sur.

Baja

- Estructuras situadas a más de 20 kilómetros de ambas costas.

En concordancia con la NC 120:2014 se crearon cuatro sitios de exposición para las muestras del hormigón de bajo carbono que cumplieran con estos rangos de agresividad en la costa norte de Villa Clara y por tanto poder evaluar a los hormigones elaborados con cemento de bajo carbono bajo las condiciones establecidas en esta norma.

Es necesario aclarar que los tipos de exposición indicados en esta norma no son los mismos establecidos en la Norma Europea EN 206- 1, se han adecuados a las condiciones concretas de Cuba y responden a un estudio y análisis conjunto de especialistas de diferentes Instituciones y a la experiencia nacional e internacional de avanzada. Los tipos de exposición concretos a

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada

definir en cada lugar específico, dependerán de los estudios hechos en el lugar de utilización del hormigón.

2.4.1 Ubicación geográfica de los sitios de exposición

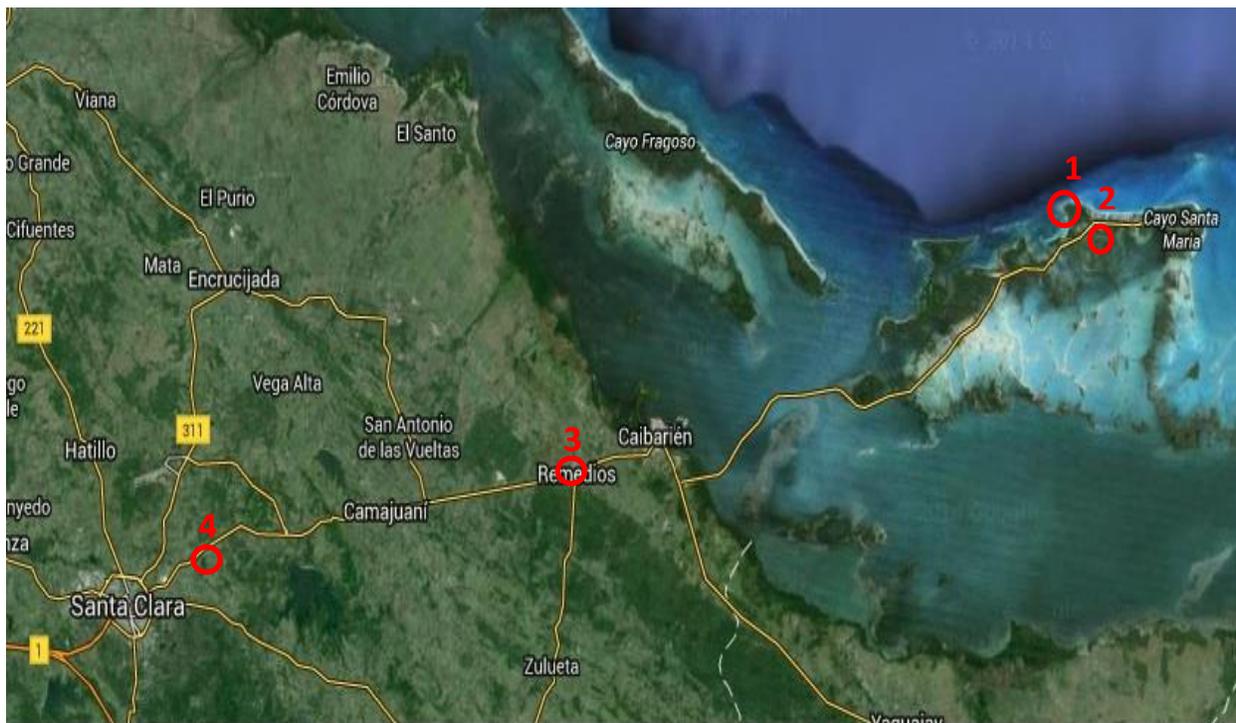


Figura 2.2 Ubicación de los sitios de exposición

- 1-Sitio de exposición, Punta Matamoros en Cayo Santa María
- 2- Sitio de exposición, Sede Universitaria en Cayo Santa María
- 3- Sitio de exposición, EPI en Remedios
- 4- Sitio de exposición, Facultad de Construcciones (UCLV) en Santa Clara

Sitios de exposición en Cayo Santa María



Figura 2.2 Ubicación de los sitios de exposición Cayo Santa María

Sitio de exposición, EPI Remedios



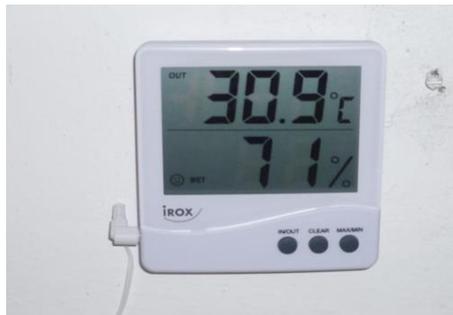
Figura 2.3 Ubicación del sitio de exposición

Sitio de exposición, UCLV Santa Clara



Figura 2.4 Ubicación del sitio de exposición

Se definió un quinto sitio de exposición en la sala de carbonatación en el CIDC, la Habana con temperatura y humedad controladas. Este sitio se creó para sustituir al ubicado en la EPI de Remedios y exponer las muestras a una agresividad media.



2.4.2 Distribución de las muestras en los diferentes sitios de exposición

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Sitio de exposición, Punta Matamoros en Cayo Santa María | M-25, M30, M32, M35, M380 |
| Sitio de exposición, Sede Universitaria en Cayo Santa María | M381, M388, M434, M370, M22, M393, M5, M6, M380, M397 |
| Sitio de exposición, EPI en Remedios | SG, SGR, P, M25, M30, M32, M35, M380 |
| Sitio de exposición, Facultad de Construcciones (UCLV) en Santa Clara | Sitio en construcción |

Tabla 2.8 Distribución de muestras en los sitios de exposición

2.5 Programa de durabilidad

| Variables | Intervalos de utilización | Ensayos |
|-----------------------|---------------------------|------------------------|
| Relación agua/cemento | (0,4~0,7%) | Stadium |
| Contenido de cemento | (270~417 kg) OPC, LC3 | Carbonatación |
| Agregados | Purio, Palenque, Arriete | Perfil de cloruro |
| Resistencia | 3, 7 y 28 días | Permeabilidad del aire |
| | | Absorción del agua |
| | | Resistividad |

Tabla 2.9 Programa de durabilidad

2.6 Descripción de los ensayos, metodología para su ejecución

2.6.1 Medida de la consistencia.

La trabajabilidad es una propiedad compuesta de por lo menos dos componentes: la fluidez y la cohesión, y depende del tipo de construcción, de los métodos de vertido y de la compactación. En el estudio se han adoptado dos tipos de consistencia, consistencia blanda para los hormigones elaborados en la EPI Remedios y consistencia fluida para los elaborados en CIDC. Para medir este parámetro se ha utilizado el método del cono según la norma NC 174-2002 "Hormigón Fresco. Medición del Asentamiento por el Cono".

2.6.2 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión del hormigón depende de cómo la combinación de varios factores afecta a 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 and Monteiro, 2006).

La resistencia a compresión de estos hormigones se ha realizado en probetas cilíndricas de dimensiones 150x300mm, fabricadas 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 CIDC y con placas no adheridas para el caso de los hormigones elaborados en la EPI Remedios, 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".

2.6.3 Migración de iones mediante el protocolo STADIUM

Esta prueba es una versión modificada de la prueba de la ASTM C1202. Prueba estándar realizada en el hormigón, indica la habilidad de este para resistir la penetración de iones cloruros. Consiste en monitorear la intensidad de corriente eléctrica que pasa a través de un espécimen experimental cilíndrico en un período de 10-14 días. Al espécimen se le suministra un potencial eléctrico constante de una fuente externa de corriente. El experimento consiste en dos celdas de migración que son acopladas y en el medio de estas dos se fija un espécimen

de hormigón, al cual se le medirá la cantidad de corriente que pasa por él. La primera de las celdas se llena con una solución de hidróxido de sodio más cloruro de sodio y se conecta a un electrodo negativo. La otra celda se llena con una solución de hidróxido de sodio y se conecta a un electrodo positivo. El paso de corriente se mide periódicamente durante todo el período de prueba. Si se desea monitorear la penetración de iones cloruros real se monitorea periódicamente la concentración de cloruro en la celda conectada al electrodo positivo.

2.6.3.1 Ensayo de migración de iones. Procedimiento del ensayo Equipamiento para el ensayo (figura 2.5).

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



Figura 2.5 Equipamiento para el ensayo de migración de cloruro.

Materiales y reactivos.

1. Solución acuosa de cloruro de sodio (NaCl), con una concentración de 0.5 moles, mezclado con hidróxido de sodio (NaOH), con una concentración de 0.3 moles.
2. Solución acuosa de hidróxido de sodio con una concentración de 0.3 moles.

3. Sellante: Preferiblemente silicona impermeabilizante.
4. Agua destilada para la preparación de las soluciones.

Muestras para el ensayo.

Las muestras para el ensayo se obtuvieron de los testigos cilíndricos de 100 mm de diámetro extraídos del sitio de exposición en Cayo Santa María. Las dimensiones de las muestras deben estar en el intervalo de 96-103 mm de diámetro y deben tener 30 ± 2 mm de espesor, para el ensayo de migración.

Preparación de las muestras.

Cinco días antes de comenzar la prueba, las muestras fueron depositadas en un recipiente hermético que contenía una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de 0,3 Moles. De esta manera fue garantizado que las muestras antes de comenzar el ensayo estuvieran totalmente saturadas.

Procedimiento experimental para la realización del ensayo de migración de iones (Figura 2.6) (ASTM, 1997).

1. Secar las superficies de los especímenes saturados con una tela de algodón limpia o un tejido fino y suave.
2. Medir las dimensiones de cada espécimen. El diámetro y el espesor deben ser medidos con una precisión de al menos 0.1 mm o mejor. Cada parámetro es determinado por el promedio tres medidas del espesor y dos medidas del diámetro (como mínimo). Pesar el espécimen con la superficie seca con una precisión de 0.1 g.
3. Montar y sellar cada espécimen encima de los dos anillos de conexión, usando la silicona, y complete la capa de todas las superficies laterales con silicona (2–3 mm de espesor).
4. Colocar los especímenes en un área bien ventilada y cubrir las superficies expuestas con papel mojado por alrededor de 2 horas, hasta que la silicona esté lo suficientemente seca y fuerte como para manipularla.
5. Remover cualquier cantidad de silicona excedente de la superficie interior del espécimen a lo largo de los bordes del anillo, para obtener una máxima superficie de exposición. Asegurarse de minimizar la contaminación de las superficies expuestas por la silicona.

6. Medir los diámetros de las áreas reales expuestas del espécimen usando dos medidas en posiciones diferentes de forma radial (dos mediciones a cada celda). Estos diámetros deben ser aproximadamente iguales pero no más grandes que el diámetro de la boca del anillo.
7. Montar el espécimen y los dos anillos encima de las dos celdas. Para evitar la fuga de la solución, aplicar grasa de vacío donde el anillo ensamblado está en contacto con las celdas. Garantizar que los pernos estén bien apretados manteniendo unidas las dos celdas. Las celdas como una alternativa pueden ser llenadas de agua para comprobar que no haya fugas. Después de este paso de control, vaciar el agua de las celdas y quitar el agua excedente con un tejido fino y suave.
8. Rellenar la primera celda con la solución de NaOH, con una concentración de 0.3 moles. (Ver tabla 2.12 Composición química de las soluciones).
9. Rellenar la otra celda con una mezcla de la solución de NaCl con una concentración de 0.5 moles y con una solución de NaOH con una concentración de 0.3 moles. (Ver tabla 2.10 Composición química de las soluciones).
10. Cuando los sistemas estén colocados y conectados todos los electrodos a las celdas conectar el sistema a la fuente de electricidad.
11. Encender la fuente de electricidad. Ajustar la salida de potencial para obtener una diferencia de potencial de 16–20 V a través de todos los especímenes. Registrar el potencial en los electrodos (V_e) y la diferenciad de potencial a través del espécimen (V_c).
12. Medir la corriente que pasa a través de cada espécimen.
 - ❖ Si la corriente está entre 5–100mA entonces el nivel de potencial ha sido correctamente colocado. Registrar las lecturas iniciales de intensidad de corriente (para una precisión de 0.1mA), y el potencial a través del espécimen (con una exactitud de 0.1V). Registrar la fecha y la hora.
 - ❖ Si la corriente que pasa a través del espécimen está por debajo de 5 mA, aumentar la salida de potencial hasta un máximo de 30 V para obtener una corriente en el rango correcto.
 - ❖ Si la corriente está por encima de 100 mA, disminuir la salida de potencial para hacer que la corriente baje hasta el nivel correcto (por debajo de 70 mA).
13. Si la corriente inicial de bajo potencial (6 V) es mayor que 100 mA, la prueba debe ser realizada para un período de 7 días solamente.

14. Durante el primer día de pruebas, tomar las medidas de la intensidad de corriente que pasa a través de los especímenes y los potenciales (V_e : en el electrodo y V_c : la diferencia de potencial de cada espécimen), en la hora cero (comienzo de la prueba), después de cuatro horas de prueba. Registrar la hora de cada medida.
15. Después del primer día, las medidas del paso de corriente a través de cada espécimen y la diferencia potencial se harán en los espacios de tiempo de 24 horas durante 13 días, (el período de pruebas en total es de 14 días). Se debe registrar la hora de cada medida

| Sal/Base (pureza 99%) | Solución Celda (Sal) 0.5M(NaCl)+0.3M(NaOH) | Solución Celda(Base) 0.3M (NaOH) |
|-----------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------|
| NaOH (g/litro) | 12.121 | 29.515 |
| NaCl (g/litro) | 29.515 | 0 |

Tabla 2.10 Composición química en g/l de las soluciones.

Una vez realizados todos los ensayos con los datos que se obtienen del paso de corriente a través de los especímenes, el programa es capaz de predecir el tiempo de vida de las estructuras de hormigón a través del ensayo de migración, versión modificada de la ASTM C1202 – Ensayo de Rápida Permeabilidad de Cloruros, mediante equipamiento desarrollado por STADIUM®-IDC.



Figura 2.6 Procedimiento experimental para la realización del ensayo de migración de iones.

