

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título del trabajo: Evaluación de la producción de hormigones utilizando la adición mineral puzolánica arcilla calcinada-caliza-yeso.

Autores del trabajo: Ismael Alonso Ramos

Tutores del trabajo: Ing. Dairon Abreu Cerdá
Dr. Ing. Yosvany Díaz Cárdenas

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Evaluation of concrete production using the pozzolanic mineral addition calcined clay-lime-gypsum (LC2).

Author: Ismael Alonso Ramos

Thesis Director: Ing. Dairon Abreu Cerdá

Dr. Ing. Yosvany Díaz Cárdenas

Santa Clara, June, 2019
Copyright©UCLV

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

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

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

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Dedicatoria

-a mis padres por haber sido la bujía impulsora en todo este tiempo y ser la razón de lo que soy hoy.

-a mis hermanos por haberme apoyado en los momentos difíciles.

-a todos los amigos que estuvieron a mi lado en los momentos buenos y malos.

-a todas las personas que pasaron por mi vida en estos 6 años y que de una forma u otra contribuyeron con su granito de arena a que me convirtiera cada día en una mejor persona.

-a mis profesores por haberme formado profesionalmente.

“Gracias a todos”

Resumen

EL siguiente trabajo diploma realiza un estudio de diferentes pruebas sobre hormigones producidos con LC2 realizadas en diferentes lugares de Cuba: ECM Mariel, ECOT Cayo Santa María y EPP Remedios, donde se evaluaron diferentes dosificaciones con sustituciones de LC2 que varían entre el 15 y el 45%, los áridos, cementos y aditivos son de distintas procedencias, lo cual provocó que los resultados fuesen diferentes y que fuera imposible realizar una comparativa entre los mismos.

Esta investigación se centra en evaluar las propiedades de dichos hormigones en estado fresco y endurecido, como el asentamiento por el cono de Abrams y mesa vibratoria, y la resistencia a compresión del hormigón a diferentes edades. Por medio de este trabajo se pretende probar que las arcillas calcinadas son una solución factible para producir hormigones que garanticen propiedades adecuadas para su uso. También porque dicha adición representa económicamente hablando un ahorro sustancial de cemento portland algo vital para los países en vías de desarrollo.

Abstract

The following diploma work carries out a study of different tests on concretes produced with LC2 carried out in different places of Cuba: ECM Mariel, ECOT Cayo Santa María and EPP Remedios, where different dosages were evaluated with substitutions of LC2 that vary between 15 and 45%, the aggregates, cements and additives are of different origins, which caused that the results were different and that it was impossible to make a comparison between them.

This research focuses on evaluating the properties of these concretes in a fresh and hardened state, such as the settlement by the Abrams cone and vibrating table, and the compressive strength of the concrete at different ages. The aim of this work is to prove that calcined clays are a feasible solution to produce concretes that guarantee adequate properties for their use. Also because this addition represents economically speaking a substantial saving of portland cement, which is vital for developing countries.

Índice:

Pensamiento	I
Dedicatoria.....	I
Resumen.....	I
Abstract.....	I
Índice:.....	I
Introducción.....	- 1 -
Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.	- 8 -
1. Problemas con la producción de hormigón en general.....	- 8 -
1.1 Construcción prefabricada e in situ	- 10 -
1.1.1 Ventajas	- 10 -
1.1.2 Desventajas	- 11 -
1.2 Cemento	- 12 -
1.2.1 Componentes del cemento	- 13 -
1.2.1.1 Clínker.....	- 13 -
1.2.1.2 Reguladores de fraguado.....	- 13 -
1.2.1.2.1 Sulfato de Calcio (yeso)	- 13 -
1.2.1.3 Adiciones.....	- 14 -
1.3 Agua.....	- 15 -
1.3.1 Agua de amasado	- 15 -
1.3.2 Agua de curado.....	- 16 -
1.4 Áridos.....	- 16 -
1.4.1 Árido fino.....	- 17 -
1.4.2 Árido grueso.....	- 18 -
1.5 Aditivos	- 18 -

1.5.1 Clasificación de los aditivos	- 19 -
1.5.1.1 Aceleradores	- 19 -
1.5.1.2 Retardadores	- 20 -
1.5.1.3 Plastificantes	- 21 -
1.5.1.4 Fluidificantes	- 22 -
1.5.1.5 Superplastificantes o superfluidificantes	- 23 -
1.5.1.6 Aireantes	- 24 -
1.6 Adiciones	- 24 -
1.6.1 Cenizas volantes	- 24 -
1.6.2 Humo de Sílice	- 25 -
1.6.3 Escorias de alto horno	- 26 -
1.7 Métodos de dosificaciones	- 27 -
1.7.1 Método de Bolomey	- 27 -
1.7.2 Método del American Concrete Institute (A.C.I).	- 27 -
1.7.3 Método de O'Reilly	- 28 -
1.8 Cemento de bajo carbono LC3.	- 29 -
Conclusiones parciales.	- 33 -
Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.....	- 34 -
Introducción	- 34 -
2 Caracterización de las materias primas	- 34 -
2.1 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en la ECOT Cayo Santa María.	- 34 -
2.1.1 Áridos	- 34 -
2.1.2 Cemento	- 41 -
2.1.3 Aditivos	- 41 -
2.1.4 Agua.....	- 42 -

2.2 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en la ECM Mariel.	- 43 -
2.2.1 Áridos.....	- 43 -
2.2.2 Aditivos	- 45 -
2.2.3 Agua.....	- 46 -
2.3 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en EPP Remedios.....	- 46 -
2.3.1 Áridos.....	- 46 -
2.3.2 Cemento	- 51 -
2.3.3 Aditivos	- 51 -
2.3.4 Agua.....	- 52 -
2.4 Diseño de mezclas.....	- 53 -
2.4.1 ECOT Cayo Santa María	- 53 -
2.4.2 ECM Mariel	- 54 -
2.4.3 EPP Remedios.....	- 55 -
2.5 Diseño Experimental.....	- 57 -
2.6 Conclusiones parciales	- 57 -
Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.....	- 60 -
Introducción.....	- 60 -
3.1 Ensayos realizados al hormigón fresco.....	- 60 -
3.1.1 Asentamientos en la ECOT Cayo Santa María	- 60 -
3.1.2 Asentamientos en el Mariel.....	- 61 -
3.1.3 Asentamientos en Remedios.....	- 62 -
3.2 Ensayos realizados al hormigón endurecido.....	- 65 -
3.2.1 Resistencia obtenida en la ECOT Cayo Santa María.....	- 65 -
3.2.2 Resistencia obtenida en el Mariel.....	- 66 -
3.2.3 Resistencia obtenida en Remedios.....	- 67 -

Conclusiones parciales	- 69 -
Conclusiones Generales	- 70 -
Recomendaciones	- 71 -
Referencias bibliográficas	- 72 -
Anexos	¡Error! Marcador no definido.

Introducción

El crecimiento marcado de la población mundial en los últimos años ha generado consigo un incremento de la construcción tanto de viviendas como de inmuebles para la generación de empleos. El hormigón juega un papel fundamental en este desarrollo pues no existe ningún material que brinde las mismas oportunidades que él en cuanto a resistencia, laborabilidad y durabilidad.

Sin embargo la producción de hormigón presenta problemas que son prácticamente inevitables como son sus costos de producción e impactos al medio ambiente, aun así se manejan alternativas para amortiguar dichos obstáculos.

La producción de este importante material lleva consigo varios procesos desde la extracción de sus componentes pasando por la producción industrial del cemento, la trituración de los áridos en canteras, la utilización de aditivos necesarios para lograr determinadas propiedades en la mezcla y como no puede faltar, el agua.

El cemento es el más importante y el principal componente del hormigón, es el que se encarga de aglutinar todos los otros componentes, y es precisamente su producción la que encarece al hormigón, porque para esta se emplean grandes cantidades de combustibles fósiles para llegar a alcanzar las altas temperaturas necesarias en la formación del clínker, que oscilan entre los 1350 y 1450 °C. (Karen Scrivener, 2017)

Otros problemas son las emisiones a la atmósfera de agentes contaminantes como son polvos y gases como el CO₂; la contaminación por ruido en las áreas cercanas a la planta; afectaciones a las aguas por descargas de efluentes y desechos.

Las emisiones de dióxido de carbono debido a la descarbonatación no pueden evitarse, constituyendo una etapa esencial de la fabricación del cemento, sin embargo, estas se reducen utilizando materiales cementicios suplementarios como: puzolanas naturales, cenizas volantes, escorias de alto horno y las arcillas calcinadas. Las arcillas son minerales que se encuentran ampliamente

diseminados sobre la superficie terrestre y pueden ser activadas mediante procesos térmicos que requieren mucho menos energía que la demandada por el clínker.

En Cuba existen grandes problemas con la producción de hormigón, debido a los costos elevados para la obtención de materias primas y todo ello unido a que el país se encuentra en una situación económica desfavorable, a que la mayoría de las plantas presentan una tecnología obsoleta y muchas veces se manifiestan dificultades en su producción debido a roturas y la escasez de piezas de repuesto. También los altos consumos de combustibles que son hoy en día un tema crítico debido a la escasez que presenta el país en este ámbito, y los aditivos, que obligatoriamente hay que importarlos.

La norma cubana establece distintos tipos de cementos y métodos para su empleo como se muestra a continuación:

El cemento a utilizar se seleccionará entre aquellos cuya aptitud de uso esté establecida, teniendo en cuenta la ejecución de la obra, el uso final del hormigón, las condiciones del curado (por ejemplo si hay tratamiento térmico), las dimensiones de la estructura (el desarrollo del calor de hidratación), las condiciones ambientales a las que estará expuesta la estructura y la reactividad potencial de los áridos con los álcalis procedentes del resto de los materiales constituyentes. (NC:120, 2014)

En los casos de hormigones expuestos al ataque de sulfatos medio o fuerte, ya sea en presencia de agua o suelo, se utilizará un cemento resistente a los sulfatos, o preferiblemente un cemento puzolánico. Si sólo se dispone de un cemento Portland ordinario, es recomendable que éste tenga un contenido de aluminato tricálcico (C3A) menor o igual al 5 % en peso y la sumatoria del contenido de aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (C3A + C4 AF) será menor o igual al 22% en peso. En los casos de estructuras expuestas directamente a la acción del agua de mar (sumergidos o en zona de recorrido de mareas) se utilizará preferiblemente un cemento de moderada resistencia a los sulfatos. (NC:120, 2014)

En cualquier caso de ataque químico medio o fuerte, además de las medidas que se tomen para garantizar una adecuada protección primaria del

hormigón, será imprescindible emplear medios de protección secundaria, tales como pinturas, resinas, etc. En el caso en que sea estrictamente necesario utilizar áridos que tengan probada potencialidad reactiva con los álcalis del cemento, se utilizarán preferiblemente cementos puzolánicos y cementos Portland con bajo contenido de álcalis, o sea con contenido de óxido de sodio equivalente ($0,658 K_2O + Na_2O$) no mayor del 0,6 % en peso de cemento. (NC:120, 2014)

Es recomendable que la temperatura del cemento en el momento de su utilización no sobrepase los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, especialmente en los meses de verano. Se podrá utilizar cemento a mayor temperatura si se garantiza y controla que la temperatura de la mezcla fresca de hormigón, determinada según los requerimientos de la NC 354, no supere los $35\text{ }^{\circ}\text{C}$. (NC:120, 2014)

Los países desarrollados han trabajado los problemas relacionados con disminuir el porcentaje de clínker en el cemento, pero han sido los países menos industrializados los que más han trabajado estas alternativas. En el caso de Cuba, donde se prevé un crecimiento de la producción de cemento del 250 % para los próximos diez años, se ha introducido el empleo de arcillas calcinadas, las cuales, debido a su amplia disponibilidad, relativa facilidad de tratamiento y demostradas propiedades puzolánicas representan una alternativa como fuente de puzolanas, con el fin de reducir los volúmenes de clínker en la producción de cemento (Martirena, 2018).