2.6.4 Medición de la permeabilidad al aire. Método de Torrent

Se utilizó el Método Torrent para la medición de la permeabilidad al aire de las estructuras, método no destructivo, creado hace alrededor de 18 años, incluido como norma Suiza en 2003, para medir la calidad de los hormigones sin afectar la integridad de las estructuras (SIA, 2003).

Descripción del método.

La disposición del instrumental del equipo se esquematiza en la Figura 2.7

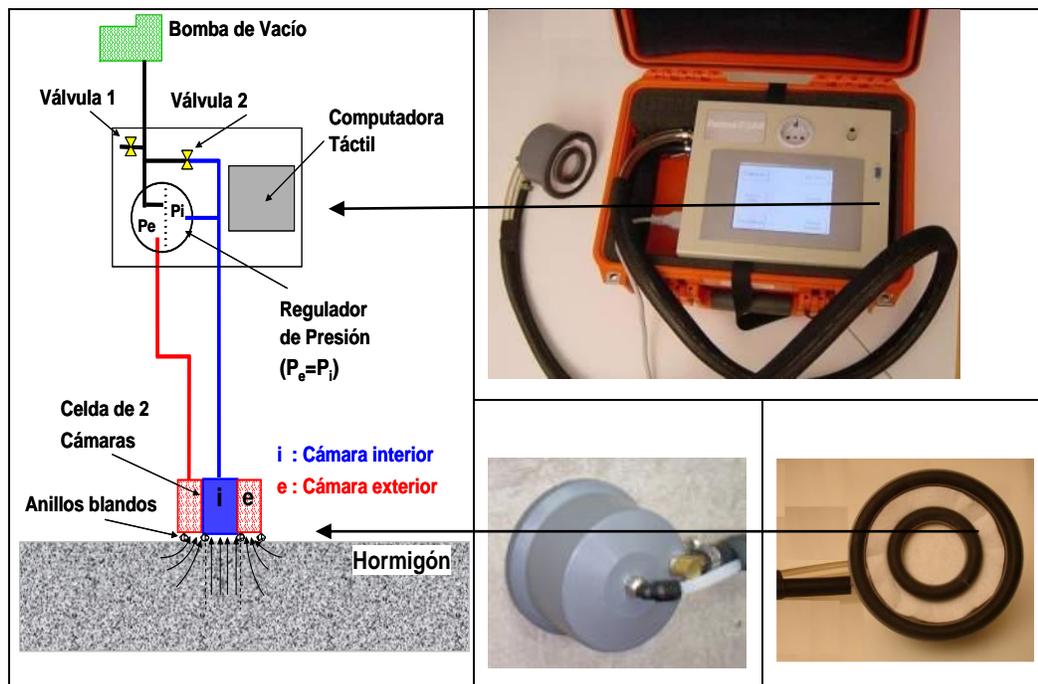


Figura 2.7 Esquema y detalles del "Método Torrent". (Tomado de Torrent, 2010)

Sus dos características distintivas son:

a) una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda.

Consiste en una cámara interna *i* y una cámara externa *e*.

b) un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

Procedimiento operacional del equipo.

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

Cuando la presión P_i baja a ~ 30 mbar se cierra la válvula 2, momento a partir del cual la bomba solo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara externa, de manera de equilibrar en todo momento la presión en ambas cámaras. De este modo, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado por la cámara exterior. Así se logra que el flujo de aire hacia la cámara central sea básicamente unidireccional y no afectado por el ingreso espurio de aire.

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

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

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

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.

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

Dónde:

k_T : coeficiente de permeabilidad al aire [m^2]

V_c : volumen de la cámara interior [m^3]

A : área de la cámara interior [m^2]

μ : viscosidad dinámica del aire [Ns/m^2]

ε : porosidad del hormigón [-]

p_a : presión atmosférica [N/m^2]

p_0 : presión en la cámara interior al inicio del ensayo ($t_0= 60$ s) [N/m^2]

p : presión en la cámara interior al final del ensayo t ($t \leq 360$ s) [N/m^2]

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso- caliza-arcilla calcinada

Posteriormente se clasifica el hormigón según la tabla 2.11 en función del coeficiente kT.

| Clasificación | $kT(10^{-16}m^2)$ | 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 |

Tabla 2.11 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT.



Figura 2.8 Pantalla del Permea-TORR, evaluación de la permeabilidad al aire de probeta y anillos blandos para crear el flujo de izquierda a derecha.

2.6.5 Determinación de la cantidad de iones cloruro en la muestra. Método de Volhard

Este método se aplicó teniendo en cuenta la norma (NC 344-2005) “Hormigón endurecido. Determinación del perfil de penetración de iones cloruro” donde se recogen las particularidades del mismo para hacer aplicado en Cuba. Este ensayo se basa en la determinación de iones cloruros en muestras de hormigón obtenidos por medio de un corte en torno eléctrico con 0,2 cm de separación entre ellas.

2.6.5.1 Determinación de la cantidad de iones cloruro. Procedimiento del ensayo Equipamiento:

- Torno eléctrico para cortar muestras de hormigón de 0,2 cm de espesor
- Extractora de testigos en seco
- Bandejas
- Cucharas

Capítulo II: Descripción de la estrategia de producción y evaluación para los hormigones con cemento de bajo carbono elaborado a base de clínker-yeso- caliza-arcilla calcinada

- Balanza analítica con una exactitud de 0,1 mg
- Sobres
- Brochas
- Tamiz 160 μm
- Plancha eléctrica o baño de arena
- Matraz aforado de 1000 ml
- Frasco cónico (erlenmeyer) de 500 ml
- Probetas graduadas de 10 ml, 50 ml y 100 ml
- Bureta ámbar de 100 ml con valor de división de la escala de 0,1 ml
- Bureta de 100 ml con valor de división de la escala de 0,1 ml
- Pipeta volumétrica automática de 20 ml
- Frasco lavador

Toma de muestras:

La muestra del hormigón tiene que obtenerse en seco ya que si se moja puede afectar en la determinación de cloruros, los cuales son solubles en agua. La muestra tiene que obtenerse de afuera hacia dentro del hormigón para poder determinar con exactitud el perfil de cloruro. En el caso de ser probetas de hormigones de investigaciones de laboratorio no es necesario sacarlos testigos en seco, directamente se le sacan las capas en el torno.

Procedimiento del ensayo:

Se toma la probeta de hormigón endurecido y seco. Se coloca en el torno de tal forma que la cuchilla del mismo corte la probeta de afuera hacia dentro en espesores de 2 mm. Estas muestras pulverizadas son clasificadas, pasadas por el tamiz 160 μm y lo pasado es la muestra que se toma, la cual es almacenada independiente. Se obtienen tantas capas en profundidad como sea necesario, hasta que dicha muestra de hormigón no posea iones cloruros.

Cada muestra, por triplicado es sometida a análisis químico para determinar el contenido de cloruros como se muestra a continuación.

Reactivos químicos:

Se emplearán productos químicos analíticos de calidad p.a.

Solución de ácido nítrico al 66 por ciento v/v

Solución de nitrato de plata 0,1 N

Solución de tiocianato de potasio 0,1N

Acetona

Solución saturada de amonio y hierro (III) dodecahidratado

- Se pesan 10 g a 20 g de la muestra y se seca en estufa a una temperatura entre 105 a 110 grados hasta que se elimine toda el agua, lo cual se determina cuando la pesada se mantiene constante.
- Se toman 2 g \pm 0.01 g de la muestra, la cual se transfiere cuantitativamente al frasco cónico.
- Se toma la porción de ensayo en el frasco cónico a la cual se le añaden 100 ml de agua para análisis y 50 ml de la solución de ácido nítrico y se hierve durante 20 minutos, después se deja enfriar a temperatura ambiente. A la solución enfriada se le añaden 20 ml de nitrato de plata y 10 ml de acetona. Posteriormente se agita para flocular el precipitado formado de AgCl.
- Al precipitado se le añade 2 ml de solución saturada de sulfato de amonio y hierro (III), la solución se valora con tiocianato de potasio 0,1 N y se agita continuamente hasta que se mantenga por espacio de 20 s aproximadamente el color pardo rojizo.
- Si la muestra contiene poca cantidad de cloruros, se emplea solamente 10 ml de solución de nitrato de plata y se utiliza la pipeta volumétrica para la valoración. El ensayo se realiza a temperatura de (25 ± 2) grados.
- El ensayo en blanco se realiza siguiendo el mismo procedimiento que para la solución del ensayo.
- El contenido de iones cloruros (Cl⁻) en la porción de ensayo se determinará mediante la siguiente fórmula con una precisión de las centésimas:

Dónde:

$$\text{Cl}^- = \frac{(a - b) \times N \times 0,03546 \times 100\%}{M}$$

a, es el volumen gastado de la solución de tiocianato de potasio con el blanco expresado en ml.

b, es el volumen gastado de la solución de tiocianato de potasio con la porción de ensayo, expresado en ml.

N, es la normalidad de la solución de tiocianato de potasio.

0,03546 miliequivalente gramo del Cl⁻, expresado en gramos.

M, es la masa de la porción de ensayo, expresado en gramos.

2.6.6 Determinación de la profundidad de carbonatación

El método utilizado es el normado en la NC 355-2004 “Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio”. Este método tiene como principio básico que la medida de profundidad de la capa de carbonatada en los hormigones se basa en la obtención 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.

2.6.6.1 Determinación de la profundidad de carbonatación en la muestra. Procedimiento del ensayo

Equipamiento y utensilios:

Indicador

- Se utilizara como indicador una disolución de fenolftaleína al uno por ciento disuelta en alcohol etílico al 70 por ciento. Así para preparar 100cm³ de disolución de indicador, se disuelve un gramo de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico del 99 por ciento 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). Para valores entre 8 y 9.5 cm toma tonalidades entre rosa y rojo púrpura.

Dispositivo de medida

- Cualquier instrumento que posea una precisión de 0.5 mm.

Brocha de una pulgada

Pulverizador

Taladro percutor o cincel y martillo

Toma de muestras:

La medida de la penetración del frente carbonatado deberá realizarse 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 estas 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 medio que permita extender una capa 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 de, pasado uno o dos 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 minutos.

Las medidas se realizaran con un instrumento que garantice una precisión de 0.5 mm. En estas mediciones se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Si la carbonatación presenta un frente homogéneo como el indicado en la (figura 1.a), la profundidad de la carbonatación se expresara como pc.

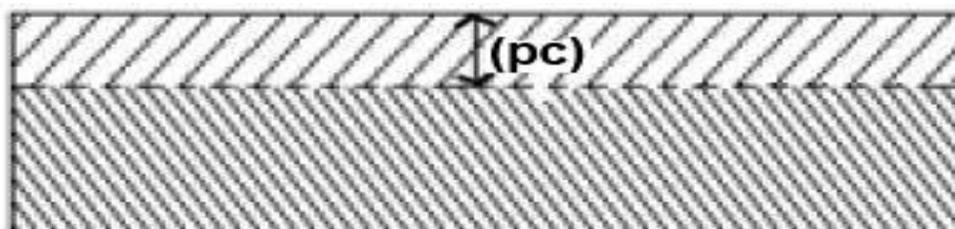


Figura 1.a

- Cuando el frente de carbonatación aparezca de forma irregular, como el señalado en la (figura 1.b), la medida se dará indicando una penetración media, pc. media, la penetración máxima, pc. máx, y la penetración mínima pc mín.

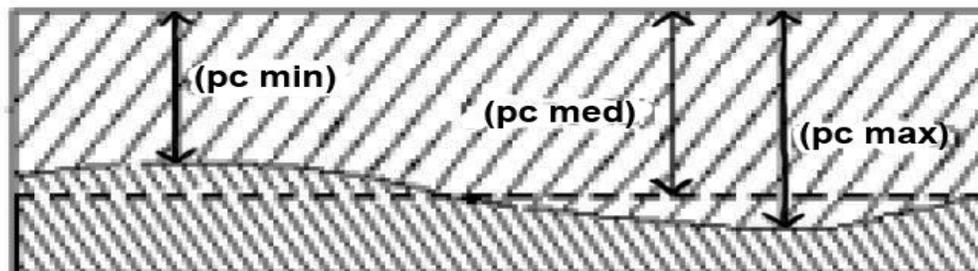


Figura 1.b

- Deberá indicarse si el color que adquiere la superficie con el indicador es rojo púrpura o rosado.
- La profundidad de carbonatación se medirá preferentemente en las zonas donde exista árido de tamaño pequeño .Se prescindirá de las medidas en las zonas con granos de árido de gran tamaño (>12.5 cm).
- No es aconsejable medir en las esquinas de los elementos de hormigón.

2.1 Conclusiones parciales del capítulo

1. El proceso de producción industrial del cemento de bajo carbono fue llevado a cabo con el trabajo en conjunto de varias instituciones de la región como son la ENIA de Villa Clara, la Empresa Constructora de Obras del Turismo (ECOT CSM), Laboratorio CEINPET-CUPET, Laboratorio central GECM, Laboratorio CTDMC de Siguaney, Industria de Materiales de la Construcción de Villa Clara, Empresa de Prefabricado (EPIVC) y la Empresa Constructora Militar No. 3.
2. La NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones, constituye una valiosa herramienta que puede servir de guía para el análisis del comportamiento de los hormigones elaborados con cementos de bajo carbono, permitiendo valorar el cumplimiento de los parámetros de desempeño recogidos en dicho documento de una manera efectiva.

3. La utilización de los sitios de exposición (para nuestro caso el ubicado en Cayo Santa María), brinda la posibilidad real de someter a las muestras de hormigones elaborados con distintos tipos de materias primas a condiciones reales de agresividad, lo cual posibilita una valoración más confiable del desempeño de los hormigones en distintos ambientes.

4. La correcta aplicación de ensayos de durabilidad permite conocer el comportamiento de los hormigones, encontrar los puntos vulnerables en cada caso y por tanto definir los lugares donde es más efectivo su uso. Además, conocer las medidas más eficaces para extender la vida útil de los elementos de hormigón expuestos.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permita demostrar la aptitud de hormigones producidos con Cemento de Bajo Carbono (LC³) para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Este capítulo resume los resultados de las pruebas experimentales que se le aplicaron a los hormigones producidos con Cemento de Bajo Carbono en las dos pruebas industriales realizadas desde que comenzó el proceso de evaluación de dicho cemento. Primeramente se presentan los datos de la Primera Prueba Industrial.