El cemento de arcilla calcinada y caliza (LC3) permite reducir entre un 20-30% de las emisiones de CO_2 en comparación con el cemento tradicional; una gran reducción si se considera que el cemento es responsable del 5-8% de las emisiones producidas por la actividad humana.(Fielding 2019)

LC3, como se conoce este nuevo cemento, permite casi duplicar la cantidad de cemento producido a partir de la misma cantidad de caliza sustituyendo hasta el 50% del clínker (material intermedio producido a partir de calcinar caliza a temperaturas muy altas) con arcilla calcinada.(Fielding 2019)

LC3 es un cemento de bajo carbono y de bajo costo que alcanza propiedades similares o incluso superiores al cemento Portland. La mezcla puede ser

producida fácilmente en las líneas de producción existentes, con el único requerimiento de pequeñas inversiones de capital.(Fielding 2019)

La reactividad de las arcillas caoliníticas calcinadas proviene de la formación de metacaolín durante la activación térmica de las arcillas en bruto. La metacaolina reacciona como material puzolánico con portlandita, agua y sulfato para formar las fases C-A-S-H, ettringita y AFm. Cuando se añade piedra caliza al cemento Portland, la calcita reacciona con C3A desde el clínker para formar fases de hemi y monocarboaluminato. En el LC3, el aluminato de la metacaolina también reacciona con la calcita y mejora la formación de las fases de carboaluminato. (François Avet, 2018)

La mayoría de los estudios anteriores sobre el impacto de la metacaolina en la hidratación han utilizado metacaolina bastante pura, pero tales materiales no son muy interesantes desde un punto de vista económico, ya que normalmente cuestan alrededor de 3 veces el precio del cemento Portland. Existe poca información disponible sobre las arcillas calcinadas con menor contenido de caolinita calcinada, que tienen un potencial mucho mayor como sustitutos del clínker.

Las arcillas calcinadas pueden producirse en equipos similares a los del cemento Portland con costos de inversión similares. Las temperaturas de calcinación son mucho más bajas (750-850 °C) que las del clínker (1450 °C), lo que reduce los costes energéticos. Sin embargo, la mayor reducción de costes se debe a las altas tasas de sustitución de clínker y a la posibilidad de incorporar grandes cantidades de caliza. (Karen Scrivener, 2017) El LC2 es una adición mineral empleada para la producción de este cemento y se están haciendo investigaciones para producir hormigones con ella debido a que es muy abundante en la corteza terrestre y que no demanda demasiados recursos por tanto el **problema científico** de la investigación es:

¿Cómo producir hormigones utilizando una adición mineral puzolánica en base a arcilla calcinada-caliza-yeso (LC2)?

Objeto de estudio:

Hormigones.

Campo de acción:

Producidos con la adición mineral LC2.

Objetivo general:

Evaluar hormigones utilizando la adición mineral LC2 bajo condiciones de producción a escala piloto.

Objetivos específicos:

- Fundamentar desde el punto de vista teórico-conceptual el uso de hormigones fabricados con materiales cementicios suplementarios.
- Recopilar datos de hormigones elaborados con la adición mineral LC2.
- Evaluar las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones producidos con la adición LC2.

Hipótesis:

En la medida que sea empleado la adición puzolánica LC2 en la producción de hormigones se puede mejorar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, lo que permitirá perfeccionar la tecnología de su uso, ajustándola a los parámetros encontrados como óptimos en la producción de elementos de hormigón.

Métodos teóricos

-Histórico-Lógico: Mediante este método se pudo profundizar en toda la información existente sobre el tema investigativo, fundamentalmente en todo aquello que servirá de base teórica referencial para el trabajo.

-Analítico-sintético: Este método conduce a la generalización, a la visión integral del todo como una unidad de diferentes elementos.

-Inductivo deductivo: Permite llevar toda la información recopilada a estudios más particulares, además obtener y debatir los resultados obtenidos o generalizar los mismos.

Métodos Empíricos:

-Observación: Se realiza para evaluar el cumplimiento de los parámetros establecidos en las normas.

-Análisis de documentos: Permite analizar todos los documentos relacionados con el tema para la obtención de información.

-El Experimento: Se realizaron diferentes ensayos para evaluar el comportamiento de hormigones.

-Medición: Se tuvo en cuenta durante la realización de los ensayos y la obtención de los resultados.

-Criterio de especialistas: Se contó con los criterios de algunos especialistas para la realización de los ensayos y la evaluación de estos.

Novedad científica:

Radica en la obtención de un hormigón sustentable y económico con parámetros de resistencia y asentamiento comparables con los establecidos en las normas, utilizando el LC2 como una adición mineral puzolánica.

Aportes teóricos y prácticos.

El aporte teórico se expresa en la ganancia de conocimientos con respecto al tema de los hormigones producidos con materiales cementicios suplementarios, disminuyendo su costo e impacto ambiental. El aporte práctico radica en fomentar el uso del LC2 como material cementicio suplementario.

Población y muestras.

- Variable dependiente: resistencia superior a los 35 MPa
- Variable independiente: relación a/c, tipo de cemento, tipo de árido, aditivo, % de adición de LC2.
- El tamaño de la población y la muestra se definirá más adelante cuando se realice el diseño detallado del experimento.

Estructura de la investigación:

1. Resumen.
2. Introducción.

-
- **Capítulo I:** Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

En este capítulo se procede a realizar toda la revisión bibliográfica que argumente el tema tratado. Búsqueda de antecedentes y novedades, exposición de conceptos básicos.

- **Capítulo II:** Diseño de hormigones de resistencias superiores a los 35 MPa utilizando adición puzolánica LC² y humo de sílice de referencia.

Se diseña la dosificación para obtener hormigones con una resistencia superior a los 35 MPa. Este diseño se realizará por diferentes métodos.

- **Capítulo III:** Análisis y discusión de los resultados.
Se evaluarán los resultados obtenidos de los hormigones diseñados para medir sus propiedades en estado fresco y endurecido.

3. Conclusiones.

4. Recomendaciones.

5. Bibliografía.

6. Anexos.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1. Problemas con la producción de hormigón en general

En la actualidad cada planta produce diferentes tipos de hormigón los cuales pueden tener un mayor o menor efecto en la cantidad de energía consumida, el tipo de materias primas utilizadas, las emisiones líquidas y gaseosas producidas y los residuos generados. Los principales materiales requeridos para la fabricación del hormigón incluyen los áridos (habitualmente en forma de arena, constituyendo aproximadamente un 34% de la composición del hormigón), grava (en aproximadamente un 48 % del hormigón), cemento (en un 12% de la composición del hormigón), agua (en proceso seco alrededor de un 6%), y aditivos. Mientras los dos tipos de agregados consumen la mayor proporción de la mezcla de hormigón, el cemento es el ingrediente clave ya que hace posible la unión de los otros componentes. (Wilson, A.; 1993).

El hormigón puede ser enviado al lugar de la construcción para fundir elementos Insitu, o se puede emplear en plantas para los elementos prefabricados. Si no hay notable diferencia energética entre ambos tipos (construcción prefabricada o Insitu), los elementos prefabricado implican menos consumo. Por otro lado, la medida de los bloques de hormigón es limitado debido a los impedimentos del transporte.(De 2006)

Apenas existe bibliografía que desglose y cuantifique las emisiones del hormigón de forma científica. Existen inventarios de ciclo de vida para muchos productos industriales ampliamente utilizados, pero de estos muy pocos corresponden a productos relacionados con la construcción, incluyendo el cemento. Los análisis de inventario comparativos no son factibles a menudo debido a la falta de homogeneidad en el formato y tratamiento de los datos, en la indefinición de los límites del sistema o la falta de claridad sobre los métodos analíticos usados o la validez geográfica (Josa, A.; et al.; 2004).

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

Hasta la fecha, sólo países avanzados en el campo de los análisis de ciclo de vida han proporcionado inventarios del cemento. Esto obliga a tener que confiar en inventarios elaborados por otros países. La disponibilidad de los datos es escasa, bastante limitada por políticas de bases de datos de acceso restringido ejercidas con frecuencia por empresas privadas. (De 2006)

En esta situación, ha sido necesaria la adaptación de los datos más formales disponibles. Así pues, la siguiente tabla elaborada a partir de (Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998) muestra el perfil medioambiental de un hormigón cuya clasificación desconocemos y establece una guía sobre la proporción entre las cantidades involucradas de un material y de otro.

Tabla 1.1 Composición físico-química del hormigón.

<u>Energía</u>		
Fuel fósil	0,93	MJ/kg producto
Electricidad	0,20	MJ/kg producto
<u>Materias primas</u>		
Caliza	170	g/kg producto
Otros productos minerales	850	g/kg producto
Agua	80	g/kg producto
<u>Emisiones</u>		
Dióxido de carbono (CO ₂)	120	g/kg producto
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0,55	g/kg producto
Óxido de sulfúrico (SO ₂)	0,14	g/kg producto
Metano (CH ₄)	0,13	g/kg producto
Componentes orgánicos volátiles (COV _{tot})	0,18	g/kg producto
Polvo	0,023	g/kg producto
Metales pesados (Cr,As,Cd,Hg,Tl,Pb)	20	µg/kg producto

A continuación, la tabla que se muestra elaborada a partir de (Häkkinen, T.; Vares, S.; 1998) indica los porcentajes de energía y emisiones más relevantes (CO₂, NO_x y metales pesados) que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón. Los datos porcentuales referentes al cemento contemplan la obtención de materias primas, su transporte y la producción del cemento.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

Tabla 1.2 Porcentajes de energía y emisiones más relevantes que introduce cada etapa del ciclo de vida del hormigón.

	Fuel fósil y electricidad	Emisiones de CO ₂	Emisiones de NO _x	Emisiones de metales pesados
Cemento	69%	83%	71%	88%
Áridos	3%	1%	1%	1%
Transporte de materias primas	5%	3%	8%	<1%
Producción de hormigón	16%	8%	5%	10%
Transporte del producto	7%	5%	15%	<1%
Total	100%	100%	100%	100%

1.1 Construcción prefabricada e in situ

El sector de la construcción, actualmente, es la actividad productiva menos eficiente que existe. El modo artesanal de producción origina graves consecuencias negativas: siniestralidad elevada, baja especialización, precariedad de las condiciones de trabajo, dilatados plazos de obra, altos costes por el elevado impacto de la mano de obra y defectos reiterados en la ejecución. La alternativa a la construcción convencional es la externalización de los elementos constructivos en centros de producción, o lo que es lo mismo, la prefabricación. Con tal de justificar la evolución histórica de este proceso constructivo y sus retos para el futuro, se realiza una comparativa de las ventajas e inconvenientes que ofrece respecto al modo de construcción artesanal.(Pérez n.d.)