3.1 Dosificaciones de los hormigones

Hormigones de 20 y 25 MPa. Producciones in situ y prefabricados, áridos del Purio y S. Soto

| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg | | dosificación volumétrica m3 | | gasto de materiales para 1 m3 | |
|----------------------------|-------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|--------------------------------------|----------------------|
| | 20 MPa | 25 MPa | 20 MPa | 25 MPa | 20 MPa | 25 MPa |
| Cemento SIG 45 | 305 | 325 | 1 | 1 | 0.305 t | 0.325 t |
| Arena de El Purio | 592 | 604 | 1,546 | 1,479 | 0.417 m ³ | 0.425 m ³ |
| Arena S. Soto. | 254 | 259 | 0,702 | 0,671 | 0.189 m ³ | 0.193 m ³ |
| Gravilla 19-10 mm Arriete | 954 | 973 | 2,72 | 2,602 | 0.734 m ³ | 0.748 m ³ |
| Agua | 180 | 160 | 0,667 | 0,556 | 180 L | 160 L |
| Aditivo Mapefluid N 100 RC | 3,102 | 3,305 | --- | --- | 3.102 L | 3.305 L |
| R. a/c Amasada | 0,59 | 0,49 | --- | --- | --- | --- |
| R. a/c Efectiva | 0,5 | 0,4 | --- | --- | --- | --- |

Observaciones:

Las dosis de aditivo están expresadas en L/m³.

Asentamiento Proy : 12 ± 3 cm

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| Resist. Especificada (MPa) | Consumo de cemento (kg/m ³) | Resistencia media estimada fcm (kg/cm ²) | Rendimiento (referido a la media) |
|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 20 | 305 | 23 | 0,75 |
| 25 | 325 | 29 | 0,89 |

Hormigones de 20 y 25 MPa. Producciones in situ y prefabricados, áridos Palenque

| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg | | dosificación volumétrica m ³ | | gasto de materiales para 1 m ³ | |
|-------------------------|------------------------------|--------|-----------------------------------------|--------|-------------------------------------------|----------------------|
| | 20 MPa | 25 MPa | 20 MPa | 25 MPa | 20 MPa | 25 MPa |
| Cemento SIG 45 | 330 | 360 | 1 | 1 | 0,33 | 0.360 |
| Polvo 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 Proy : 12 ± 3 cm

| Resist. Especificada (MPa) | Consumo de cemento (kg/m ³) | Resistencia media estimada fcm (kg/cm ²) | Rendimiento (referido a la media) |
|----------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 20 | 330 | 23 | 0,70 |
| 25 | 360 | 29 | 0,81 |

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Hormigones para producción de bloques huecos de hormigón

| MATERIALES | dosificación gravimétrica kg/m ³ | | dosificación volumétrica m ³ | | gasto de materiales para 1 m ³ | |
|-------------------|---------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------|-----------|-------------------------------------------|-----------|
| | blq 10 cm | blq 15 cm | blq 10 cm | blq 15 cm | blq 10 cm | blq 15 cm |
| Cemento SIG 45 | 280 | 290 | 1 | 1,00 | 1,00 | 0.290 t |
| Arena Sergio Soto | - | 800 | - | 2,11 | - | 0,59 |
| Polvo Purio | 883 | - | 2,41 | - | 0,58 | |
| Granito Purio | 1079 | 1200 | 3,11 | 3,30 | 0,75 | 0,84 |
| Agua | 126 | 113 | 0,68 | 0,44 | 126 lts | 113 lts |
| R. a/c Amasada | 0,45 | 0,39 | | | --- | --- |
| R. a/c Efectiva | | | | | --- | --- |

Observaciones:

Asentamiento= 0 cm

Resumen de Dosificaciones

| Identificación | Resistencia | Cem kg/m ³ | a/c | a. fino | a. grueso | S Plastif | Asent |
|----------------|-------------|-----------------------|------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| D1-LCC | 20 MPa | 305 | 0,50 | Purio-S. Soto | Arriete | 3,1 | 12 ± 3 cm |
| D2-LCC | 25 MPa | 325 | 0,40 | Purio-S. Soto | Arriete | 3,3 | 12 ± 3 cm |
| D3-LCC | 20 MPa | 330 | 0,47 | Palenque | Palenque | 3,7 | 12 ± 3 cm |
| D4-LCC | 25 MPa | 360 | 0,47 | Palenque | Palenque | 4,03 | 12 ± 3 cm |
| D9-P35 | 20 MPa | 270 | 0,59 | Palenque | Palenque | 2,80 | 12 ± 3 cm |
| D10-P35 | 25 MPa | 300 | 0,57 | Palenque | Palenque | 2,80 | 12 ± 3 cm |

Observaciones

Plastificante utilizado Dynamon SX 32

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.2 Resistencia a compresión a 3, 7, 28 días

La tabla 3.1 muestra los valores de resistencia obtenidos en diferentes instituciones a 3, 7 y 28 días, apreciándose variaciones de la resistencia generalmente pequeños entre las diferentes mediciones. Estas mediciones fueron las primeras efectuadas para la certificación del cemento.

| Institución | Finura Tamiz 4900 % ret | Blaine cm ² /g | p. espec (g/cm ³) | consist normal % | minicono (%_ref.P35) | Tiempo fraguado | | | Resistencia compresión MPa | | |
|------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------|----------------------|-----------------|------------|--------------------|----------------------------|------|------|
| | | | | | | inicial (min) | final (hr) | Estabil. Vol. (mm) | 3d | 7d | 28d |
| Fábrica Siguaney | 12.0 | 4190 | 2.92 | 25.0 | x | 135 | 2.92 | 0.30 | 11.0 | 17.5 | 30.3 |
| GECEM | 12.0 | 5085 | 2.95 | 25.2 | x | 94 | 2.73 | 0.40 | 10.7 | 16.2 | 29.7 |
| CTDMC | 14.4 | 3619 | 2.91 | 24.1 | 76.1 | 128 | 3.35 | X | 10.4 | 18.9 | 31.8 |
| ENIA VC | x | x | x | x | x | x | x | X | x | 18.4 | 27.6 |
| CEINPET | x | x | x | x | x | x | x | X | x | x | x |

Tabla 3.1 Resistencia a compresión, certificación del cemento.

3.3 Resistencia a compresión, hormigón de laboratorio (SIG B45)

Las tablas 3.2 y 3.3 muestran los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a compresión en los diferentes laboratorios involucrados en la certificación del cemento SIG B45 en la primera prueba industrial.

| Institución | Destino | Agregado | Resist Especif. MPa | Cemento (kg/m ³) | Asent. estimad (cm) | Asent (cm) | Volum.W. (kg/m ³) | Relac. a/c | Resist a Comp. (MPa) | |
|----------------------|---------------|----------|---------------------|------------------------------|---------------------|------------|-------------------------------|------------|----------------------|------|
| | | | | | | | | | 7d | 28d |
| Laboratorio ECOT CSM | | | | | | | | | | |
| Mix #1 | Struct. Conc. | Agg1 | 30 | 0,75 | 18±3 | 19 | 2314 | 0,48 | 17,1 | 29,1 |
| Mix #4 | Struct. Conc. | Agg1 | 20 | 0,86 | 18±3 | 18 | 2317 | 0,71 | 16,0 | 25,7 |

Tabla 3.2 Resistencia a compresión, hormigón de laboratorio (certificación del cemento).

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| Institución | Destino | Agregado | Resist Especif. MPa | Cemento (kg/m3) | Asent Especif. (cm) | Asent (cm) | Volum.W. (kg/m3) | a/c ratio | Resist a Comp. (MPa) | |
|-------------|---------------|----------|---------------------|-----------------|---------------------|------------|------------------|-----------|----------------------|------|
| | | | | | | | | | 7d | 28d |
| ENIA VC | | | | | | | | | | |
| Mix #1 | Struct. Conc. | Agg1 | 30 | 0,84 | 18±3 | 21 | 2354 | 0,35 | 19,6 | 32,8 |
| Mix #2 | Struct. Conc. | Agg2 | 30 | 0,00 | 18±3 | | | | | |
| Mix #3 | Struct. Conc. | Agg3 | 25 | 1,09 | 12±3 | 16 | 2440 | 0,33 | 22,4 | 32,6 |
| Mix #4 | Struct. Conc. | Agg1 | 20 | 0,79 | 18±3 | 17 | | 0,53 | 14,1 | 23,6 |
| Mix #5 | Struct. Conc. | Agg3 | 20 | 0,72 | 12±3 | 19 | 2430 | 0,55 | 14,3 | 21,5 |

Tabla 3.3 Resistencia a compresión, hormigón de laboratorio (certificación del cemento).

3.4 Resistencia a compresión, hormigón de taller (SIG B45)

La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión de los hormigones producidos en la EPI de Remedios y la Empresa Constructora Militar No.3. Estos hormigones fueron utilizados en la elaboración de los especímenes expuestos en los sitios, a los cuales se le extrajeron los testigos para los ensayos de durabilidad.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| Institución | Destino | Cemento | Agregado | Resist Estimad Mpa | Cemento. (kg/m3) | Consist Cono (cm) | Consist Cono inv (cm) | Volum.W. (kg/m3) | Relaca/c | 7d | 28d |
|---------------------|-----------------------------|---------|-----------------|--------------------|------------------|-------------------|-----------------------|------------------|----------|------|------|
| ECM #3 | | | | | | | | | | | |
| Mezcla #1 | Paneles | SIG B45 | Purio + S. Soto | 30 | 0,32 | | 60 | - | 0,52 | 8,65 | 15,9 |
| EPI Remedios | | | | | | | | | | | |
| Mezcla #2 | T-26, barandas puente | SIG B45 | Palenque | 25 | x | 17,5 | x | x | 0,57 | x | x |
| Mezcla #3 | T-26, barandas puente | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,57 | x | x |
| Mezcla #4 | T-26, cimientos | SIG B45 | Palenque | 25 | 0,87 | 8,0 | x | x | 0,58 | 21,0 | 31,4 |
| Mezcla #5 | cimientos, paneles | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,58 | x | x |
| Mezcla #6 | cimientos, paneles | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,58 | x | x |
| Mezcla #7 | Paneles, poste cerca, losas | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,58 | x | x |
| Mezcla #8 | Paneles, poste cerca, losas | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,58 | x | x |
| Mezcla #9 | Cajón A-2-5 | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,61 | x | x |
| Mezcla #10 | Cajón A-2-5 | SIG B45 | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,61 | x | x |
| Mezcla #11 | losa LM-32-5 | OPC | Palenque | 25 | 1,22 | 16,0 | x | x | 0,74 | 27,1 | 36,6 |
| Mezcla #12 | losa LM-32-5 | OPC | Palenque | 25 | x | x | x | x | 0,74 | x | x |

Tabla 3.4 Resistencia a compresión, hormigón de taller (certificación del cemento).

3.5 Elementos creados para la extracción de testigos

| Probetas en la EPIVC | | | | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|---------|---------|---------|----------|------------|-----------|------------|
| Identificación | Corresponden a elementos | dosif | resist | cemento | a/c dis | a/c real | asent real | fundición | |
| 1 | M381 | Prefabricados con LCC | DA-LCC | 25 MPa | 360 | 0,47 | 0,59 | 8 | 02/11/2013 |
| 2 | M25 | cimientos con LCC | D4-LCC | 25 MPa | 360 | 0,47 | | 12 | 06/02/2014 |
| 3 | M30 | cimientos con LCC | D3-LCC | 20 MPa | 330 | 0,47 | | 11 | 08/02/2014 |
| 4 | M32 | cimientos con P35 | D10-P35 | 25 MPa | 300 | 0,40 | | 8 | 10/02/2014 |
| 5 | M35 | cimientos con P35 | D9-P35 | 20 MPa | 270 | 0,59 | | 9 | 11/02/2014 |

Tabla 3.5 Elementos para la extracción de testigos.

| Probetas en la EPIVC | | | Resistencia MPa | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|------|------|-----------|-----------|---------------|
| Identificación | Corresponden a elementos | | 3d | 7d | 28d | cil 15x30 | cil 10x20 | cub. 15x15x15 |
| 1 | M381 | Prefabricados con LCC | - | 21 | 31,4 | 2 | 3 | 2 |
| 2 | M25 | cimientos con LCC | - | 18,5 | 30,8 | | 5 | 2 |
| 3 | M30 | cimientos con LCC | - | 19 | 24,4 | | 5 | 2 |
| 4 | M32 | cimientos con P35 | 17,40 | - | 27,9 | | 5 | 2 |
| 5 | M35 | cimientos con P35 | 15,10 | - | 26,8 | | 5 | 2 |

Tabla 3.6 Resistencia a compresión, elementos para la extracción de testigos.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.6 Ubicación de las muestras

| Sitio de exposición | Nivel de agresividad | Distrib.Muestras |
|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| Punta Matamoros, Cayo Santa María | Muy alta | M-25, M30, M32, M35 |
| Sede Universitaria, Cayo Santa María | Alta | M381 |
| EPI, Remedios | Media | SG, SGR, P, M25, M30, M32, M35 |

Tabla 3.7 Ubicación de las muestras

3.7 Resultados de los ensayos realizados

3.7.1 Permeabilidad al aire

A continuación se muestran los resultados de la prueba de permeabilidad al aire realizada a los elementos colocados en el Sitio de exposición No. 1 Cayo Santa María (tabla 3.8) así como a las probetas cilíndricas de 150 x 300 mm colocadas en un ambiente de agresividad baja (tabla 3.9).

| Elemento | Situación | Humedad(%) | KT |
|-------------------|-----------|------------|--------|
| M 30 ₁ | 400 x 900 | 4,8 | 0.1900 |
| M 30 ₂ | 400 x 800 | 4,7 | 0.0520 |
| M25 ₁ | 150 x 350 | 4,8 | 0.0010 |
| M25 ₂ | 180 x 900 | 4,9 | 0.0310 |
| M381 ₁ | 300 x 350 | 4,4 | 0.0011 |
| M381 ₂ | 300 x 850 | 4,2 | 0.0010 |
| M32 ₁ | 200 x 105 | 4,9 | 0.0036 |
| M32 ₂ | 400 x 360 | 5,0 | 0.0350 |

Tabla 3.8 Resultados de permeabilidad al aire en elementos colocados en sitio de exposición.

| | Especímenes | Humedad | kt |
|---|---------------------|---------|--------|
| 1 | M-30 ₁ a | 4.1 | 0.0250 |
| | M-30 ₁ b | 4.1 | 0.0160 |
| 2 | M-30 ₂ a | 4.2 | 0.0160 |
| | M-30 ₂ b | 4.2 | 0.0060 |
| 3 | M-35 ₁ a | 4.5 | 0.0180 |
| | M-35 ₁ b | 4.5 | 0.0270 |
| 4 | M-35 ₂ a | 4.7 | 0.0021 |
| | M-35 ₂ b | 4.7 | 0.0410 |

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| | | | |
|---|---------------------|-----|--------|
| 5 | M-25 ₁ a | 3.8 | 0.0033 |
| | M-25 ₁ b | 3.6 | 0.0033 |
| 6 | M-25 ₂ a | 4.2 | 0.0028 |
| | M-25 ₂ b | 4.2 | 0.0067 |
| 7 | M-32 ₁ a | 4.2 | 0.0050 |
| | M-32 ₁ b | 4.2 | 0.0860 |
| 8 | M-32 ₂ a | 4.0 | 0.0750 |
| | M-32 ₂ b | 4.0 | 0.2300 |

Tabla 3.9 Resultados de ensayo de permeabilidad al aire en probetas cilíndricas de 150 x 300 mm colocada en un ambiente de baja agresividad.