1.1.1 Ventajas

La industrialización implica optimizar la edificación desde una óptica industrial: construir por módulos y mediante rutinas de trabajo estandarizadas, y con un mayor grado de participación tecnológica. La principal ventaja que ofrecen los productos prefabricados respecto a los elementos ejecutados “in situ”, es la notable calidad de los materiales y los acabados. Esto se debe a que los elementos prefabricados se producen en una planta con unas condiciones exhaustivas y estrictos controles de calidad. En obra únicamente se montan las

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

piezas y los únicos problemas que pueden surgir son desperfectos derivados del transporte de dichos elementos. De esta manera, se reduce significativamente el espacio necesario para acopio y producción de piezas en obra, así como el tiempo de ejecución del edificio. Este hecho conlleva que los costes globales de la obra también se reduzcan. Por otro lado, al externalizar la producción de los elementos a una industria se reducen los equipos de trabajo en obra. De manera general, los operarios de la industria de prefabricados son obreros con mayor especialización y calificación que las cuadrillas de trabajos de construcción “in situ”. Eso deriva en una reducción significativa de los accidentes laborales de los trabajadores. Finalmente, como la producción se realiza en un espacio donde las condiciones de contorno están controladas, la gestión de los residuos generados es substancialmente más eficaz. Si a este factor, añadimos el hecho de que el consumo energético es menor, se puede afirmar que la construcción industrializada es menos perjudicial para el medio ambiente.(Pérez n.d.)

1.1.2 Desventajas

Aunque los progresos en la cuestión han sido notables, el mayor inconveniente que tiene en la actualidad la construcción industrializada respecto a la construcción convencional sigue siendo la rigidez que provocan los elementos prefabricados en el diseño del proyecto. Por mucha versatilidad que tenga la planta de producción, es inviable que ofrezca la misma gama de formas y acabados que la construcción artesanal.

Por otro lado, todavía existen cuestiones técnicas no resueltas satisfactoriamente. En el campo estructural, los elementos resistentes de un edificio deben resistir las acciones a que está sometido de forma conjunta. Las soluciones actuales de uniones entre diferentes elementos estructurales de hormigón prefabricado no garantizan en su totalidad el monolitismo, con lo que no resultan eficaces sin realizar intervenciones “in situ”, especialmente en zonas sísmicas (Fig. 1).(Pérez n.d.)

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.



Figura 1.1: Colapso de edificios prefabricados por los efectos de un terremoto. 1988, Spitak (Armenia).(Pérez n.d.)

Otro inconveniente, desde el punto de vista económico empresarial, es que la inversión inicial para desarrollar una industria de prefabricados es significativamente mayor que el de una constructora convencional, cuyo principal “modus operandi” es la subcontratación de los servicios.(Pérez n.d.)

1.2 Cemento

En el sentido general de la palabra: el cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Esta definición abarca una gran variedad de materiales de cementación.(Ing et al. n.d.)

Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos: Los cementos que se utilizan en la fabricación de concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos. (Ing et al. n.d.)

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1.2.1 Componentes del cemento

1.2.1.1 Clínker

El clínker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla homogénea de materias primas: caliza, arcilla, arena, compuestos de hierro y otros componentes en proporciones definidas (crudo, pasta o harina) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y pequeñas cantidades de otras materias. Esta mezcla se calienta hasta llegar a los rangos de la temperatura de sinterización y se forman nuevos compuestos. (Ángel et al. n.d.)

El clínker de cemento portland es un material hidráulico que debe estar constituido al menos en dos tercios de su masa por silicatos de calcio [$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$] y [$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$], estando constituido el resto por fases del clínker conteniendo aluminio, hierro y por otros compuestos. La relación en masa $(\text{CaO}) / (\text{SiO}_2)$ no será menor de 2,0 y el contenido de óxido de magnesio (MgO) no excederá del 5,0 % en masa. (Ángel et al. n.d.)

1.2.1.2 Reguladores de fraguado

Son materiales naturales o productos artificiales que añadidos a los clínkeres Portland y a otros constituyentes del cemento, en pequeñas proporciones, y molidos conjuntamente, proporcionan cementos con un fraguado adecuado. El regulador más común es el sulfato cálcico en alguna de sus variedades, al ser utilizado como regulador de fraguado las impurezas que pudieran acompañar a ese subproducto no deberán afectar desfavorablemente a los procesos de fraguado y de endurecimiento, ni a las propiedades y comportamiento de los conglomerados frescos o endurecidos. (Carrera et al. 2014)

1.2.1.2.1 Sulfato de Calcio (yeso)

Este conglomerante se obtiene del Aljez o piedra natural del yeso, constituida por sulfato cálcico dihidratado. Arrancando el Aljez de las canteras, se tritura y se le somete a cocción para extraer, total o parcialmente, el agua de cristalización que contiene en estado natural, convirtiéndolo en sulfato cálcico

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

puzolanas, que por sí mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento portland, reaccionan para formar componentes cementantes. Otros materiales, como las escorias sí exhiben propiedades cementantes.(Cenizas n.d.)

Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento, algunas veces son referidos como adiciones minerales, necesitan cumplir los requerimientos de las normas establecidas. Ellos pueden ser utilizados individualmente o en combinación en el hormigón. Pueden ser añadidos a la mezcla de concreto como un cemento que contenga la adición o como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de concreto premezclado.(Cenizas n.d.)

1.3 Agua

1.3.1 Agua de amasado

El agua de amasado cumple dos funciones fundamentales en el hormigón: una, hidratar al cemento para formar una pasta que pueda fraguar y posteriormente endurecer, convirtiéndose en el cementante requerido para unir las partículas de áridos.; y la segunda, otorgar trabajabilidad o fluidez a la mezcla de hormigón para que pueda ser utilizada en obra. La cantidad de agua necesaria para esta función es adicional a la requerida para combinarse químicamente con el cemento(Valderrama, 2011).

Aunque el agua es el componente de más bajo costo para la elaboración del hormigón, es un elemento tan importante como el cemento, pues la variación de su contenido en una mezcla, permite realizar su dosificación variando su resistencia, plasticidad, asentamiento, trabajabilidad y permeabilidad. El análisis y uso de agua proveniente de diversos ríos, pozos y lagos muestra que rara vez su composición química ocasiona problemas en el hormigón, pero cuando se desconoce la calidad del agua utilizada, su procedencia y composición química, se corre un gran riesgo, pues, aunque la relación “a/c” sea la deseada, se desconoce si en el interior del hormigón el agua provocará un beneficio o un inconveniente(Carrasco, 2009).

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1.3.2 Agua de curado

El agua de curado durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, tiene como objetivo evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura.

Durante el proceso de fraguado y primeros días de endurecimiento, el hormigón pierde agua por evaporación, creándose un sistema capilar interconectado en el hormigón que disminuye su resistencia. Para suplir estas pérdidas y permitir que se desarrollen nuevos procesos de hidratación, aumentando su resistencia, el hormigón debe curarse de forma adecuada añadiendo abundante agua.

La falta de curado es grave para la durabilidad de la estructura, debido a que ésta depende de la impermeabilidad y por tanto de la compacidad de las capas exteriores de hormigón, que son las más sensibles a una falta de curado, ya que el núcleo de la pieza se mantiene constantemente húmedo durante un periodo prolongado. El hecho de no curar bien el hormigón, hace que la capa de recubrimiento de las armaduras resulte porosa y permeable, con lo que la vida útil de la estructura estará gravemente mermada. (Garcés Terradillos, Climent Llorca, & Zarnosa Gómez, 2008)

1.4 Áridos

. Se denomina árido a aquel material granulado empleado como materia prima en la construcción principalmente.

(López Jimeno (1994)) establece que áridos son "los materiales minerales, sólidos inertes, que con las granulometrías adecuadas se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla íntima con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cales, cementos, etc.) o con ligantes bituminosos.

Según la NC 251:2005 el árido es el mineral procedente de rocas que se encuentran desintegradas en estado natural o precisan de trituración mediante

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

procesos industriales. Las dimensiones son diferentes, varían desde 0,149 mm hasta un tamaño máximo especificado.

Los áridos se encuentran distribuidos en tres grandes grupos según su origen:

- **Áridos naturales:** son aquellos de origen mineral que son extraídos de la corteza terrestre y que únicamente son sometidos a procesos mecánicos para adaptarlos a una determinada granulometría para su uso en la construcción
- **Áridos artificiales:** son de origen mineral, el resultado de un proceso industrial que supone modificaciones en su composición ya sea térmicas, químicas u otras
- **Áridos reciclados:** son los resultantes del tratamiento de materiales inorgánicos que fueron utilizados con anterioridad en la construcción.

1.4.1 Árido fino

Los áridos finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 pulg.) y pueden formarse de forma natural por ruptura de rocas, grava o resultado de procesos industriales. El contenido de agregado fino es normalmente del 35% al 45% de la masa o volumen del contenido total de agregado (Kosmatka, 2004).

Las cantidades de agregado fino de menor diámetro afectan la trabajabilidad, la textura superficial, el contenido de aire y la exudación del hormigón. El límite más bajo puede ser suficiente para condiciones fáciles de colocación o donde se acabe el concreto mecánicamente, como ocurre en los pavimentos. (Kosmatka, 2004). La degradación del agregado fino debido al rozamiento y a la abrasión decrece el módulo de finura y aumenta la cantidad de materiales más finos que el tamiz No. 200. La granulometría más deseada para el agregado fino dependerá del tipo de obra, del contenido de pasta de la mezcla y del tamaño máximo del agregado grueso. En mezclas más pobres, se desea una granulometría fina (módulo de finura más bajo) para lograrse una buena

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

trabajabilidad. En mezclas más ricas, se usa una granulometría más gruesa (mayor módulo de finura) para aumentar la economía. (Kosmatka, 2004)

1.4.2 Árido grueso

Los agregados gruesos o piedra consisten en una grava o combinación de grava o agregado triturado cuyas partículas generalmente se encuentran entre 9,5 mm y 38 mm. (Rica 2012)

Los áridos gruesos consisten en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 pulg.) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulg.) (Kosmatka, 2004)

La granulometría del árido grueso puede variar moderadamente, sin que afecte apreciablemente las demandas de cemento y agua de la mezcla. El tamaño del árido grueso influye en la economía del concreto, pues se requiere más agua y cemento en hormigones con áridos gruesos de menor tamaño máximo que con áridos de mayor tamaño máximo. Para una cierta relación agua-cemento, la demanda de cemento disminuye a medida que el tamaño máximo del agregado aumenta. El tamaño máximo óptimo del agregado grueso para resistencias elevadas depende de factores, tales como resistencia relativa de la pasta de cemento, adherencia entre cemento y agregado y resistencia de las partículas de agregado. (Kosmatka, 2004).

1.5 Aditivos

Los aditivos son aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1.5.1 Clasificación de los aditivos

1.5.1.1 Aceleradores

Son productos que ayudan en gran medida a la disolución de los componentes anhidros del cemento, su acción no está del todo definida, aunque parece ser que produce una acelerada cristalización de los silicatos y aluminatos cálcicos en la pasta de cemento hidratada. La mayoría de estos presentan cloruro de calcio que es un acelerante por excelencia, aunque también actúan el cloruro sódico, amónico y férrico.(Ingenier & Grupo n.d.).

El CaCl_2 , incrementa la velocidad de hidratación produciendo altas resistencias iniciales unido a una gran liberación de calor en sus primeras horas, al actuar como catalizador en las reacciones de hidratación del aluminato del cemento, formando la sal de Friedel y acelerando la reacción entre el yeso y el C_3A y el C_4AF .(Ingenier & Grupo n.d.).

El cloruro de calcio mejora la docilidad de los hormigones y aumenta en gran medida su compacidad, no alterando las resistencias de estos al final y tampoco produce la regresión de ellas como ocurre con otros tipos de cloruros.(Ingenier & Grupo n.d.).

Este tipo de aditivo tiene un gran inconveniente y es que puede acelerar o dar lugar al proceso de corrosión de las armaduras sobre todo si el hormigón se encuentra en ambientes húmedos, precisamente por todo esto está terminantemente prohibido su uso para hormigones armados o pretensados, igual que muchos otros productos que posean en su composición química: cloruros, sulfuros, sulfitos u otros productos que favorezcan la corrosión.(Ingenier & Grupo n.d.).