3.7.1.1 Análisis del ensayo de permeabilidad al aire. Método de Torrent.

La gráfica de la figura 3.1 se obtuvo al plotear los resultados arrojados por la aplicación del método de Torrent a los elementos de hormigón sometidos a un ambiente de alta agresividad en el sitio de exposición en Cayo Santa María. Como se aprecia los hormigones producidos con LC³ (M-25, M-381) presentan un valor de permeabilidad al aire menor que la mezcla donde se utilizó cemento Portland (M-32), por otro lado la mezcla M-30 aunque fue realizada con cemento LC³ tiene un mayor valor de permeabilidad al aire que la muestra patrón (muestra elaborada con P-35), pero según la tabla 3.10 donde se ofrece una clasificación para los hormigones se puede apreciar que ambas mezclas están dentro del mismo rango de baja permeabilidad.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

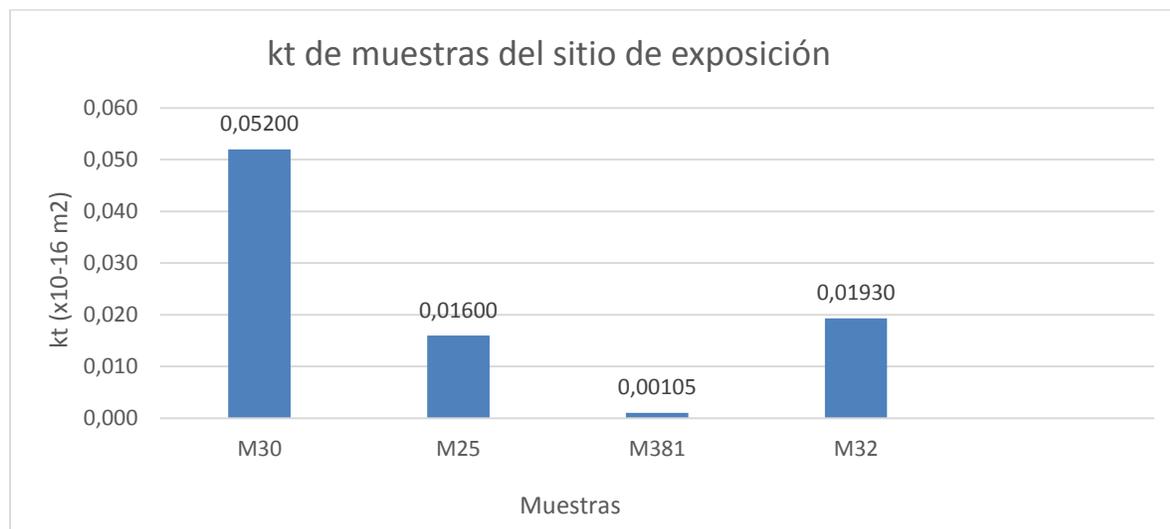


Figura 3.1 Resultados de kT de muestras extraídas del sitio de exposición bajo régimen de agresividad alta.

| Clasificación | kT(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 |

Tabla 3.10 Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT.

En la figura 3.2 se muestran los resultados del ensayo de permeabilidad al aire aplicado a muestras sometidas a un ambiente de baja agresividad, es apreciable en esta gráfica que las mezclas producidas con LC³ (M-25, M-30) presentan menor valor de permeabilidad que las mezclas donde se utilizó cemento portland (M-32, M-35).

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

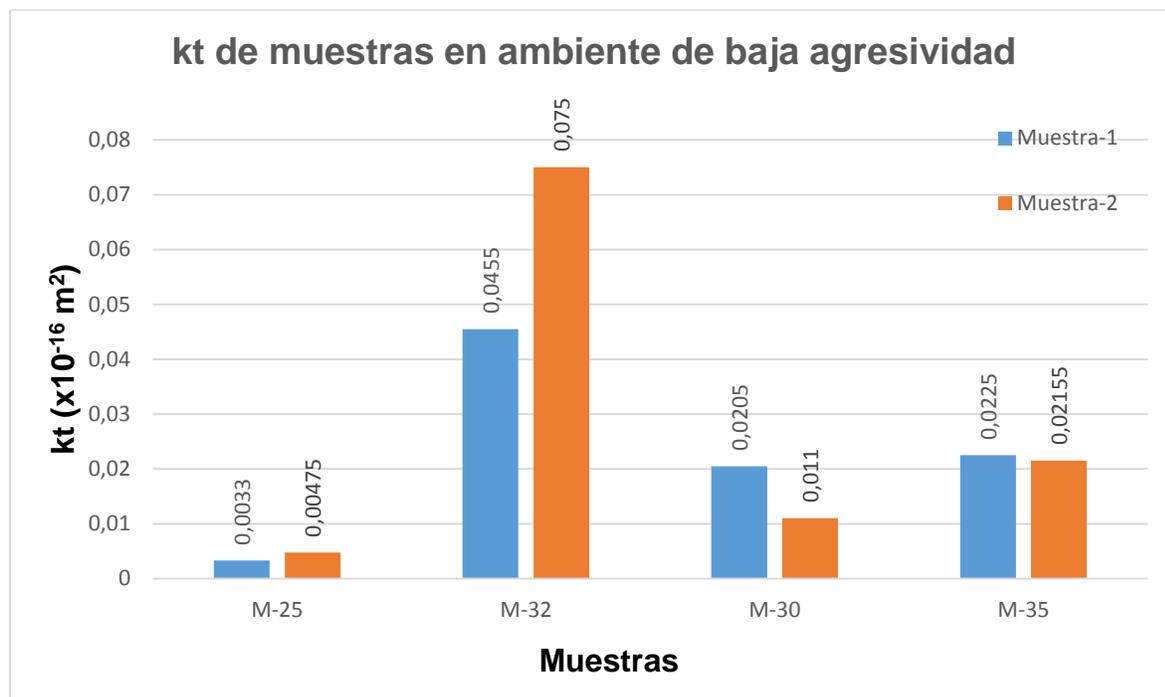


Figura 3.2 resultados de kT de muestra bajo régimen de agresividad baja.

3.7.1.2 Correlación entre permeabilidad al aire, intensidad de la corriente y tiempo en que atraviesan los cloruros a la muestra

En la figura 3.3 y 3.4 se aprecia como los hormigones a base de cemento LC³ presentan mejores resultados que la muestra producida con cemento Pórtland excepto el espécimen M-30 que está un tanto por detrás fundamentalmente porque esta fue concebida con una resistencia de diseño de 20 MPa. También se puede ver en estas dos figuras como la muestra M-381 presenta excelentes valores de permeabilidad al aire, intensidad de la corriente así como el mayor tiempo en que los cloruros atraviesan la muestra.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

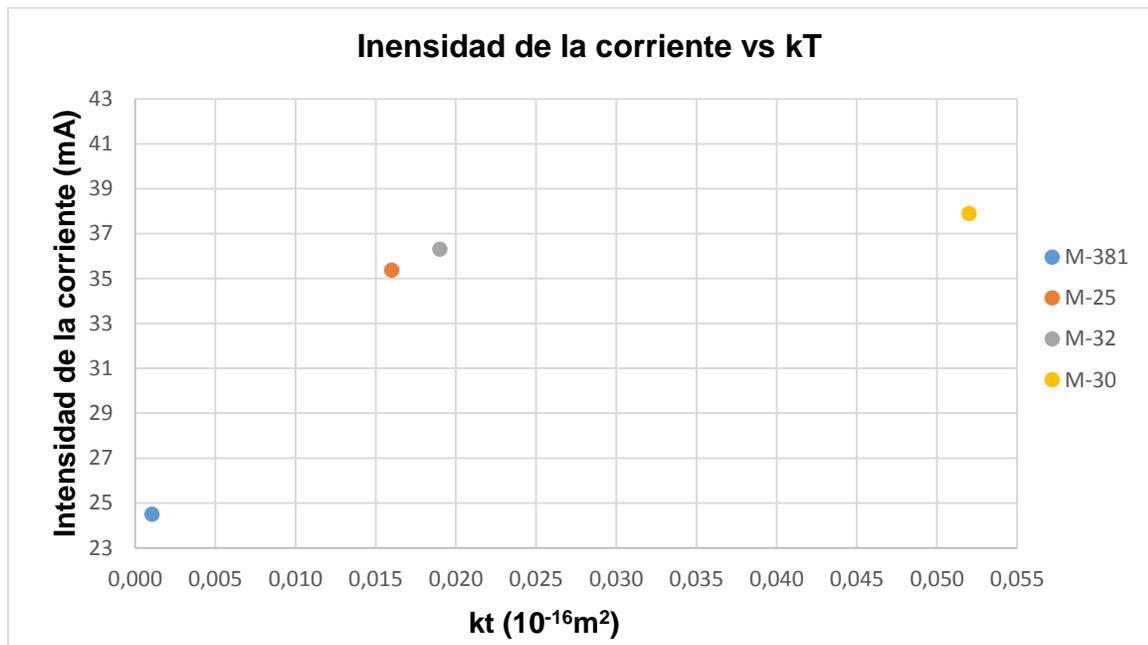


Figura 3.3 Correlación entre permeabilidad al aire e intensidad de la corriente.

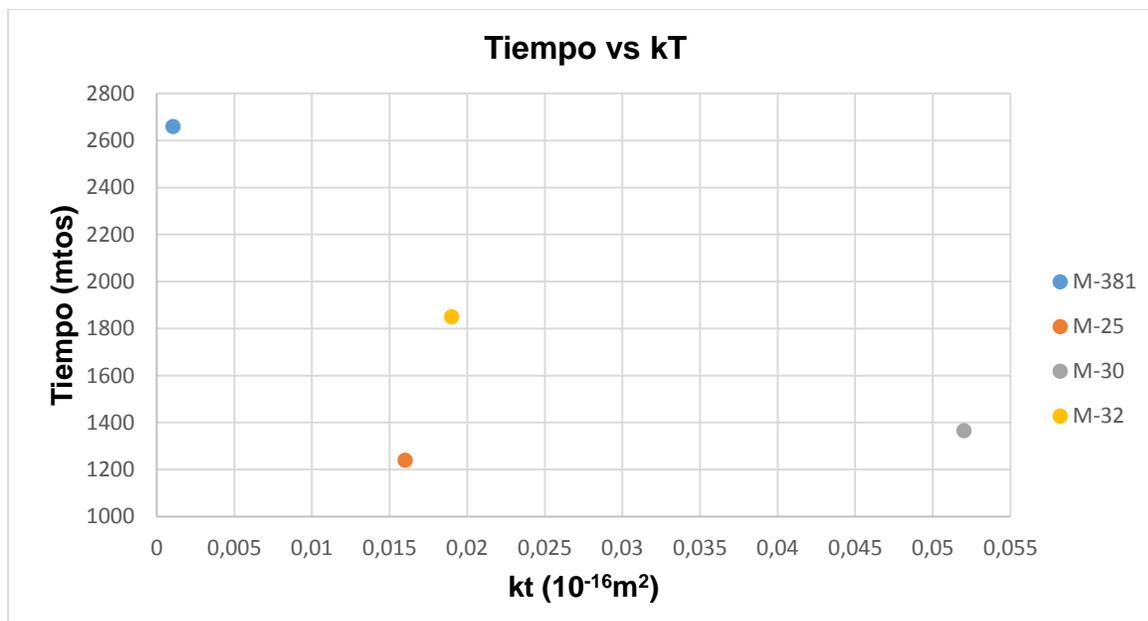


Figura 3.4 Correlación entre permeabilidad al aire y el tiempo en que los cloruros atraviesan la muestra.

3.7.2 Migración de iones mediante el protocolo STADIUM

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Los resultados de la medición de la intensidad de corriente (mA) y diferencia de potencial (Vc) se muestran en la tabla 3.11 y 3.12 para la muestra M-381 y M-35 respectivamente.

| Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
|-------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|
| Tiempo(mts) | Corriente(mA) | Voltaje(V) | Tiempo(mt) | Corriente(mA) | Voltaje(V) |
| 0 | 36,94 | 17,77 | 0 | 27,72 | 18,02 |
| 101 | 35,19 | 17,36 | 101 | 27,15 | 17,63 |
| 186 | 33,15 | - | 186 | 26,01 | - |
| 261 | 32,68 | 17,40 | 261 | 25,81 | 17,55 |
| 331 | 32,42 | 17,24 | 331 | 25,46 | 18,10 |
| 389 | 32,30 | 18,00 | 389 | 25,55 | 18,26 |
| 441 | 32,26 | 17,95 | 441 | 25,53 | 18,19 |
| 504 | 32,07 | 17,83 | 504 | 25,29 | 18,20 |
| 564 | 31,71 | 17,99 | 564 | 25,11 | 18,21 |
| 624 | 31,34 | 18,00 | 624 | 24,66 | 18,23 |
| 699 | 31,07 | 17,97 | 699 | 24,64 | 18,15 |
| 744 | 30,94 | 17,99 | 744 | 24,46 | 18,15 |
| 1179 | 27,48 | 18,12 | 1179 | 21,78 | 18,50 |
| 1239 | 27,41 | 18,10 | 1239 | 21,72 | 18,51 |
| 1364 | 27,37 | 18,06 | 1364 | 21,70 | 18,29 |
| 1460 | 27,35 | 18,10 | 1460 | 21,70 | 18,32 |
| 1595 | 27,28 | 18,25 | 1595 | 21,73 | 18,45 |
| 1729 | 27,68 | 18,24 | 1729 | 21,85 | 18,43 |
| 1850 | 27,63 | 18,25 | 1850 | 21,97 | 18,38 |
| 1970 | 27,56 | 18,30 | 1970 | 21,91 | 18,32 |
| 2090 | 27,54 | 18,26 | 2090 | 21,84 | 18,49 |
| 2210 | 27,43 | 18,18 | 2210 | 21,74 | 18,24 |
| 2660 | 27,01 | 18,15 | 2660 | 21,34 | 18,30 |
| 2780 | 27,17 | 18,05 | 2780 | 21,40 | 18,46 |
| 2900 | 27,37 | 17,99 | 2900 | 21,45 | 18,24 |
| 3140 | 27,94 | 17,98 | 3140 | 21,71 | 18,18 |
| 4130 | 29,52 | 17,59 | 4130 | 22,65 | 17,80 |

Tabla 3.11 Resultados de intensidad de la corriente (mA) y diferencia de potencial (Vc) medidos a la muestra M-381.

| Muestra 1 | | | Muestra 2 | | |
|-------------|---------------|------------|------------|---------------|------------|
| Tiempo(mts) | Corriente(mA) | Voltaje(V) | Tiempo(mt) | Corriente(mA) | Voltaje(V) |
| 0 | 67,60 | 17,42 | 0 | 61,60 | 17,03 |
| 84 | 64,20 | 17,58 | 84 | 60,00 | 17,20 |
| 210 | 63,70 | 17,86 | 210 | 59,20 | 16,90 |
| 295 | 63,20 | 17,74 | 295 | 58,50 | 17,05 |

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| | | | | | |
|------|-------|-------|------|-------|-------|
| 355 | 62,30 | 17,75 | 355 | 58,50 | 17,01 |
| 405 | 62,00 | 17,69 | 405 | 58,50 | 16,99 |
| 525 | 57,90 | 17,67 | 525 | 56,30 | 16,96 |
| 646 | 59,60 | 17,78 | 646 | 57,50 | 17,01 |
| 703 | 59,50 | 17,78 | 703 | 57,10 | 16,93 |
| 765 | 59,00 | 17,77 | 765 | 56,30 | 17,03 |
| 810 | 58,90 | 17,73 | 810 | 57,00 | 16,96 |
| 855 | 58,90 | 17,76 | 855 | 56,80 | 17,14 |
| 1230 | 59,10 | 17,71 | 1230 | 57,00 | 17,05 |
| 1290 | 58,60 | 17,52 | 1290 | 56,50 | 16,70 |
| 1365 | 59,40 | 17,56 | 1365 | 57,10 | 16,86 |
| 1425 | 60,20 | 17,65 | 1425 | 58,80 | 17,12 |
| 1485 | 61,10 | 17,63 | 1485 | 59,70 | 17,17 |
| 1545 | 61,60 | 17,53 | 1545 | 59,80 | 17,12 |
| 1605 | 62,20 | 17,49 | 1605 | 60,20 | 16,96 |
| 1669 | 63,30 | 17,41 | 1669 | 62,50 | 16,97 |
| 1732 | 63,50 | 17,47 | 1732 | 62,00 | 16,98 |
| 1785 | 64,10 | 17,45 | 1785 | 62,90 | 16,98 |
| 1845 | 65,20 | 17,52 | 1845 | 63,30 | 16,46 |

Tabla 3.12 Resultados de intensidad de la corriente (mA) y diferencia de potencial (Vc) medidos a la muestra M-35.

3.7.2.1 Análisis del ensayo migración de iones mediante el protocolo STADIUM

La figura 3.5 y 3.6 presentan la comparación de las muestras M-381 (LC³) examinadas en 2014 y 2015, así como las muestras M-35 (portland) también examinadas en 2014 y 2015 respectivamente.

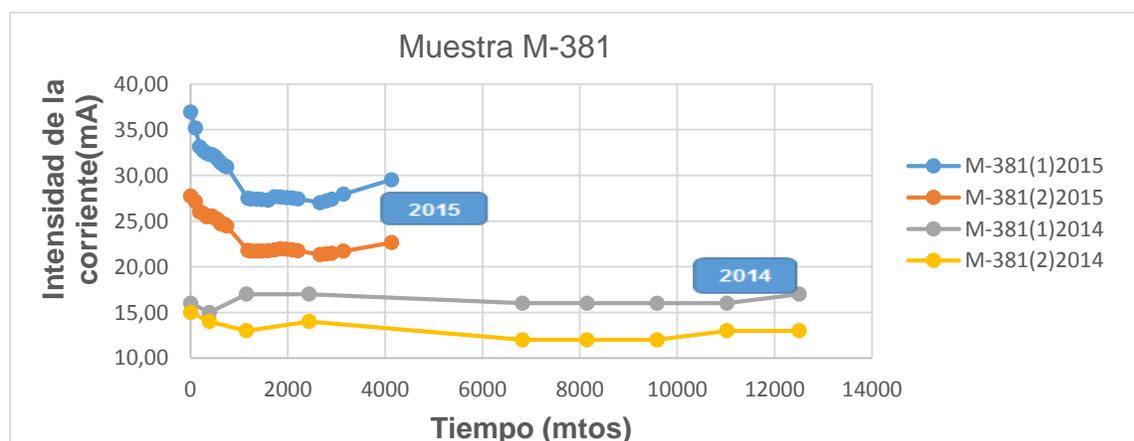


Figura 3.5 Resultado de migración de cloruros de 2014 y 2015 con muestras (M-381) de la misma mezcla.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

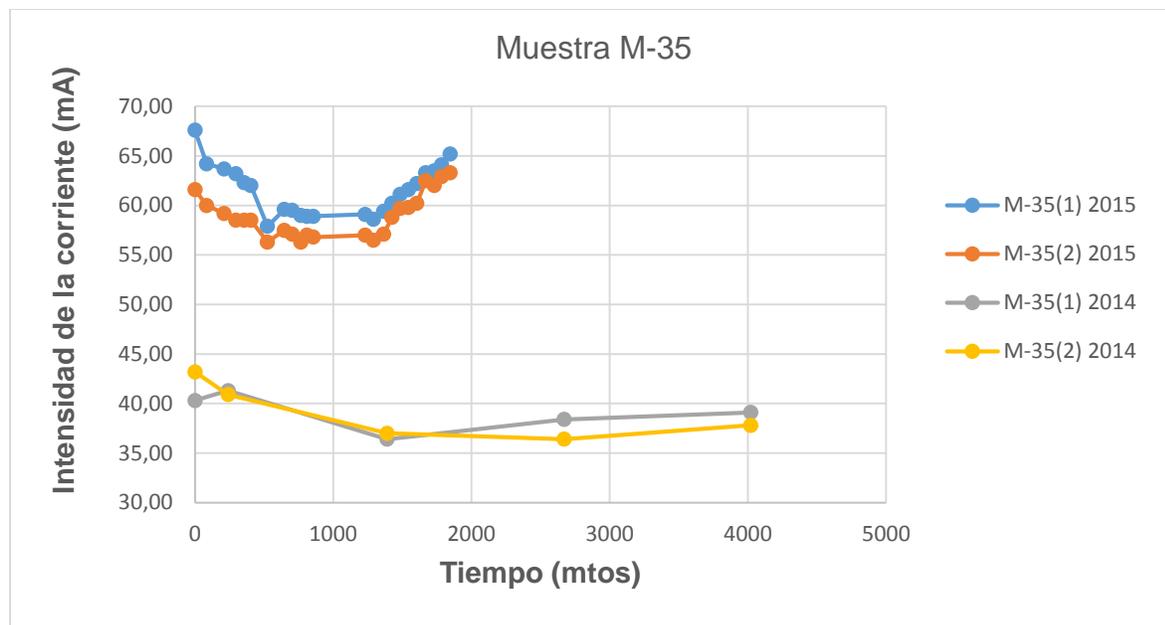


Figura 3.6 Resultado de migración de cloruros de 2014 y 2015 con muestras (M-35) de la misma mezcla.

Se puede observar que aunque las muestras sean de la misma mezcla, la ensayada en 2014 presenta una menor permeabilidad puesto que los valores de intensidad de la corriente medidos son menores que la muestra de 2015. Además también es apreciable que el tiempo que toman los cloruros presentes en la solución en atravesar completamente la muestra, tiempo que se encuentra donde el valor de la intensidad de la corriente es mínimo, es mayor en la muestra ensayada en 2014 lo que arroja que esta muestra es superior a la de 2015 en ambos aspectos, lo que no debería pasar debido a que como se planteaba anteriormente los dos especímenes pertenecen a la misma mezcla. Este fenómeno tiene lugar debido a que las muestras de 2014 no fueron sometidas al régimen de saturación que plantea el protocolo STADIUM el cual especifica que los especímenes deben estar no menos de diez días dentro de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) con una concentración de 0,3 Moles, luego tres días antes de hacer el ensayo se sacaron de la solución y se colocaron al vacío durante los ya mencionado tres días y las muestras de 2014 solo fueron sometidas a solo cinco días de saturación dentro de la misma solución. Un inconveniente en esta comparación es que las gráficas son el resultado de plotear los resultados experimentales y no el resultado del ajuste del modelo mediante STADIUM-Lab.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.7.3 Cantidad de iones cloruro en la muestra. Método de Volhard

| Muestra | Cloruros totales (%) | | Cloruros solubles (%) | |
|---------|----------------------|------|-----------------------|------|
| | 4 mm | 8 mm | 4 mm | 8 mm |
| M-381 | 0,10 | 0,06 | 0.03 | 0.01 |
| M-25 | 0,06 | 0,05 | 0.03 | 0.01 |
| M-30 | 0,16 | 0,10 | 0.08 | 0.05 |
| M-32 | 0,35 | 0,30 | 0.11 | 0.10 |
| M-35 | 0,36 | 0,16 | 0.16 | 0.13 |

Tabla 3.13 Cantidad de cloruro totales y solubles en muestras de hormigón endurecido

3.7.3.1 Análisis de la cantidad de iones cloruro en la muestra. Método de Volhard

La figura 3.7 presenta la cantidad de cloruros solubles a una profundidad de 8 mm presentes en cada una de las muestra en cuestión, que fueron ensayadas mediante el método de Volhard, para ver valores por capas de 4mm consultar (Anexo 1). Se refiere únicamente a los cloruros solubles porque son estos precisamente los que causan problemas a las armaduras de acero de refuerzo. Es apreciable que una vez más los mejores resultados están representados por las mezclas producidas con cemento LC³ al punto de que el mayor resultado obtenido de un hormigón con estas características (M-30) es tan solo la mitad del hormigón (M-32) donde se utilizó cemento portland. En las demás muestra con presencia de cemento LC³, se puede observar que contienen aproximadamente apenas la décima parte de cloruros solubles que presentan las muestras hechas a base de cemento portland.

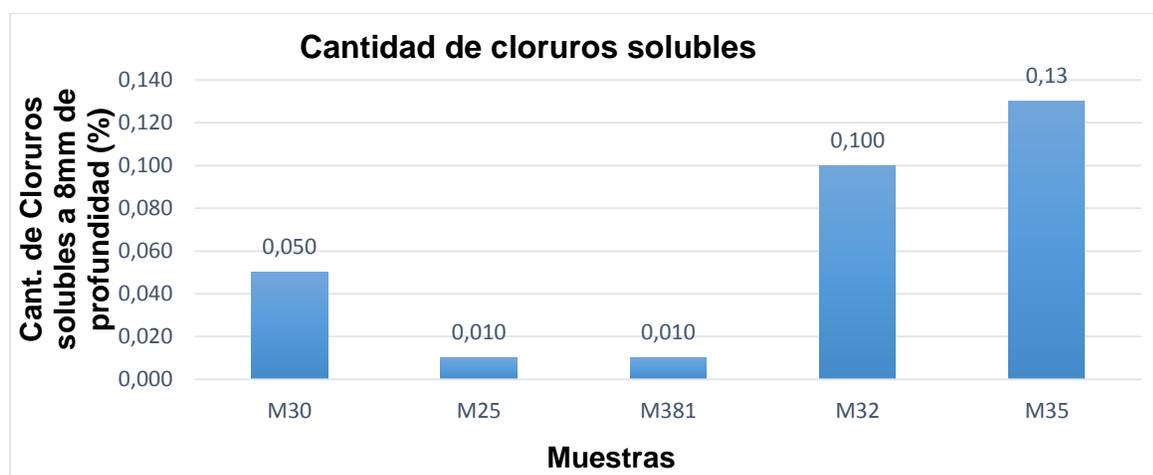


Figura 3.7 Cantidad de cloruros solubles a 8 mm de profundidad en la muestra.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

A continuación en las figuras 3.6 y 3.7 se hacen alusión a los resultados obtenidos mediante el mismo ensayo citado anteriormente pero esta vez se representaron a través de perfiles de cloruros tanto totales como solubles. Aquí se puede ver de forma más clara la superioridad que arrojan los resultados, situando a los hormigones producidos con cemento LC³ por encima de los hechos con cemento Pórtland.