El cloruro de calcio aumenta la retracción del hormigón, pero le confiere una considerable resistencia a la abrasión de forma permanente.(Ingenier & Grupo n.d.).

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

Otro de los acelerantes que se usa frecuentemente es el carbonato de sodio, su dosificación debe ser controlada porque en dosis bajas puede actuar como retardador, de cualquier manera, produce aumento de la retracción.

Los acelerantes tienen su principal aplicación en los hormigonados en clima frío, en la prefabricación al permitir los desencofrados rápidos, para los trabajos en túneles y galerías con presencia de humedad, en trabajos marítimos, etc.

1.5.1.2 Retardadores

Son sustancias empleadas en la pasta de cemento hidratada que retardan la disolución de los componentes anhidros del cemento o su difusión.

Los retardadores pueden ser sustancias inorgánicas solubles como: cloruro de aluminio, nitrato cálcico, cloruro de cobre, sulfato de cobre, cloruro de zinc, bórax soluble, fosfatos y fluoruros, ácido fosfórico, ácido bórico, óxidos de zinc y de plomo, etc., u orgánicas entre las cuales se encuentra la glucosa, sacarosa, almidón, celulosa, lignosulfonatos con azúcares, aminas y aminoácidos, etc., que en pequeñas proporciones pueden frenar el fraguado y endurecimiento del hormigón. (Ingenier & Grupo n.d.).

Los retardadores actúan de dos maneras distintas, una es según su naturaleza ayudando a la solubilidad del sulfato cálcico que es un retardador de fraguado y la otra es formando sales cálcicas las cuales son absorbidas por las partículas del cemento, retardando así la hidratación de este. (Ingenier & Grupo n.d.).

El empleo de retardadores es sumamente delicado porque si no se usan las dosis correctas puede afectar o incluso inhibir el fraguado del hormigón, por razones como esta se usan con mucha frecuencia fluidificantes o reductores de agua que también actúan como retardadores de fraguado. (Ingenier & Grupo n.d.).

Los retardadores de fraguado son utilizados principalmente para aumentar el tiempo de laborabilidad del hormigón permitiendo el transporte de este sin que se produzca el endurecimiento prematuro o segregación, algo que es muy importante en el transporte a largas distancias; controlar el principio de

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

fraguado de una masa para que una pieza hormigonada en varias fases fragüe al mismo tiempo y no se produzcan juntas; hormigonar en tiempo caluroso al hacer que el cemento sea menos activo en su hidratación con lo cual desprenderá menos calor durante la misma, sobre todo durante la primera semana. (Ingenier & Grupo n.d.).

1.5.1.3 Plastificantes

Se denominan plastificantes los aditivos para morteros y hormigones compuestos de sustancias que disminuyen la tensión interfacial en el contacto grano de cemento-agua debido a que su molécula, en fase acuosa, es por un lado hipotenso-activa en las superficies donde está absorbida, y por el otro lado es hidrófila, lo que facilita el mojado de los granos. La primera parte de la molécula es apolar, de cadena carbonada suficientemente larga, y la segunda es netamente polar.(Prescripciones & Particulares n.d.).

Como reductores de agua la función principal es la de permitir disminuir el contenido de agua (de un 5% a un 10%) en la dosificación de un hormigón sin que se modifique su consistencia. De esta manera conseguimos aumentar la resistencia mecánica.(Anon 2012).

Los plastificantes además de cumplir las condiciones generales para todos los aditivos químicos establecidos en el apartado anterior cumplirán las siguientes:

- a) Serán compatibles con los aditivos aireantes por ausencia de reacciones químicas entre plastificantes y aireantes, cuando hayan de emplearse juntos en un mismo hormigón.
- b) El plastificante debe ser neutro frente a los componentes del cemento y de los áridos incluso a largo plazo, y productos siderúrgicos.
- c) No deben aumentar la retracción del fraguado.
- d) Su eficacia debe ser suficiente con pequeñas dosis ponderales respecto de la dosificación del cemento (menos 1,5%) del peso de cemento.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

e) Los errores accidentales en la dosificación del plastificante no deben producir efectos perjudiciales para la calidad del hormigón.

f) Al igual en la composición y naturaleza de los áridos, en la dosificación de cemento y en la docilidad del hormigón fresco, la adición de un plastificante debe reducir el agua de amasado y en consecuencia, aumentar la resistencia a compresión a veintiocho (28) días del hormigón por lo menos en un diez por ciento (10%).

g) No deben originar una inclusión de aire en el hormigón fresco, superior a un dos por ciento (2%).

h) No se permite el empleo de plastificantes generadores de espuma, por ser perjudiciales a efectos de la resistencia del hormigón. En consecuencia, se prohíbe el empleo de detergentes constituidos por alquilarisulfonatos de sodio y por alquisulfatos de sodio. (Prescripciones & Particulares n.d.)

1.5.1.4 Fluidificantes

Los fluidificantes son productos líquidos de naturaleza orgánica formados por macromoléculas tensoactivas que mejoran la cohesión y reología del hormigón, sin introducir aire en su masa.

Estas moléculas tienen un extremo de su cadena hidrófilo con afinidad por el agua y otro hidrófobo, con lo cual quedan absorbidas y orientadas en la superficie de los granos provocando un efecto lubricante y una dispersión de las partículas de cemento, haciendo que estas requieran menos agua para su mojado e hidratación.(Anon n.d.)

La máxima capacidad de reducción de agua de un fluidificante puede llegar a ser del 15%, dependiendo de su tipo. Las características que estos aditivos le confieren a los hormigones son: aumentar la docilidad sin incrementar la cantidad de agua de amasado, reducir la relación agua/cemento a igualdad de docilidad, reducir la segregación del hormigón durante el transporte, disminuir la exudación e incrementar la adherencia a las armaduras, aumentar la resistencia a compresión, de un 10 al 20 % en 28 días al permitir reducir el

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

agua, aumentar la durabilidad y resistencia a la abrasión, y retardar ligeramente el fraguado.

1.5.1.5 Superplastificantes o superfluidificantes

Estos aditivos Superplastificantes o superfluidificantes son una evolución de los plastificantes y fluidificantes, los cuales permiten conseguir reducciones máximas de agua del 15 %. Si se pretenden conseguir reducciones superiores hay que utilizar grandes cantidades de plastificantes con los consiguientes efectos secundarios, no deseables, de aire ocluido, exudación, segregación, alteraciones importantes en el fraguado, etc.(Anon n.d.)

Los Superplastificantes o superfluidificantes pueden estar compuestos de Naftalenos formaldehído sulfonado, melamina formaldehído sulfonado, copolímeros de vinilo y policarboxilatos.(Anon n.d.)

El objetivo de estos aditivos es aumentar considerablemente la laborabilidad del hormigón o de la pasta con relaciones agua-cemento muy bajas, necesarias para garantizar mejores propiedades físico mecánicas y de fraguado en la mezcla. Estos aditivos están compuestos por polímeros orgánicos, sintéticos y naturales. Estos presentan propiedades dispersantes para las partículas del cemento, gracias a la cual se logra disminuir la floculación de estas en el agua de amasado. Este tipo de aditivos dan mayor cohesión a la mezcla sin alterar su fluidez, además reducen la segregación de áridos para consistencias con grandes asentamientos en el cono de Abrams.

Son productos que se han desarrollado en estos últimos años y que permiten conseguir reducciones de agua de amasado de hasta el 40% sin tener los inconvenientes antes apuntados.(Anon n.d.)

Estos aditivos modifican la reología de los hormigones permitiendo conseguir mezclas muy dóciles y fáciles de poner en obra, sin reducir sus resistencias, es decir, hormigones de docilidad normal pero con muy bajo contenido de agua.(Anon n.d.)

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1.5.1.6 Aireantes

Los aireantes están formados por moléculas orgánicas que en disolución acuosa, se disocian en iones complejos que son adsorbidos por las partículas finas del cemento y de los áridos por su grupo polar. El grupo apolar tiene un efecto tensoactivo fuerte y da lugar durante la mezcla de la pasta a las pequeñas burbujas de aire que quedan ocluidas entre las partículas finas del cemento y de los áridos.(Anon n.d.)

Se considera eficaz al aditivo que introduce al hormigón una cantidad de aire entre el 2 y el 6%

El hormigón ocluye infinidad de burbujas de aire, de 10 a 500 micras de diámetro. Todo esto es debido a los aditivos aireantes que son más dóciles, trabajables, homogéneos, más estables durante el transporte, tienden menos a la segregación, mejor aspecto al ser desencofrado, permite reducir los áridos finos y el agua.

Otras de las propiedades que aportan estos aditivos son hormigones más impermeables, menos absorbentes por capilaridad con gran resistencia a las heladas y a las aguas agresivas.

Es cierto que si bien presenta todas estas ventajas reduce la resistencia mecánica del hormigón al sustituir pasta de hormigón o áridos por aire, aun así, como se logra aumentar la docilidad de la mezcla, se reduce considerablemente la relación agua/cemento logrando una compensación considerable. También su durabilidad aumenta debido a una menor absorción de agua.

1.6 Adiciones

1.6.1 Cenizas volantes

Son los residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica, de los polvos que acompañan a los gases de la

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados.(Carrera et al. 2014).

Proceden de la combustión de carbones antracíticos, bituminosos, sub-bituminosos o ligníticos, por orden de mayor a menor poder calorífico y de menor a mayor contenido de volátiles. A efectos de su empleo en cementería parecen preferibles las cenizas de carbones bituminosos, que son los que dejan mayor cantidad de residuos sólidos.(Calleja 1983)

La cantidad de ceniza volante en el hormigón puede variar entre el 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente y la composición de la ceniza volante y del desempeño requerido al concreto. Las características de la ceniza volante pueden variar significativamente según la fuente del carbón mineral que se quema. Las cenizas de clase F son normalmente producidas de la quema de la antracita o de carbones bituminosos y generalmente poseen un contenido bajo de calcio. Las cenizas de Clase C son producidas cuando se queman carbones sub-bituminosos y poseen típicamente propiedades puzolánicas.(Cenizas n.d.)

Al empleo de las cenizas le es atribuible también una finalidad económica de doble vertiente: ahorro de clínker y, por consiguiente, de energía -combustibles, electricidad- y de materias primas en la fabricación de cemento, cuando se utilizan molidas y/o mezcladas con el clínker en fábrica; y ahorro de cemento y, por lo tanto, reducción del costo del hormigón cuando se añaden directamente en las hormigoneras.(Calleja 1983)

1.6.2 Humo de Sílice

El Humo de sílice es un material puzolánico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro- silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. El humo de sílice está disponible como un polvo densificado o en forma de material acuoso. La norma

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

para el humo de sílice es la ASTM C1240. Generalmente se utiliza entre el 5 y el 12% en peso de los materiales cementantes para las estructuras de concreto que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida al agua. Debido a su extrema finura, deberán garantizarse procedimientos especiales para la manipulación, el vaciado y el curado del concreto con este material.(Cenizas n.d.)