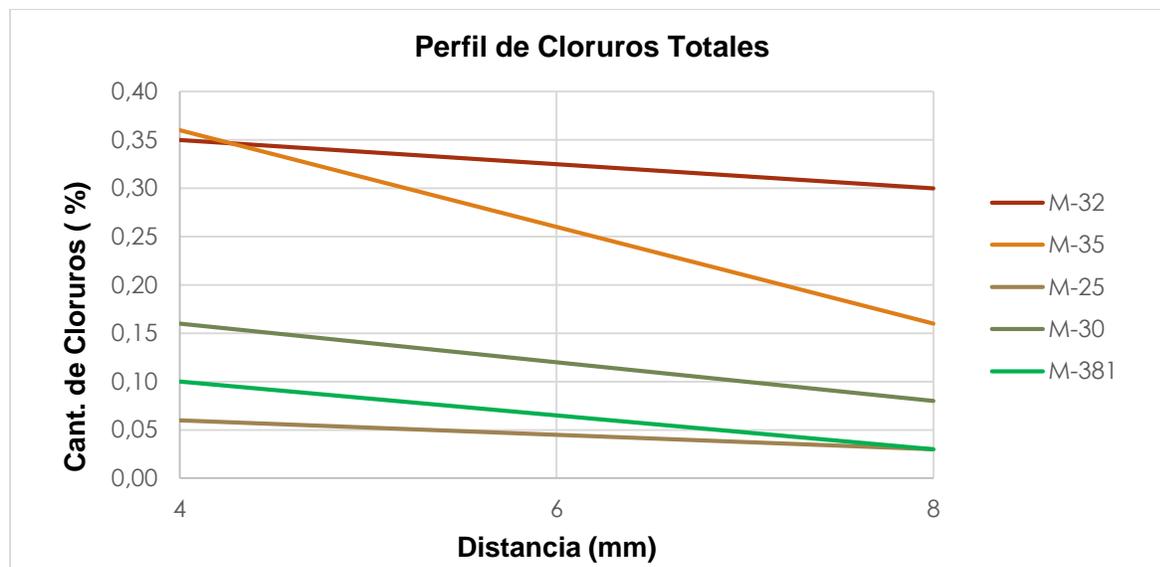


Figura 3.8 Perfil de cloruros totales hasta una distancia de 8 mm de profundidad en la muestra.

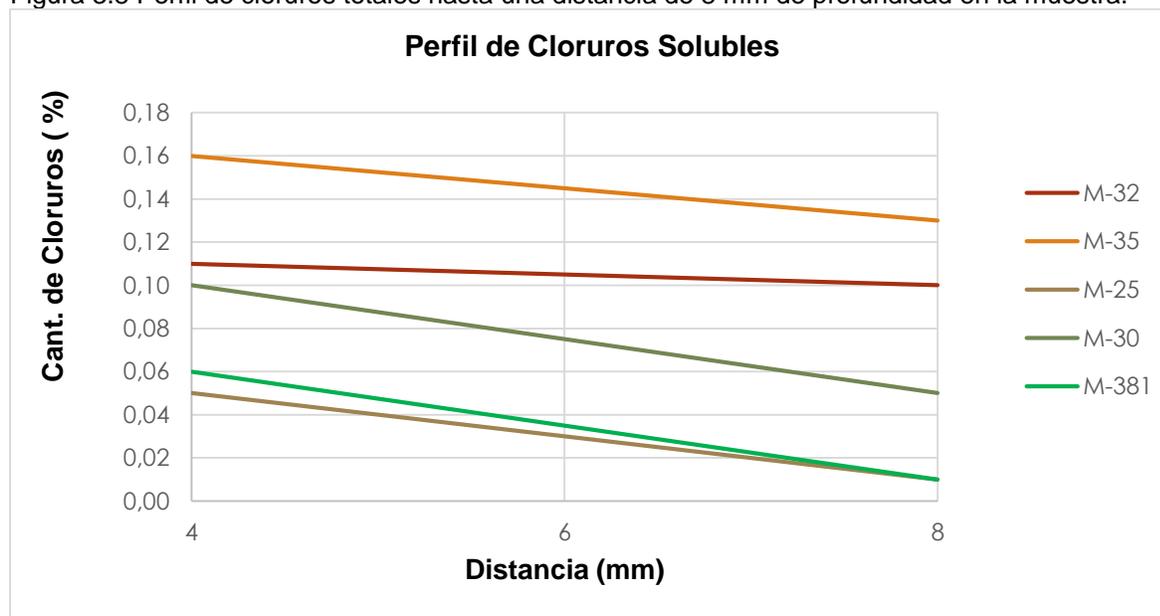


Figura 3.9 Perfil de cloruros solubles hasta una distancia de 8 mm de profundidad en la muestra.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

En la figura que se muestra a continuación se puede observar claramente la relación que existe entre la permeabilidad al aire que puede presentar una estructura y la cantidad de iones cloruros en este caso solubles que puedan ingresar en dicha estructura. La muestra M-381 es la que presenta menor permeabilidad y es por tanto en la que menor cantidad de cloruros penetra.

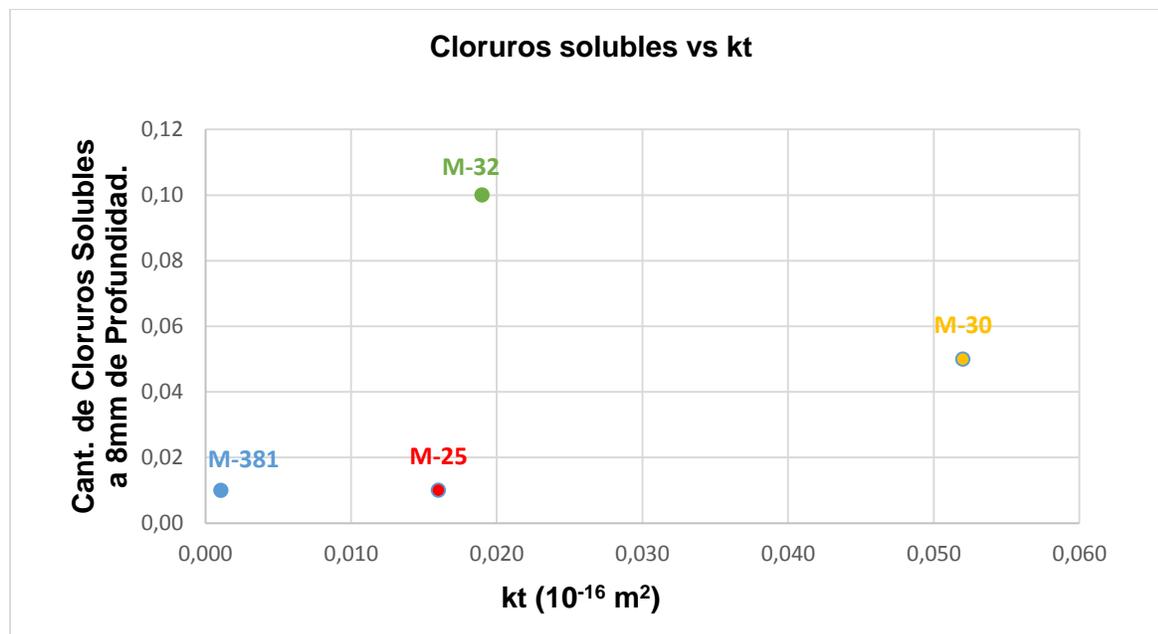


Figura 3.10 Correlación entre cantidad de cloruros solubles y permeabilidad al aire.

3.7.4 Carbonatación

A continuación se muestran los resultados de la prueba de permeabilidad al aire realizada a los elementos colocados en sitio de exposición (tabla 3.14)

| EPIVC | | | Carbonat(mm) |
|----------------|--------------------------|-----------------------|--------------|
| Identificación | Corresponden a elementos | | |
| 1 | M381 | Prefabricados con LCC | |
| 2 | M25 | cimientos con LCC | |
| 3 | M30 | cimientos con LCC | |
| 4 | M32 | cimientos con P35 | |
| 5 | M35 | cimientos con P35 | |

Tabla 3.14 Cantidad de cloruro totales y solubles en muestras de hormigón endurecido

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.7.4.1 Análisis de los resultados de carbonatación

En la figura 3.11 se muestran los resultados de la carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento LC³ y Pórtland en la EPI, Remedios.

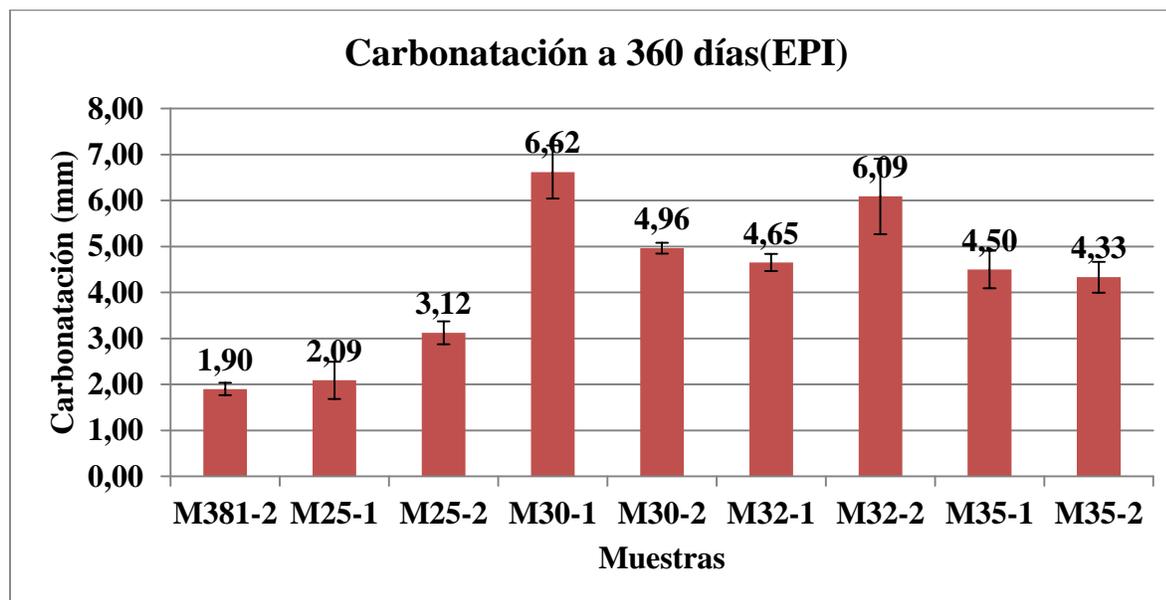


Fig. 3.11 Carbonatación de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días.

Se puede concluir que 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 muestra resultados semejantes debido a que la misma está diseñada para una resistencia más baja (20 MPa), pero aun así los especímenes elaborados con LC³ son más resistentes en el tiempo a la carbonatación que los elaborados con Pórtland.

3.8 Resultados de los ensayos realizados en el Centro de Investigación y Desarrollo de la Construcción (CIDC).

3.8.1 Resistencia a la compresión

| Muestra | Resist Especificada | Cemento kg/m ³ | a/c | Asent(cm) | Fecha | Resistencia (MPa) | | | |
|---------|---------------------|---------------------------|------|-----------|------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | | | | | 3 | 7 | 28 | 360 |
| SGR | 30 MPa | 404 | 0,42 | 17,5 | 14/03/2014 | 19,59 | 31,16 | 33,15 | 36,20 |
| SGP | 30 MPa | 404 | 0,42 | 17,4 | 17/03/2014 | 11,4 | 23,22 | 25,37 | 29,05 |
| P | 30 MPa | 417 | 0,42 | 17,8 | 14/03/2014 | 28,01 | 36,47 | 40,96 | 46,70 |

Tabla 3.15 Resistencia a la compresión (CIDC).

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.8.1.1 Análisis de la resistencia a compresión

En la figura 3.12 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 Pórtland.

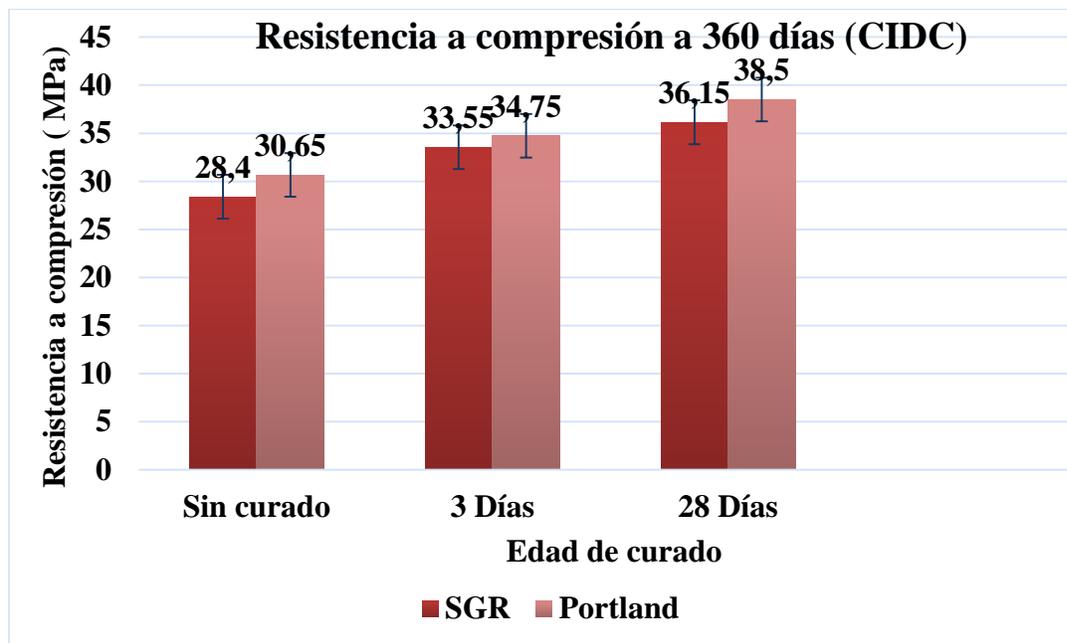


Fig. 3.12 Resistencia de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

Como se aprecia a medida que se curaron las probetas, fue aumentando la resistencia de dichos especímenes, debido a que se hidrata mejor el cemento y se hace más impermeable, siendo siempre mayor la de las probetas elaboradas con cemento Pórtland que las del LC³ aunque la diferencia puede ser debido a que este era un cemento envejecido, mientras que el Pórtland era cemento fresco de la fábrica de Cienfuegos.

3.8.2 Permeabilidad al aire

| CIDC | Identificación | Permeabilidad al aire | |
|------|----------------|-----------------------|----------|
| | | 28 días | 360 días |
| 1 | SGR | - | 0,360 |
| 2 | SGP | - | 3,07 |
| 3 | P | - | 0,57 |

Tabla 3.16 Permeabilidad al aire (CIDC).

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.8.2.1 Análisis de la permeabilidad al aire

En la figura 3.13 que se muestra a continuación, se puede estimar el comportamiento del coeficiente de permeabilidad al aire en los especímenes de cemento Pórtland y LC³ analizados para edades de curado de 0, 3 y 28 días. Cada valor corresponde a la media de 5 probetas ensayadas.