1.6.3 Escorias de alto horno

Las escorias se forman como subproducto del proceso siderúrgico en el que aparece el arrabio o fundición como producto base, y como consecuencia -de la reacción entre la mena y la ganga del mineral -sobre todo esta última-, el coque y la caliza más o menos dolomítica utilizada como fundente y corrector, en el horno alto.(Calleja 1983)

La escoria contiene, a efectos de su utilización como adición al clínker, una serie de compuestos deseables (silico-aluminatos cálcico-magnésicos del grupo de las melilitas), y otra serie de compuestos indeseables (sulfuros -de calcio, manganeso y hierro- y óxidos -ferroso, férrico y mixto: magnetita, de magnesio, titanio, azufre y alcalinos-), estos últimos en escasa proporción.(Calleja 1983)

En definitiva, la escoria para cementería debe ser de alto horno, básica y granulada, porque hasta ahora, las escorias de otros procesos siderúrgicos o de otras metalurgias no férricas, por razones de composición y/o de inestabilidad, no han sido utilizadas, si bien se están haciendo intentos en diversos países para hacer posible su utilización con garantía y sin riesgos.(Calleja 1983)

Las escorias suelen ser, en general, más duras que el clínker, por lo cual deberían ser molidas aparte, a fin de sacar el mejor partido de su hidraulicidad.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

1.7 Métodos de dosificaciones

1.7.1 Método de Bolomey

Este método puede ser considerado como un perfeccionamiento del método de Füller; los datos para efectuar la dosificación por este método suelen ser los mismos que los utilizados por el método de Füller. La cantidad de agua necesaria por metro cúbico de hormigón se determina utilizando las mismas tablas que en el método de Füller. Para la determinación del tamaño máximo del árido se sigue el mismo criterio utilizado en el método anterior. Para determinar en qué proporción se mezclan las distintas fracciones de árido, es en éste punto donde se aportan las modificaciones respecto al método anterior, pues Bolomey utiliza una curva de granulometría variable en función de la consistencia deseada en el hormigón y la forma de los áridos, mientras que Füller considera una curva de granulometría ideal. Para ajustar la curva granulométrica de Bolomey el sistema de tanteos no varía con respecto al utilizado por Füller, pero el basado en los módulos granulométricos si aporta algo nuevo, ya que Bolomey considera el cemento como un árido más. (BOLIVAR, 2010).

1.7.2 Método del American Concrete Institute (A.C.I).

El sistema del American Concrete Institute (A.C.I) es, sin lugar a dudas, el método de dosificación más utilizado en todo el mundo, siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón (Anónimo, S.A-c). A continuación, se muestran los pasos que se deben seguir para dosificar una mezcla de hormigón siguiendo el método de la A.C.I.

- 1- Determinar el tamaño máximo del árido, teniendo en cuenta que debe ser el mayor posible siempre que cumpla con las especificaciones de diseño.
- 2- Obtener en una tabla los valores de consistencia después de haber hecho el ensayo del cono de Abrams. Para ello se toma el menor asentamiento, siendo este el que más se acerca a la realidad.

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

3- Hallar por medio de tablas la cantidad de agua de amasado por metro cúbico de hormigón que necesita la mezcla.

4- Definir la relación agua/cemento de acuerdo al tipo de ambiente al que se encuentre expuesto (términos de durabilidad) y la resistencia a compresión a los 28 días (términos de resistencia) apoyados en las tablas.

5- Calcular la cantidad de cemento que va a ser utilizada por metro cúbico de hormigón teniendo la cantidad de agua y la relación agua/cemento.

6- Determinar las cantidades de árido grueso y árido fino. Es necesario emplear la mayor cantidad de árido grueso para mejorar las condiciones de resistencia sin afectar la docilidad de la mezcla. Por otro lado, el contenido de finos puede obtenerse por el método de los volúmenes absolutos o por el de los pesos.

(Toledo, 2014).

1.7.3 Método de O'Reilly

El Método de Dosificar Mezclas de Hormigón del Prof. O'Reilly constituye una notable contribución al desarrollo de las Ciencias Técnicas, aplicadas en particular al hormigón armado, material que mantiene su vigencia entre los recursos fundamentales para el desarrollo de las construcciones en el mundo. Resultado de 15 años de investigaciones, en el que se ha empleado un extraordinario número de probetas, complejas elaboraciones matemáticas y revisión de los métodos de dosificación más reconocidos en el mundo, se introducen valiosos aportes científicos a la teoría y práctica de las mezclas con la comprobación experimental de la influencia de las formas geométrica variables de las partículas de los áridos en la reología y máxima compacidad del hormigón, propiedades fundamentales para el logro de la óptima economía del cemento y la durabilidad de las construcciones, muy en particular, frente a la agresividad del medio ambiente marítimo característico de nuestro país. El procedimiento propuesto por O'Reilly se utiliza en Cuba y en otros países de África y América. Una de las principales ventajas de este método es el ahorro de cemento que proporciona. En efecto, comparado con otros métodos como el

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

ACI, el método O'Reilly puede llegar a reducir en un 15% o más el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón.

Esto tiene una repercusión económica muy importante en la industria de la construcción.

En el objetivo de lograr el máximo ahorro de cemento con las condiciones tecnológicas existentes, sin requerir nuevas inversiones o eventuales importaciones de aditivos químicos para las mezclas de hormigón, O'Reilly propone un método de dosificación a partir de la determinación de las características de los áridos a emplear, y en función de ellas se diseña la mezcla, pues según demuestra existe una influencia cuantitativa de la forma de los áridos en el consumo de cemento.

El método consiste en determinar experimentalmente la combinación porcentual de áridos gruesos y arena que ofrezca el máximo peso volumétrico (mínimo contenido de vacíos), obteniendo el volumen de la pasta a través del cálculo de los vacíos, y finalmente el contenido de cemento y de agua se determina mediante factores que dependen de la relación a/c y de la consistencia deseada de la mezcla (CUJAE, 2007).

1.8 Cemento de bajo carbono LC3.

El "Cemento de Bajo Carbono" (LC3) constituye una formulación novedosa de cemento desarrollada por el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) en la EPFL, Suiza, y el CIDEM en Cuba desde el año 2009. Esta investigación colaborativa ha demostrado el potencial de mezclas ternarias de piedra caliza, arcilla calcinada y clínker, a la que nombran LC3, para dar un buen rendimiento en el contenido de clínker (50 % o menos), componente más costoso del producto a partir de su alto consumo energético (Antoni et al., 2012). En estos sistemas se aprovecha la sinergia producida entre los aluminatos y carbonatos, que permite aumentar el nivel de sustitución de clínker sin comprometer las propiedades físico-mecánicas y la durabilidad del nuevo cemento (Vizcaíno, 2014). La viabilidad de la producción del LC3 ha sido comprobada mediante

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

una prueba industrial en la fábrica de cemento Siguaney en Sancti Spíritus, así como en estudios de costos e impacto ambiental. La prueba industrial se inició en el mes de marzo del 2013, con la quema industrial de 120 ton de arcilla caolinítica del yacimiento de Pontezuela, en Camagüey que generaron más de 65 ton de metacaolín evaluadas dentro de los valores esperados. Con la molienda realizada se culminó la fase de producción industrial del nuevo cemento y comenzó la de prueba experimental en una amplia gama de aplicaciones, que actualmente incluye la producción de bloques, elementos prefabricados, baldosas hidráulicas y otras obras de albañilería (Pérez, 2015). A la experiencia de producción y aplicación del LC3 se unen la India, segundo productor mundial de cemento, Brasil y Tailandia, lo cual avala al LC3 como una tecnología simple y asequible para todos los productores y países (Vizcaíno, 2014, Scrivener, 2014). El cemento producido ha mostrado excelentes propiedades hasta el momento. En pruebas de resistencia a las 24 horas alcanzó 5 MPa, el 15 % de la resistencia que se espera alcance en 28 días. No incrementa la demanda de agua, y tiene un fraguado normal, similar a los cementos comerciales P-35 y PP-25. Esta nueva tecnología permite triplicar los niveles actuales de sustitución de clínker que logra la industria de cemento en Cuba (alrededor del 15-18 % en el cemento PP-25), para producir un cemento de similar resistencia y con una sorprendente firmeza a la penetración de cloruros en ambientes agresivos (Pérez, 2015). Unido a esto se le suman importantes ventajas en su tecnología como son: gastos de producción más baratos o similares, puede realizarse su fabricación usando los equipos existentes en una planta de cemento y no necesita ningún cambio importante en la tecnología del hormigón, lo que contribuye significativamente en el eficiente uso de recursos (Scrivener, 2014). Los estudios económicos realizados demuestran que el LC3 podría resultar hasta un 15 % más barato que los cementos producidos hoy en el país, a lo cual se une su efecto medioambiental, a partir de que la sustitución de clínker permite reducciones en las emisiones de CO₂ a la atmósfera entre un 25-35 % con respecto a la

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

práctica diaria (Vizcaíno, 2014). Adicionalmente, constituye una opción prometedora en aras de aumentar la oferta, sobre todo en países tropicales y subtropicales, donde el aumento de la demanda será la más alta en las próximas décadas (Scrivener, 2014).

Los cambios en la economía cubana provocarán un incremento significativo de la demanda de cemento en el corto plazo (período 2016-2020). La capacidad productiva actual de la industria de cemento no puede abastecer esa demanda en el corto plazo. Esto producirá un déficit de cemento estimado entre 0.5-1 MM toneladas anuales, que de no existir alternativas tendrá que ser importado a altos costos. La introducción del cemento LC3 podría contribuir a aumentar la capacidad de producción de cemento en el país en un 17-45% en el corto plazo, con inversiones pequeñas de ciclo corto, a partir de emplear los niveles actuales de producción de clínker que tiene la industria. Por esta vía podría mitigarse el déficit que se creará, y consecuentemente evitar las importaciones, y brindar un espacio de tiempo para concretar las inversiones en camino. (Anon n.d.).

Tabla 1.3 Resumen de las propiedades químicas, físicas y mecánicas del cemento de bajo carbono obtenido en condiciones industriales.

Composición química	Composición en óxidos [%]									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RI	PPI	CaO libre	Total
	27.3	4.6	4.6	49.8	1.3	3.7	12.6	7.1	0.9	98.4
Composición química	Proporción promedio de los componentes [%] ^b									
	Clínker			Arcilla calcinada/ carbonato de calcio					Yeso	
	50.0			41.1					8.9	
Ensayos físicos	Retenido tamiz 4900	Blaine	Peso específico	Consist. Normal	Frag. inicial	Frag. final	Estabilidad de volumen			
	%	cm ² /g	g/cm ³	%	Min.	Horas	mm			
	12.0	4190	2.9	25.0	135	2.9	0.3			
Ensayos mecánicos	Resistencia a la compresión [MPa]									
	3 días	7 días	28 días							
	11.0	17.5	30.3							

^b: obtenida de la caracterización de las muestras

(Vizcaíno Andrés 2015)

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

Este cemento llamado LC3, es un cemento ternario compuesto por una mezcla de caliza y arcilla de origen caolínico calcinada a temperaturas de hasta 900 °C con cemento Portland de alta pureza P-35(Villas & Hern 2015) .Según el CIDEM, el LC3 está compuesto por un 48% de clínker, 30% arcilla calcinada, 15% caliza y un 7% de yeso. La sinergia entre la arcilla calcinada y la caliza permite aumentar la actividad puzolánica y estas reaccionan con el hidróxido de calcio que se forma durante la hidratación del cemento Portland. Esta reacción da lugar a la formación de fases del tipo Afm (hemicarbo y monocarboaluminatos). (Lara 2010).

Se estima que usar LC3 en lugar del cemento tradicional puede contribuir a reducir hasta 500 millones de toneladas de CO₂ en el año 2050 (equivalente a las emisiones de UK o Canadá).

El nuevo cemento se puede producir con un material de baja calidad que normalmente se considera residuo para la producción tradicional: arcilla de baja calidad y caliza rica en dolomita. La cocción se realiza a la mitad de la temperatura de clinkerización. La piedra caliza no se calcina, por lo que no contribuye al aumento de las emisiones de CO₂.(Cancio 2017).

El carbonato de calcio suministrado al sistema a través de la piedra caliza y la alúmina adicional suministrada por la arcilla calcinada reaccionarán para formar fases de alúmina. En los cementos mezclados normales, el límite de adición de puzolana es del 35%. La piedra caliza adicional proporcionada en el sistema puede compensar aún más el clínker, manteniendo la cantidad de puzolana utilizada en un 35%. Si la relación arcilla calcinada/piedra caliza se mantiene en 2:1, esto podría proporcionar una sustitución adicional del 15% del clínker, para una sustitución total del 50% del clínker.(Cancio 2017)

Esta forma de producción genera numerosas ventajas como son: el aprovechamiento de fuentes locales de materias primas, fundamentalmente desechos de la producción agroindustrial; oportunidades para el empleo de fuerza de trabajo de poca calificación; bajo índice de consumo de energía en la

Capítulo I: Investigación de las bases teórico-conceptuales que fundamentan el uso de los hormigones y los materiales cementicios suplementarios.

producción del aglomerante; producción descentralizada, en zonas alejadas de los grandes centros industriales y grandes ciudades; bajos costos de producción en comparación con el cemento Portland y el comercio local del producto con el objetivo de disminuir el costo de transportación.(Villas & Hern 2015)

Conclusiones parciales.

1. Las arcillas calcinadas presentan una importancia muy elevada cuando se habla del cemento de bajo carbono LC3, y de hormigones producidos con diferentes sustituciones de las mismas, su disponibilidad en la corteza terrestre y su bajo costo de producción la convierten en una alternativa muy factible para los países en vías de desarrollo.
2. Para lograr resultados satisfactorios hay que tener en cuenta las propiedades del LC2, ya que son materiales arcillosos que demandan grandes cantidades de agua y por tanto para evitar esto hay que aumentar las cantidades de aditivos, que pueden afectar las resistencias del hormigón a edades tempranas.
3. Es importante seleccionar métodos de dosificaciones adecuados que se ajusten a las condiciones y disponibilidad de los materiales, así como garantizar calidad en los áridos, aditivos, adiciones y cemento. También a la hora de producir el hormigón debe haber un correcto control de la calidad, para evitar problemas futuros que afecten la resistencia del hormigón, así como otras propiedades.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Introducción

La resistencia es una de las principales propiedades del hormigón en estado endurecido, es necesario para ella realizar ensayos a compresión en probetas normalizadas. Estos se realizan a las 24 horas, 3, 7, 28 y hasta 90 días para tener constancia de sus características físico-mecánicas.

Otras de las principales propiedades son las de estado fresco las cuales evalúan la laborabilidad del hormigón, estas se realizan por varios métodos, pero los usados en esta investigación fueron el cono de Abrams y la mesa vibratoria

Con el objetivo de analizar las características del hormigón producido con LC2 en el siguiente capítulo abordaremos los diseños de las dosificaciones por el método de O'Reilly. Las materias primas empleadas dígase áridos, cementos y adiciones son de diferentes procedencias debido a que los sitios donde se realizaron las pruebas son: La ECM Mariel, la Empresa Constructora de Obras para el Turismo (ECOT) Cayo Santa María, y EPP Remedios. En estos lugares se produjeron probetas que posteriormente se ensayaron y se midieron sus resistencias para ser analizadas independientemente.

2 Caracterización de las materias primas

2.1 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en la ECOT Cayo Santa María.

2.1.1 Áridos.

Los áridos empleados en los ensayos de la ECOT Cayo Santa María provienen de la cantera El Purio.

Árido fino.

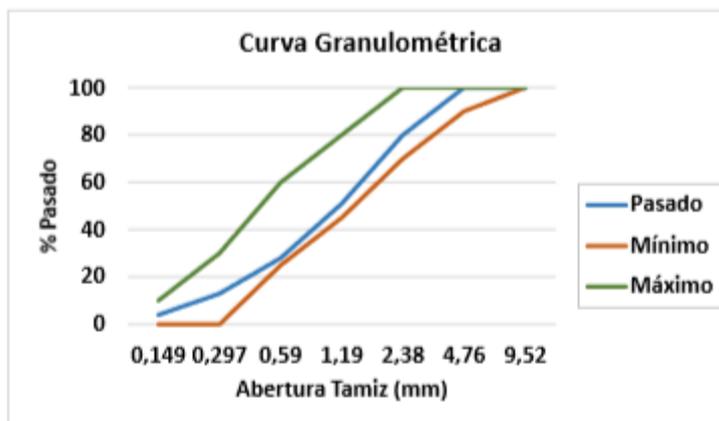
Este árido presenta las siguientes propiedades físicas y granulométricas.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.1 caracterización de la arena. El Purio. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Material más fino que el T 200	%	2.01*	≤ 3 para hormigones sometidos a la abrasión. ≤ 5 todos los demás hormigones
Tamaño	mm	5-0.15	
Peso específico corriente	g/cm ³	2.58*	≥ 2.50
Absorción	%	1.9*	≤ 3
Masa volumétrica suelta	kg/m ³	1327	-
Masa volumétrica compactada	kg/m ³	1538	-
Análisis granulométrico			
Tamices (mm)	% Pasado	Especificaciones	
9.52	100*	100	
4.76	100*	90-100	
2.38	80*	70-100	
1.19	51*	45-80	
0.59	28*	25-60	
0.297	13*	10-30	
0.149	4*	2-10	
Incertidumbre: ± 1.55			
* Conforme, ** No conforme			

El árido en caso de la granulometría es no conforme si al menos en un tamiz el porcentaje pasado no satisface las especificaciones



Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Gráfico 2.1 Curva granulométrica de la arena. El Purio. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María)

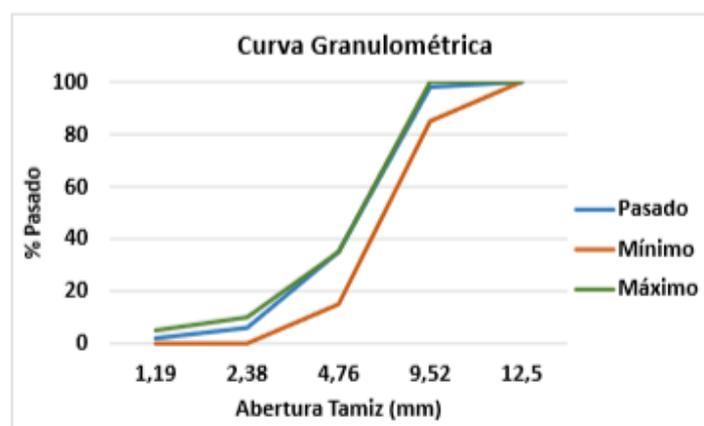
La arena de la cantera El Purio cumple satisfactoriamente con los requerimientos establecidos en la “NC 251-2005 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”.

Árido Grueso.

El granito empleado presenta las siguientes propiedades físicas y granulométricas.

Tabla 2.2 Caracterización del granito. El Purio. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María)

Ensayo	Unidad	Resultado	Especificaciones
Tamaño	mm	10-5	
Peso específico corriente	g/cm ³	2.52*	≥ 2.50
Absorción	%	2.7*	≤ 3
Masa volumétrica suelta	kg/m ³	1418	-
Masa volumétrica compactada	kg/m ³	1573	-
Análisis granulométrico			
Tamices (mm)	% Pasado	Especificaciones	
12.5	100*	100	
9.52	98*	85-100	
4.76	35*	15-35	
2.38	6*	0-10	
1.19	2*	0-5	
Incertidumbre: ± 1.55			
* Conforme, ** No conforme			
El árido en caso de la granulometría es no conforme si al menos en un tamiz el porcentaje pasado no satisface las especificaciones			



Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Gráfico 2.2 Curva granulométrica del granito. El Purio. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María)

El granito de la cantera El Purio cumple con los requerimientos establecidos en la “NC 251-2005 Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”.

Tabla 2.3 Análisis Químico. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María)

Análisis Químico	
Dióxido de silicio (SiO ₂)	0,25
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	1,91
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	3,92
Oxido de calcio (CaO)	50,53
Oxido magnesio (MgO)	0,19
Trióxido de azufre (SO ₃)	0,02
Perdida por Ignición (PPI)	42,89
Residuo Insoluble (RI)	1,11
Carbonatos totales (CT)	90,18



Granito

Arena

Gravilla

Figura 2.1 Áridos usados en el hormigón producido en la ECOT Cayo Santa María (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.4 Gravilla. Fracción 5- 19 mm (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Propiedades		Promedio
Masa Especifica (g/cm ³)	Corriente	2.58
	Aparente	2,68
	Saturado	2,62
Absorción (%)		2,0
Peso Unitario (kg/m ³)	Suelta	1375
	Compactada	1471
Huecos (%)		42.89
Planas y Alargadas (%)		5.7
Partículas de arcillas (%)		0.12

Tabla 2.5 Análisis Granulométrico. Fracción 5-19 mm (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Tamiz	Muestras (% Pasado)	<u>Norma</u>	<u>Evaluación</u>
25.4	100	100	Conforme
19.1	94	90-100	Conforme
9.52	20	20- 55	Conforme
4.76	2	0-15	Conforme
2.38	1	0-5	Conforme
Tamiz 200	1.41 %	1 % Amb. marino	No Conforme

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.6 Granito. Fracción 5- 10 mm (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Propiedades		Promedio
Masa Específica	Corriente	2.50
	Aparente	2,67
	Saturado	2,55
Absorción (%)		2,2
Peso Unitario (kg/m ³)	Suelta	1386
	Compactada	1488
Huecos (%)		41.69
Partículas de arcillas (%)		0,23

Tabla 2.7 Análisis Granulométrico. Fracción 5 - 10 mm (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Tamiz	Muestras (% Pasado)	<u>Norma</u>	<u>Evaluación</u>
12.7	100	100	Conforme
9.52	100	85-100	Conforme
4.76	36	15-35	Conforme
2.36	8	0-10	Conforme
1.19	2	0-5	Conforme
Tamiz 200	1.14 %	1 % Amb. marino	No Conforme

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.8 Arena. Fracción 0.15 - 5 mm (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Propiedades		Promedio
Masa Especi	Corriente	2.52
	Aparente	2,67
	Saturado	2,58
Absorción (%)		2,21
Peso Unitario	Suelta	1547
	Compactada	1602
Huecos (%)		36.48
Planas y Alargadas (%)		-
Partículas de arcillas (%)		0,25
Equivalente de arena (%)		96

Tabla 2.9 Análisis Granulométrico. Árido Fino (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Tamiz	Muestras (% Pasado)	<u>Norma</u>	<u>Evaluación</u>
9.52	100	100	Conforme
4.76	99	90-100	Conforme
2.38	72	70-100	Conforme
1.19	42	45-80	No Conforme
0.59	22	25-60	No Conforme
0.3	10	10-30	Conforme
0.15	4	2-10	Conforme
Tamiz 200	2.15 %	5 % Amb. marino	Conforme
Modulo Finura	3.51	2.2-3.58	No Conforme

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

2.1.2 Cemento

El cemento empleado proviene de la fábrica de cemento Karl Marx de Cienfuegos

Tabla 2.10 Propiedades físico mecánicas del cemento P-35 (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Ensayo	Resultado	Especificaciones
Tiempo de fraguado inicial (min)	150	≥ 45
Tiempo de fraguado final (h)	4:20	≤ 10
Consistencia Normal (%)	24,6	-
Finura de molido (%)	6,5	-
P.E.Real del cemento (g/cm ³)	3,08	-
Resistencia Comp. 7días (MPa)	35,5	≥ 25
Resistencia Comp. 28días (MPa)	42,4	≥ 35
Resistencia Flexo-Tracc. 7días (MPa)	8,6	-
Resistencia Flexo-Tracc. 28días (MPa)	9,5	-

2.1.3 Aditivos

Se usó el aditivo **Sikaplast 9100**

El impacto del aditivo Sikaplast 9100 ha sido significativo para la mejora de las prestaciones de nuestros hormigones producidos con cemento portland

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

ordinario, por primera vez se pueden producir hormigones homogéneos con muy alta fluidez garantizando una R W/C de 0.40 y elevada resistencia a compresión.