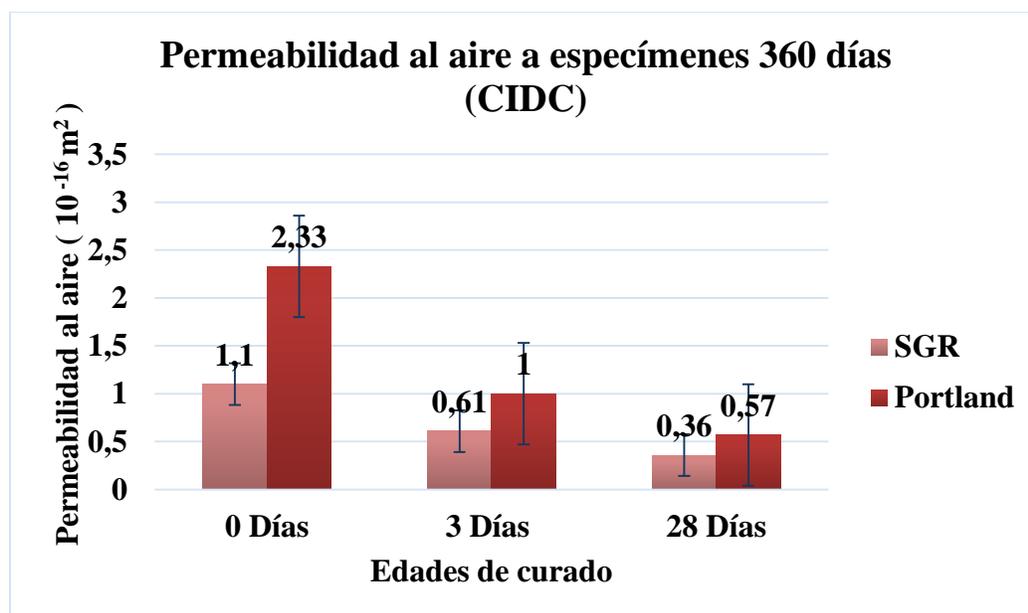


Fig. 3.13 Permeabilidad al aire de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

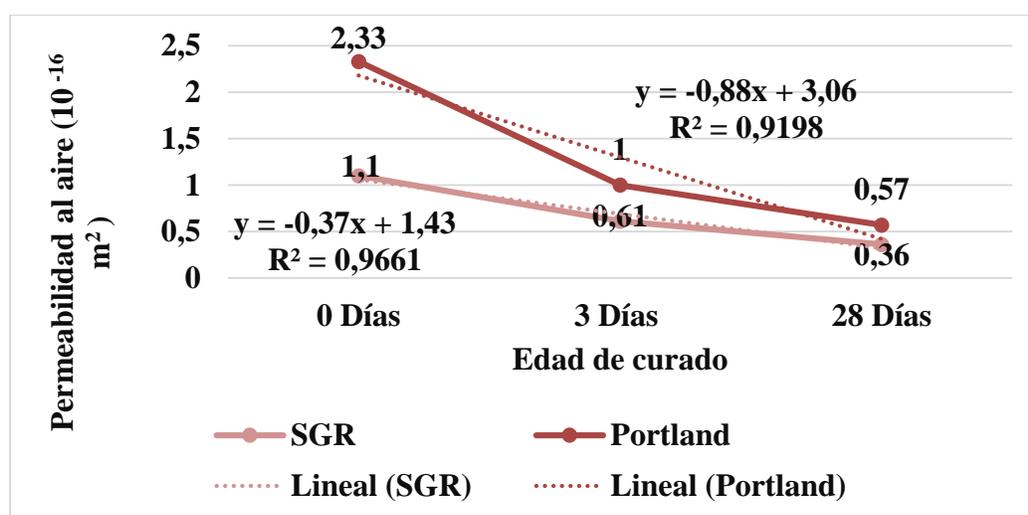


Fig. 3.14 Permeabilidad al aire de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

Al observar los gráficos se muestra que los valores de SGR (LC^3) siempre son menores que los del Pórtland debido a que este hormigón fue elaborado con un cemento mucho más fino que el Pórtland. El cemento envejecido (LC^3) 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 Pórtland.

3.8.3 Carbonatación

| CIDC | Identificación | Carbonatación(mm) |
|------|----------------|-------------------|
| 1 | SGR | 1,55 |
| 2 | SGP | 7,50 |
| 3 | P | no |

Tabla 3.16 Carbonatación (CIDC).

3.8.3.1 Análisis de los resultados de carbonatación

En la figura 3.15 se muestran los resultados de la carbonatación de los distintos especímenes elaborados con cemento LC^3 para edades de curado de 0, 3 y 28 días. Cada valor corresponde a la media de 3 probetas ensayadas.

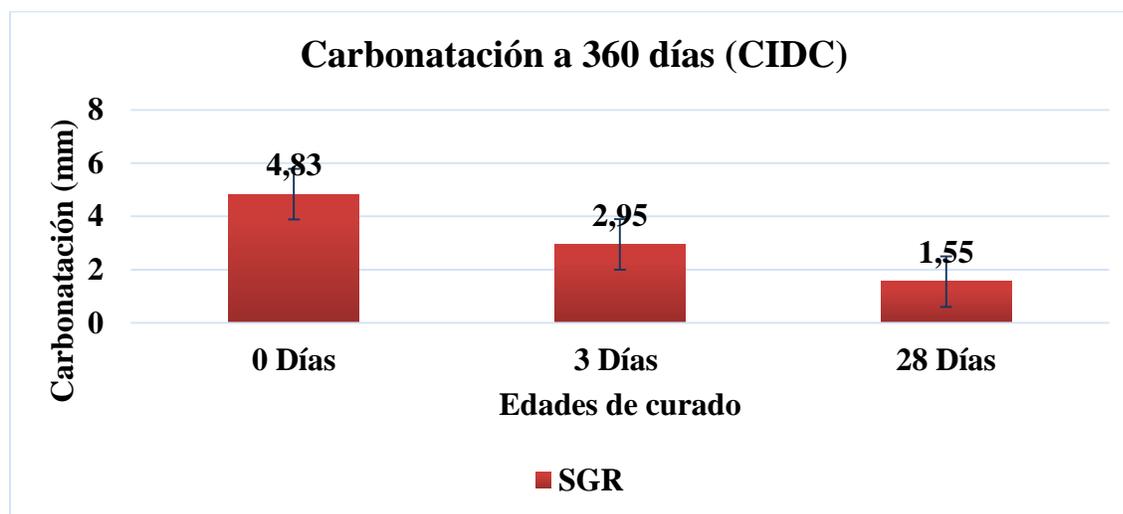


Fig. 3.15 Carbonatación de especímenes cilíndricos de hormigón ensayado a 360 días y sometido a diferentes regímenes de curado.

En la gráfica 3.15 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

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

cemento, puesto que se impermeabilizan los poros capilares y los conductos se hacen más cortos.

3.8.4 Permeabilidad al aire contra carbonatación

En la figura 3.16 se exponen los resultados de la permeabilidad al aire contra carbonatación de los distintos especímenes elaborados con Cemento de Bajo Carbono (LC³), comprobados para edades de curado de 0, 3 y 28 días.

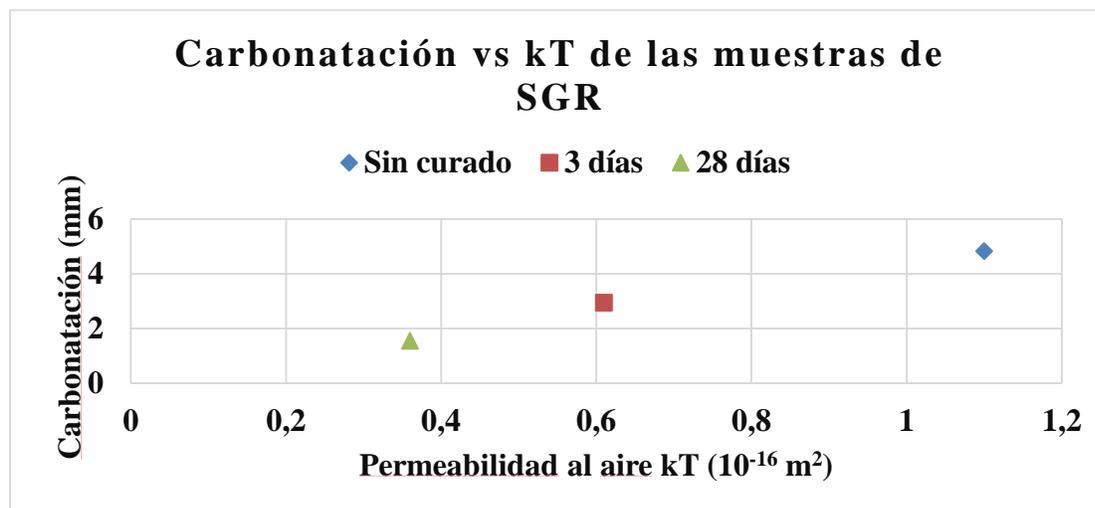


Fig. 3.16 Permeabilidad al aire vs Carbonatación a 360 días, sometido a diferentes regímenes de curado para especímenes elaborados con LC³.

Como se muestra en la figura 3.16 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.

3.8.5 Permeabilidad al aire contra resistencia a compresión

En la figura 3.17 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

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 puede apreciar en la figura 3.17, y a medida que tiene un mejor curado se obtiene resultados mayores en cuanto a resistencia.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

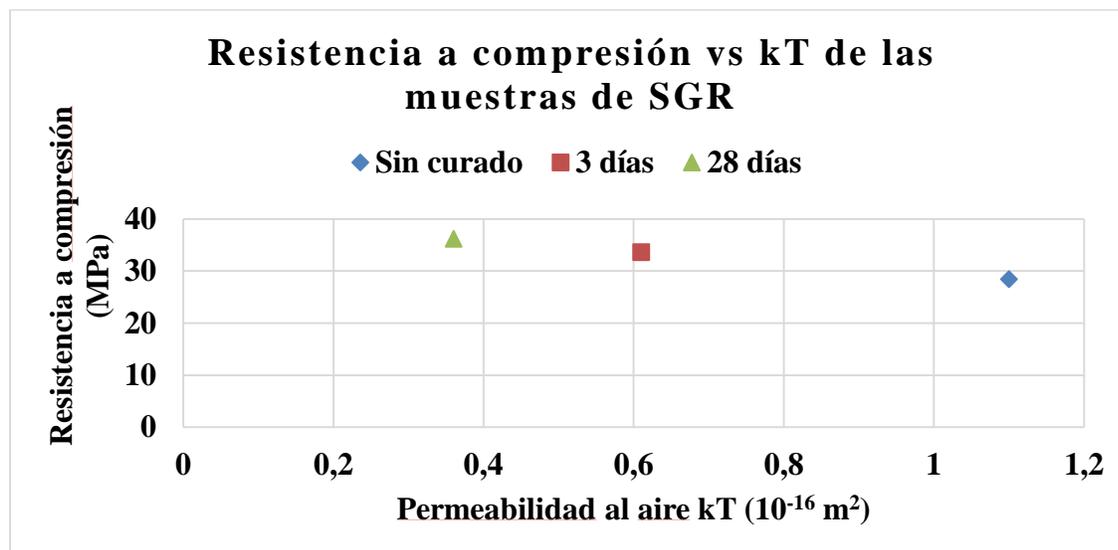


Fig. 3.17 Permeabilidad al aire vs Resistencia a compresión a 360 días, sometido a diferentes regímenes de curado para especímenes elaborados con LC³.

3.9 Resultados segunda prueba industrial

3.9.1 Dosificaciones de los hormigones

| | LC ³ -50 2:1 | LC ³ -50 1:1 | LC ³ -35 2:1 | LC ³ -35 1:1 | P 35 |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|
| Granito | 1014 | 1014 | 1014 | 1014 | 1014 |
| Arena | 779 | 779 | 779 | 779 | 779 |
| Cemento | 357 | 357 | 358 | 360 | 370 |
| Agua | 161 | 161 | 161 | 162 | 167 |
| Aditivo | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 8.9 | 4.7 |
| a/c | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 |

Tabla 3.17 Dosificaciones obtenidas con áridos de El Purio (kg/m³)

| | LC ³ -50 2:1 | LC ³ -50 1:1 | LC ³ -35 2:1 | LC ³ -35 1:1 | P 35 |
|----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------|
| Granito | 1004 | 1004 | 1004 | 1004 | 1004 |
| Arena | 775 | 775 | 775 | 775 | 775 |
| Cemento | 404 | 404 | 404 | 404 | 417 |
| Agua | 170 | 170 | 170 | 170 | 175 |
| Aditivo | 10.1 | 10.1 | 10.1 | 10.1 | 5.34 |
| a/c | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.42 | 0.42 |

Tabla 3.18 Dosificaciones obtenidas con áridos de La Victoria (kg/m³)

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

3.9.2 Resistencia a compresión ECOT

Los ensayos de resistencia en la ECOT solamente se realizaron a 7 y 28 días de edad. En el caso de las series LC³-50 1:1 y LC³-35 1:1 no se registraron los valores obtenidos a 7 días.

| Serie | a/c | Cemento (kg) | Resistencia (MPa) | |
|-------------------------|------|--------------|-------------------|------|
| | | | 7d | 28d |
| LC ³ -50 2:1 | 0.45 | 357 | 11.3 | 23.5 |
| LC ³ -50 1:1 | 0.45 | 357 | | 23.5 |
| LC ³ -35 2:1 | 0.45 | 358 | 11.1 | 19.9 |
| LC ³ -35 1:1 | 0.45 | 360 | | 18.2 |
| P 35 | 0.45 | 370 | 11.4 | 19.1 |

Tabla 3.19 Resistencia a compresión en la ECOT

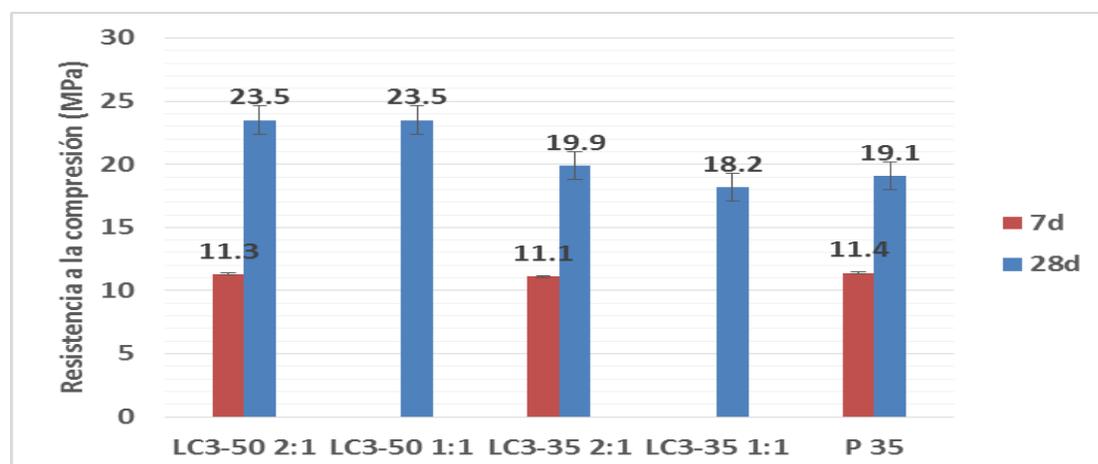


Fig. 3.17 Resistencia a compresión de los hormigones en estado endurecido.