Los puntos débiles en su aplicación han estado en la calidad de los áridos producidas en Cuba, que en su gran mayoría provienen de rocas calizas trituradas, donde en el proceso de industrial se pierde el material fino de las arenas y cuando el módulo de finura supera los 3.4 comienzan los graves fenómenos de segregación.

El Sikaplast que empleamos es también sensible a porcentos de arcilla superiores a 3.

La presencia del componente arcilloso (LC2) en el hormigón reduce la efectividad del aditivo Sikaplast 9100, la mezcla se torna más viscosa, disminuye el tiempo laborable del hormigón, por lo que es necesario aplicar dosis por encima del 0.91% del aditivo y lograr una alta fluidez para lograr una permanencia de 2horas.

Datos técnicos.

Tipo: Aditivo líquido

Color: Café oscuro

Densidad: 1.13 kg/L

Modo de empleo.

Preferiblemente agregue Sikaplast 9100CU en el agua de mezcla durante la preparación del hormigón. También se puede agregar al hormigón previamente amasado, ampliando el tiempo de mezclado medio minuto por cada metro cúbico de hormigón. (Sika 2013).

El tiempo de fraguado final del hormigón fue de 5 a 6 horas.

2.1.4 Agua.

El agua empleada es la que se utiliza en la ECOT Cayo Santa María y en el CIDC para la elaboración de hormigones y otros trabajos de laboratorio, la cual

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

se considera adecuada según lo especificado en la “NC 353-2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones”.

2.2 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en la ECM Mariel.

2.2.1 Áridos

Los áridos empleados provienen de la cantera La Molina

Árido Fino

Tabla 2.11 Caracterización de la arena de la cantera La Molina (Fuente: laboratorio ECM Mariel).

ARENA (5-0,15) mm CANTERA LA MOLINA

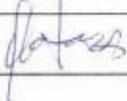
Análisis Granulométrico según NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos.
Requisitos

Abertura de tamices		66	ESPECIFICACIÓN DE CALIDAD (%)
		17/01/2019	
Tamiz	mm	% Promedio Pasado	
3/8"	9,52	100,00	100
N°4	4,76	99,57	90-100
N°8	2,38	76,64	70-100
N°16	1,19	45,26	45-80
N°30	0,59	25,71	25-60
N°50	0,297	11,10	10-30
N°100	0,149	3,34	2-10
TAMIZ # 200		2,71	Max. 3 %
MÓD. DE FINURA		3,38	2.20-3.58

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

OBSERVACIONES:

La muestra resultó CONFORME en el análisis de la granulometría al cumplir las especificaciones de la norma.

Organización	ECM-MARIEL - LABORATORIO	ECM-MARIEL - LABORATORIO
*Aprobado (S o N)	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Función	TÉCNICO	JEFE DEL LABORATORIO
Nombre	Yedry Ustariz	Juan Manuel Rojas
Fecha y Firma	17/01/19 	17/1/19 

Árido Grueso

Tabla 2.12 Caracterización de la gravilla de la cantera La Molina (Fuente: laboratorio ECM Mariel).

GRAVILLA (19-10) mm CANTERA LA MOLINA

Análisis Granulométrico según NC 251: 2013 Áridos para Hormigones Hidráulicos.
Requisitos

Abertura de tamices		68	ESPECIFICACIÓN DE CALIDAD (%)
		17/01/2019	
Tamiz	mm	% Promedio Pasado	
1"	25.4	100,00	100
3/4"	19.1	100,00	90-100
1/2"	12.7	98,94	20-55
3/8"	9.52	44,68	0-15
N°4	4.76	11,00	0-5
N°8	2.38	0,66	-
N°16	1.19	0,55	-
TAMIZ # 200		0,52	≤1%
P y A		7,03	≤10%
TERRONES DE ARCILLA		0,00	≤0.25 %

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

OBSERVACIONES:

La muestra resultó NO CONFORME en el análisis de la granulometría al no cumplir las especificaciones de la norma. La muestra 68 no cumple con todos los rangos granulométricos establecidos.

Organización	ECM-MARIEL - LABORATORIO	ECM-MARIEL - LABORATORIO
*Aprobado (S o N)	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No	<input checked="" type="checkbox"/> Sí <input type="checkbox"/> No
Función	TÉCNICO	JEFE DEL LABORATORIO
Nombre	Yedry Ustariz	Juan Manuel Rojas
Fecha y Firma	17/01/19 	17/1/19 

2.2.2 Aditivos

El aditivo empleado es el Dynamon SRC 20

Es un producto de la empresa italiana MAPEI, es un aditivo de base acrílica modificada, específico para el hormigón preparado y donde sea necesaria una fuerte reducción de agua acompañada por una buena aceleración de las resistencias mecánicas a edades cortas combinadas con un largo mantenimiento de la trabajabilidad en las diferentes clases de consistencia. Sus prestaciones lo hacen particularmente idóneo también para la realización de hormigones autocompactantes, ya que está en poder de garantizar una elevada fluidez. (Mapei, 2010)

Características técnicas

Es una solución acuosa al 22% de polímeros acrílicos (sin formaldehídos) capaces de dispersar eficazmente los gránulos de cemento y de favorecer un desarrollo lento de los productos de hidratación del cemento.

Datos identificativos del producto

Aspecto: líquido

Color: ámbar

Densidad (kg/l): $1,10 \pm 0,02$ a $+20^{\circ}\text{C}$

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Porcentaje extracto seco (%): 25 ± 1.5

Acción principal: aumento de la trabajabilidad y/o reducción del agua de amasado, mantenimiento de la trabajabilidad para largos períodos

Clasificación: superfluidificante retardador, reductor de agua de alta eficacia según UNI EN 934-2

Cloruros: ausentes

Clasificación de peligrosidad según Directiva 88/379 CEE: ninguna

Modo de empleo

Dynamon SRC 20 desarrolla la máxima acción dispersante cuando es añadido después de los otros componentes de la mezcla (cemento, áridos, minerales o filler y al menos un 80% del agua de la mezcla) (Mapei, 2010)

2.2.3 Agua

El agua empleada es correcta para la elaboración de hormigones y otros trabajos de laboratorio, la cual se considera adecuada según lo especificado en la "NC 353-2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones".

2.3 Caracterización de los materiales para hormigones producidos en EPP Remedios.

2.3.1 Áridos

Árido fino (Arena)

La arena proviene de la cantera El Purio

Tabla 2.13 Caracterización de la arena (El Purio) (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Especificaciones Según NC 251-2013		Ensayos realizados(Arena)			Según NC251:2013
9,5	100	Peso Específico	Corriente	2.56	≤ 2.50
4,75	90-100	(g/cm³)	Saturado	2.61	
2,36	70-100		Aparente	2.7	

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

1,18	45-80	Peso Volumétrico	Suelto	1495,5321	
600 μ	25-60	(Kg/m³)	Compactado	1626,7255	
300 μ	oct-30	Absorción		2.27	
		(%)			
150 μ	02-oct	Tamiz 200 (%)		2,3	≤ 5.0
Módulo de finura				3.37	2.20 – 3.58
Porciento de Huecos (%)				36.33	

Tabla 2.14 Análisis granulométrico de la arena (El Purio) (Fuente: Tesis de Carlos Mario)

	Tamiz No.(Arena)					
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm
% Pasado	100	69	50	27	15	3
NC 251:2013	90-100	70-100	45-80	25-60	10.-30	2.-10

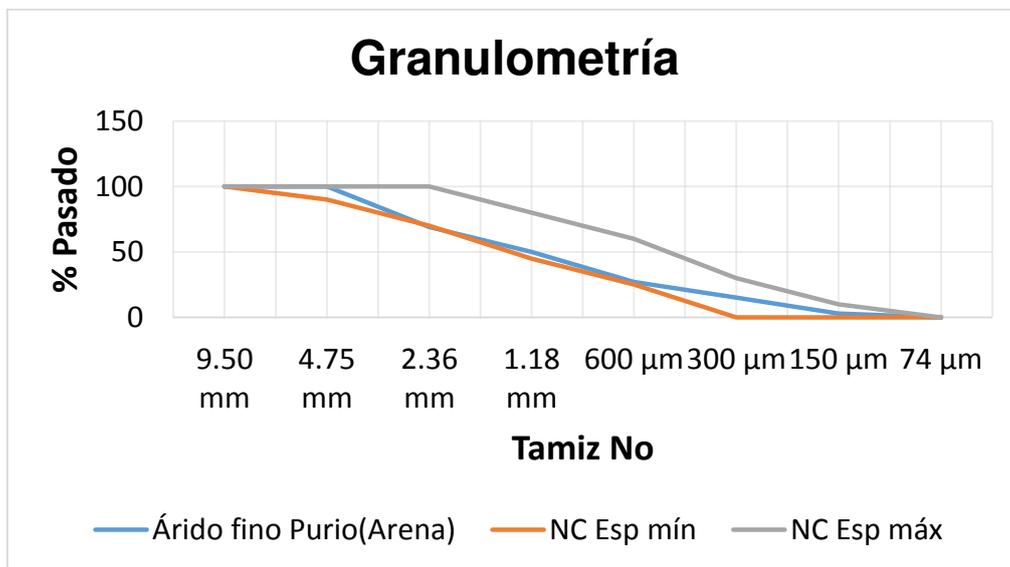


Gráfico 2.3 “Comparación entre la granulometría del árido fino(arena) y las especificaciones de la NC 251:2013.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Observación: El árido fino (arena) se define como un material que cumple con las especificaciones de la norma NC 251:2013, pero se observa un mayor contenido de partículas gruesas en su granulometría.

Árido fino (Polvo)

El polvo proviene de la cantera Palenque

Tabla 2.15 Caracterización del árido fino (Palenque) (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Especificaciones Según NC 251-2013		Ensayos realizados(Polvo)			Según NC251:2013
9,5	100	Peso Específico	Corriente	2,61	≤2.5
4,75	90-100	(g/cm ³)	Saturado	2.93	
2,36	70-100		Aparente	2.84	
1,18	45-80	Peso Volumétrico	Suelto	1.564	
600 μ	25-60	(Kg/m ³)	Compactado	1.726	
300 μ	oct-30	Absorción (%)	3.13		
150 μ	02-oct	Tamiz 200 (%)	3.58		≤ 5.0
Módulo de finura			2.94		2.20 – 3.58
	Porciento de Huecos (%)		33.86		

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.16 Análisis granulométrico del polvo (Palenque). (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

	Tamiz No.(Polvo)					
	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 μm	300 μm	150 μm
% Pasado	99	72	54	37	25	7
NC 251:2013	90-100	70-100	45-80	25-60	10.-30	2.-10