Se puede observar claramente que en todos los casos se obtuvieron resistencias inferiores a los 25 MPa. Como la resistencia esperada era de 30 MPa se puede afirmar que los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en la ECOT son inconformes.

Debido a los malos resultados obtenidos durante el trabajo realizado en la ECOT, el equipo de investigación del CIDEM consideró que los resultados correspondientes a esta empresa no serán tomados en cuenta a la hora de tomar decisiones.

3.9.3 Resistencia a compresión CIDC

Los ensayos de resistencia en el CIDC se realizaron a los 2, 7 y 28 días de edad.

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

| Serie | a/c | Cemento (kg) | Resistencia (MPa) | | |
|-------------------------|------|--------------|-------------------|------|-------------------------|
| | | | 2d | 7d | 28d |
| LC ³ -50 2:1 | 0.42 | 404 | 7.8 | 20.4 | En espera de resultados |
| LC ³ -50 1:1 | 0.42 | 404 | 5.3 | 14.6 | |
| LC ³ -35 2:1 | 0.42 | 404 | 8.6 | 24 | |
| LC ³ -35 1:1 | 0.42 | 404 | 8.4 | 26.2 | |
| P 35 | 0.42 | 417 | 9.3 | 23.6 | |

Tabla 3.18 Resistencia a compresión en el CIDC

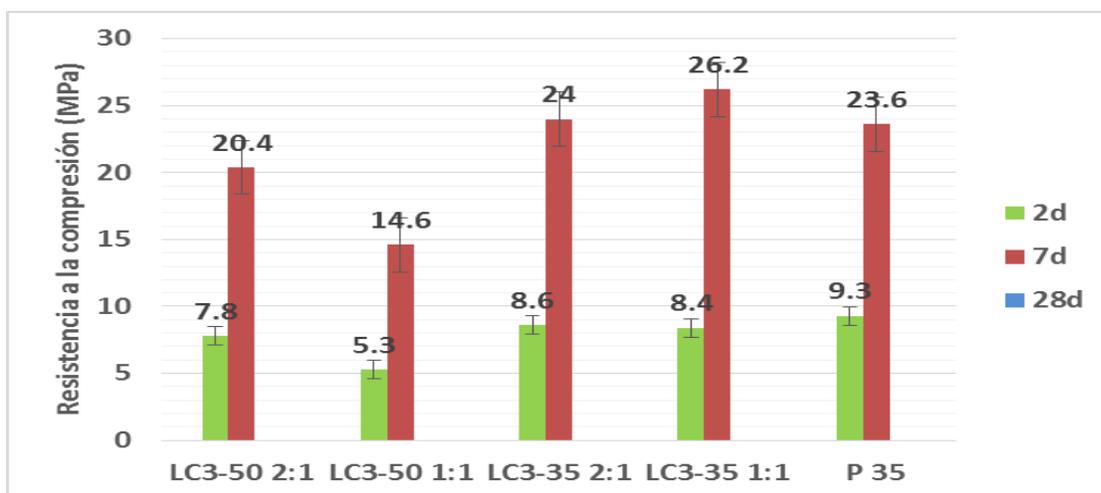


Fig. 3.18 Resistencia a compresión de los hormigones en estado endurecido.

3.10 Conclusiones parciales del capítulo

1. La obtención de esta base de datos acelera el proceso de inclusión del Cemento de Bajo Carbono en la normativa cubana. Partiendo de un análisis riguroso de la durabilidad de los elementos de hormigón expuestos en los diferentes sitios de exposición, basados en la “NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones”.
2. El análisis estadístico de la data es un requisito indispensable para demostrar que los hormigones realizados con Cemento de Bajo Carbono cumplen con todos los requerimientos que resume la norma “NC 120:2014.
3. La base de datos que se presenta en este capítulo resume una gran cantidad de información sobre el comportamiento durable del hormigón elaborado con cemento

Capítulo III: Creación de una base de datos de resultados experimentales que permitan demostrar la aptitud de los cementos de bajo carbono para lograr los parámetros de desempeño establecidos en la NC 120:2014. Hormigón hidráulico. Especificaciones.

LC³, resultados que pueden demostrar la actitud del cemento de bajo carbono para ser considerado en la normativa cubana.

Conclusiones generales

1. El hecho de que el Cemento de Bajo Carbono elaborado a base de clínquer-yeso-caliza-arcilla calcinada no esté incluido en la normativa cubana, limita su producción industrial en Cuba por la carencia de un documento legal que lo avale.
2. La base normativa de Cuba presenta un elevado nivel de armonización internacional que incluye más del 50 por ciento de las normas creadas en el país. Esto demuestra el nivel de desarrollo logrado en el país a partir del trabajo de los Comités Técnicos de Normalización.
3. La NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones, constituye una valiosa herramienta para el análisis del comportamiento de los hormigones elaborados con Cemento de Bajo Carbono, permitiendo valorar el cumplimiento de los parámetros de desempeño recogidos en dicho documento de una manera efectiva.
4. La utilización de los sitios de exposición, brinda la posibilidad de someter a las muestras de hormigones elaborados con diferentes diseños de mezcla a condiciones reales de agresividad, lo cual constituye una valoración más confiable del desempeño de los hormigones en distintos ambientes agresivos.
5. El análisis estadístico de la data es un requisito indispensable para demostrar que los hormigones realizados con Cemento de Bajo Carbono cumplen con todos los requerimientos que resume la norma "NC 120:2014.

Recomendaciones

Seguir ampliando la base de datos en los próximos 5 años para obtener una recopilación de datos que permita una eficiente evaluación del comportamiento durable de los elementos elaborados con hormigones de Cemento de Bajo Carbono en el tiempo.

Llevar la base de datos a un software que permita al usuario interactuar con la misma, o sea poder introducir nuevos datos y actualizar resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- Abo-El-Enein, S. A., R. Abbas, et al. (2009). "Properties and durability of metakaolin blended cements." *Materiales de la Construcción* 60: 15.
- ABASCAL, J. 2012. Las novedades de la norma europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2011. *Guías técnicas*, 53, 8.
- ALUJAS, A. 2010. *OBTENCIÓN DE UN MATERIAL PUZOLÁNICO DE ALTA REACTIVIDAD A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN TÉRMICA DE UNA FRACCIÓN ARCILLOSA MULTICOMPONENTE*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ANDRÉS, L. M. V. 2014. *CEMENTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER-ARCILLA CALCINADA-CALIZA*. Tesis de Doctorado, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- ANTONI M , M. F. 2013. Investigation of cement substitution by combined addition of calcined clays and limestone.
- ASTM, I. 1997. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration¹. United States of America.
- ASTM, I. 2003. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- BECKER, E. 2000. *CEMENTO PÓRTLAND PUZOLÁNICO .CARACTERÍSTICAS Y RECOMENDACIONES DE USO*. Buenos Aires, Argentina: LOMA NEGRA C.I.A.S.A.
- BETANCOURT, S. 1997. *Estudio teórico experimental de las propiedades de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña*. Tesis presentada en opción al grado de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- BETANCOURT, S. Conferencia No. 12. Asignatura Materiales y Productos de la Construcción, 1999.
- CALLEJA, J. 2002. Apuntes históricos del desarrollo de la normalización del cemento en la Unión Europea *Materiales de la Construcción*, 52, 4.
- CAÑÓN, A. L. 2008. *LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN COLOMBIA. DETERMINANTES Y COMPORTAMIENTO DE LA DEMANDA (1996-2005)*. Pontificia Universidad Javeriana.
- CARVALHO, J. O. 2011. *La Sostenibilidad en la Industria del Cemento en Brasil*. Brazilia, Brasil.
- CASTILLO, R. 2010. *Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica de una arcilla caolinítica de baja pureza*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- CEMBUREAU 2013. *The Cement Sector: a Strategic Contributor to Europe's Future*.
- CEPEC. 2013. *Normalización, Metrología y Calidad* [Online]. La Habana. Cuba. [Accessed www.cepec.cu].
- COOK, D. J. 1986. *Concrete Technology and Design: Cement Replacement Materials*, London.

BIBLIOGRAFÍA

- COTERA, M. G. D. L. 1998. PROYECTO NORMA ASTM, PERFORMANCE PARA CEMENTOS PORTLAND Lima, Perú: Asocem.
- DI-SEBASTIANO 2009. "La carrera por el cemento: La industria cementera Argentina, conformación y proyección internacional. Buenos Aires, Argentina: Facultad de Filosofía y Letras, UBA.
- DOPICO, J. J. 2008. Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Ingeniería de Construcción*, 23, 8.
- EDIFICACIÓN, O. N. D. N. Y. C. D. L. C. Y. 2009. "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN - CEMENTOS HIDRÁULICOS - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA". *Materiales de la Construcción*, 30.
- ESCALONA, C. R. 2011. *Evaluación de los parámetros químicos – físicos del sistema (Clínker- Metacaolín - Carbonato de Calcio-Yeso) a edades tempranas* Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- KUMARAN, G. B. 2008. Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India. *Portes*, 2, 39.
- LASCARRO, M. A. 2014. Esfuerzos por mejorar la integración latinoamericana a la estandarización en el sector de la construcción. *ASTM Standardization News*
- LIANG L.H, M. V. M. 2000. "Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of fly ash", *Cement & Concrete Research*.
- LÓPEZ, J. 2014. *NORMA ASTM – ENSAYO DE TRACCIÓN*. Universidad Nacional del Santa.
- MARTIRENA, J. F. 2009. *Una alternativa ambientalmente compatible para disminuir el consumo de aglomerante de clínker de cemento Pórtland: el aglomerante cal-puzolana como adición mineral activa*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- MEHTA & MONTEIRO 2006. Strength. 33.
- NAVIAS, J. E. 2014. *Diseño y producción industrial de elementos con cemento de bajo carbono producido en prueba industrial*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- RIVERA, Y. O. 2014. Especial para la Mesa Redonda. Habana, Cuba.
- ROJAS, M. I. S. D. 1998. Normas europeas de cementos *Materiales de la Construcción*, 43, 12.
- SÁNCHEZ, A. C. 2014. *Fundamentación de los parámetros técnicos a considerar en la "Propuesta de norma cubana de especificaciones para el cemento de bajo carbono fabricado a base de clínker-yeso-caliza-arcilla calcinada"*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- SANJUÁN, M. A. & ARGIZ, C. 2012. La nueva norma europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2011. *Materiales de Construcción*, 62, 6.
- SIA, S. S. 2003. A step towards performance-based specifications for durability. Suiza.
- STANDARDIZATION, E. C. F. 2000. Specifications for mortar for masonry. *Rendering and plastering mortar*.
- STANDARDS, C. N. B. O. 2001. CEMENTO PORTLAND. ESPECIFICACIONES. Cuba.
- STANDARDS, C. N. B. O. 2005. Reglas para la estructura, redacción y edición de las normas cubanas y otros documentos normativos relacionados. Cuba.
- SURVEY, B. G. 2005. Cement Row Materials.

BIBLIOGRAFÍA

TAFUNELL, X. 2006. EN LOS ORÍGENES DE LA ISI: LA INDUSTRIA DEL CEMENTO EN LATINOAMÉRICA, 1900-1930. Universitat Pompeu Fabra.

ANEXOS

Anexo1 Resultados de la caracterización Física-Química a nueve muestras de Testigo de Hormigón

Muestra: M-32

| Ensayos | UM | Muestras | |
|-------------------------------------------------|----|------------|------------|
| | | Capa 1 y 2 | Capa 3 y 4 |
| Determinación del contenido de Cloruros Totales | % | 0.35 | 0.30 |
| Determinación de Cloruros Solubles | % | 0.11 | 0.10 |

Muestra: M-35

| Ensayos | UM | Muestras | |
|-------------------------------------------------|----|------------|------------|
| | | Capa 1 y 2 | Capa 3 y 4 |
| Determinación del contenido de Cloruros Totales | % | 0.36 | 0.16 |
| Determinación de Cloruros Solubles | % | 0.16 | 0.13 |

Muestra: M-25

| Ensayos | UM | Muestras | |
|-------------------------------------------------|----|------------|------------|
| | | Capa 1 y 2 | Capa 3 y 4 |
| Determinación del contenido de Cloruros Totales | % | 0.06 | 0.05 |
| Determinación de Cloruros Solubles | % | 0.03 | 0.01 |

Muestra: M-30

| Ensayos | UM | Muestras | |
|-------------------------------------------------|----|------------|------------|
| | | Capa 1 y 2 | Capa 3 y 4 |
| Determinación del contenido de Cloruros Totales | % | 0.16 | 0.10 |
| Determinación de Cloruros Solubles | % | 0.08 | 0.05 |

Muestra: M-381

| Ensayos | UM | Muestras | |
|-------------------------------------------------|----|------------|------------|
| | | Capa 1 y 2 | Capa 3 y 4 |
| Determinación del contenido de Cloruros Totales | % | 0.10 | 0.06 |
| Determinación de Cloruros Solubles | % | 0.03 | 0.01 |