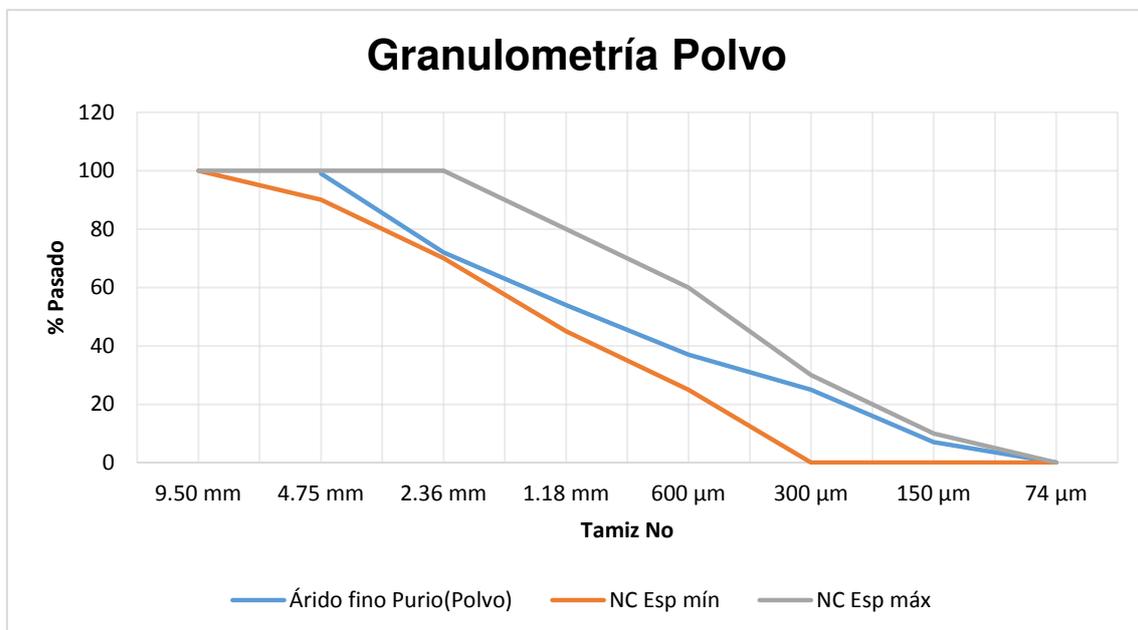


Gráfico 2.4 “Comparación entre la granulometría del polvo (Palenque) y las especificaciones de la NC 251:2013.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Observación: El árido fino (polvo) se define como un material que cumplen con las especificaciones de la norma NC 251:2013, teniendo un mayor contenido de partículas gruesas en el tamiz 8 (2 36mm) y un mayor contenido de partículas finas del tamiz 50 (300 μm) en adelante.

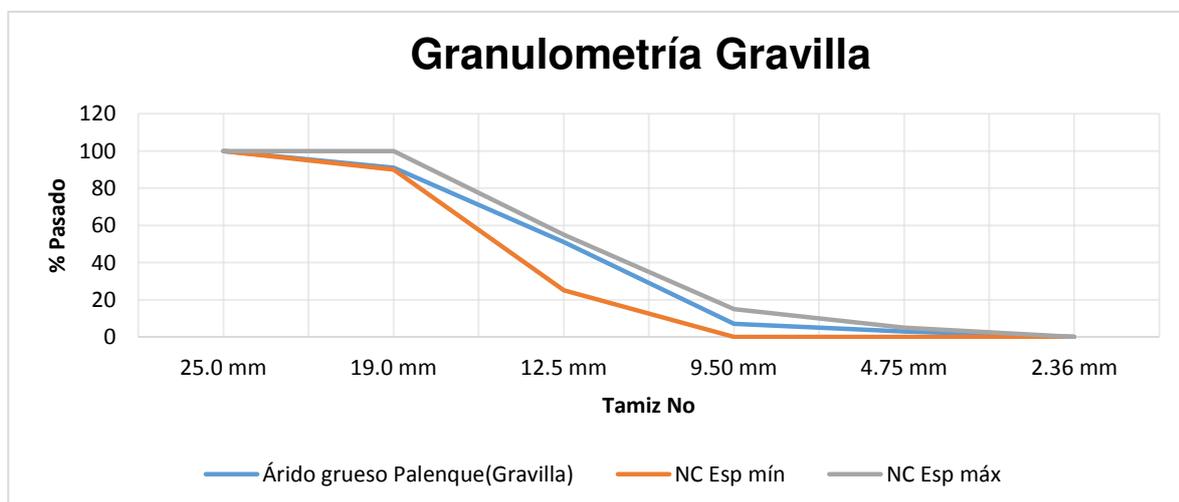
Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Árido Grueso (Gravilla).

Tabla 2.17 Caracterización del árido grueso (Palenque) (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Gráfico 2.5 Comparación entre la granulometría de la gravilla (Palenque) y las especificaciones de la NC 251:2013.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Especificaciones Según NC 251-2013		Ensayos realizados.(Gravilla)			SNC251:2013
32.0	100	Peso Específico	Corriente	3.03	≥ 2.50
25.0	100	(g/cm ³)	Saturado	3.07	
19.00	90-100		Aparente	3.17	
12.5	25-55	Peso Volumétrico	Suelto	1404.89	
9,5	7-15	(Kg/m ³)	Compactado	1592.39	
4,75	3-5	Absorción (%)	1.48		
2,36	0	Tamiz 200 (%)	0.28		≤ 1.0
Módulo de finura		7.01			
Porcentaje de Huecos (%)		47.45			



Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Observación: En general todas las características cumplen con las especificaciones de la norma, aunque el porcentaje de huecos es algo elevado.

Tabla 2.18 “Análisis granulométrico. Áridos gruesos (Palenque). (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

	Tamiz No.(Gravilla)					
	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm
% Pasado	100	91	51	7	3	0
NC 251:2013	100	90-100	25-55	0-15	0-5	0

El árido grueso (gravilla) se define como un material que cumple con las especificaciones de la norma NC 251:2013, pero se observa en el tamiz 19.0mm, un porcentaje mayor de contenido de partículas gruesas en su granulometría.

2.3.2 Cemento

El cemento empleado proviene de la fábrica de cemento Karl Marx de Cienfuegos (ver **Tabla 2.10**).

2.3.3 Aditivos

Se empleó el aditivo **Sikaplast 9100**, ver epígrafe [2.1.3 Aditivos](#)

Además, se utilizó un aditivo superplastificante (**Dynamon SX32**), a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehído que constituye un superfluidificante para reducir el agua de amasado sin perder laborabilidad. Las principales características de este aditivo son el aumento de la trabajabilidad y la disminución de la relación agua-cemento, proporcionándole, por ende, una baja permeabilidad y una alta resistencia mecánica. La dosificación para este producto en volumen puede variar entre 0,5 y 1,5 litros por cada 100 kg de cemento.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Es un producto de la empresa italiana MAPEI, es un aditivo líquido superplastificante para hormigones con bajísima pérdida de trabajabilidad y elevada reducción del agua de amasado, es un aditivo a base de polímeros acrílicos no sulfonados, completamente exento de formaldehidos. (Mapei, 2010)

Características técnicas

Consistencia: Líquido

Color: Ámbar

Densidad según ISO 758 (g/cm³): 1,08±0,02 a 20°C

Residuo seco según EN 480-8 (%): 22,1±1,1

Acción principal: Aumento y conservación de la trabajabilidad y/o reducción de agua

Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%): <0,1

Contenido de álcali (Na₂O) equivalente según EN 480-12 (%): <3,5

pH según la ISO 4316: 6,5±1

Modo de empleo.

Existen dos formas de añadir el Dynamon SX32 a la mezcla, la primera es añadirlo después de los componentes de la mezcla (cemento, áridos, añadidos minerales o filler y, al menos, el 80% del agua de la mezcla) y la segunda es disolverse previamente en el agua total de amasado. (Mapei, 2010)

Se empleó el aditivo **Dynamon SRC 20**, ve epígrafe [2.2.2 Aditivos](#)

2.3.4 Agua

El agua empleada es correcta para la elaboración de hormigones y otros trabajos de laboratorio, la cual se considera adecuada según lo especificado en la "NC 353-2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones".

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

2.4 Diseño de mezclas

2.4.1 ECOT Cayo Santa María

El diseño de mezclas se realizó mediante el método de las curvas de Bolomey y Füller y estuvo dirigido principalmente a ajuste de los cambios inducidos sobre la base de los diseños aprobados. El cemento, LC2 y el aditivo químico fueron las variables empleadas durante el experimento

Las siguientes tablas muestran las dosificaciones empleadas para el diseño de las mezclas de hormigón con diferentes sustituciones de LC2

Tabla 2.19 Dosificación 1m³ para una sustitución de un 15% con LC2 (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Cemento Cienfuegos	350.0	Kg
Agua	173	lts
Arena 0-5 mm El Purio	968	Kg
Gravilla 5- 19 mm Purio	720	Kg
Granito 5-10 mm Purio	137	Kg
Aditivo Sikaplast 9100.CU	3.38 (0.95%)	Lts Es el % peso del Cto + LC2
Filler. LC2	53	Kg
Suma	2389	Kg

Tabla 2.20 Dosificación 1m³ para una sustitución de un 30% con LC2 (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Cemento Cienfuegos	350.0	Kg
Agua	178	lts
Arena 0- 5 mm El Purio	894	Kg
Gravilla 5- 19 mm Purio	665	Kg
Granito 5-10 mm Purio	126	Kg

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Aditivo Sikaplast 9100.CU	3.83 (0.95%)	Lts Es el % peso del Cto + LC2
LC2	105	kg
Suma	2340	Kg

Tabla 2.21 Dosificación 1m³ para una sustitución de un 45% con LC2 (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Cemento Cienfuegos	350.0	Kg
Agua	198	Lts
Arena 0- 5 mm El Purio	865	Kg
Gravilla 5- 19 mm Purio	644	Kg
Granito 5-10 mm Purio	122	Kg
Aditivo Sikaplast 9100.CU	4.27 (0.95%)	Lts Es el % peso del Cto + LC2
Filler. LC2	158	Kg
Suma	2343	Kg

2.4.2 ECM Mariel

Se trabajó con la dosificación GVD-31, realizada por la ENIA VC para hormigones de 30 MPa. La sustitución de LC2 fue de un 30%

Los datos de la dosificación se presentan en la **Tabla 2.22** (Fuente: laboratorio ECM Mariel).

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Materiales para 1 m ³		Para la amasada		Corregida por H. T.
Cemento P35(kg):	266	Cemento (kg):	15.960	15.960
Agua (L):	160	Agua (L):	9.600	8.948
Aditivo (L)	7.464	Aditivo (L)	0.448	0.448
Arena 1 (kg)	904	Arena 1 (kg)	54.259	56.520
Grueso 1(kg)	1020	Grueso 1(kg)	61.186	61.186
Adición LC2 (kg)	114	Adición (kg)	6.840	6.840

R A/C amasada:	0.42	Agua neta (L):	149
-----------------------	-------------	-----------------------	------------

2.4.3 EPP Remedios

En la presente investigación se emplea una dosificación para obtener hormigones de 35MPa. Los aditivos se emplean con el objetivo de reducir el agua de amasado y lograr una buena trabajabilidad

En la siguiente tabla se especifican los porcentos de aditivos empleados en cada muestra, estos porcentos siempre se expresan con relación a la masa del cemento

Tabla 2.23 Dosificaciones de aditivos para 1m³ de hormigón. (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Con respecto al contenido de cemento			Protocolo 1
Aditivos	Patrón	40 % LC2	100%
Sikaplast 9100	0.5%	1.2%	4.79L
Dynamon SX32	1%	2%	8.33L
Dynamon SRC 20	1%	2%	8.2L

Las mezclas se diseñan según la dosificación empleada en la EPP Remedios para lograr hormigones de 35MPa.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Tabla 2.24 Dosificaciones para 1 m³ de hormigón de la EPP Remedios (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Muestra	NC 120:2014	f'c	Relación a/c	Cemento	Aditivo Dynamon SX32	Polvo	Arena	Gravilla	Agua
				Kg	l	Kg	Kg	Kg	l
P-35	Muy Alta	35	0,44	450	5	235	547	882	198

Tabla 2.25 Dosificaciones de aditivos para producir 20 litros (0,02m³) (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

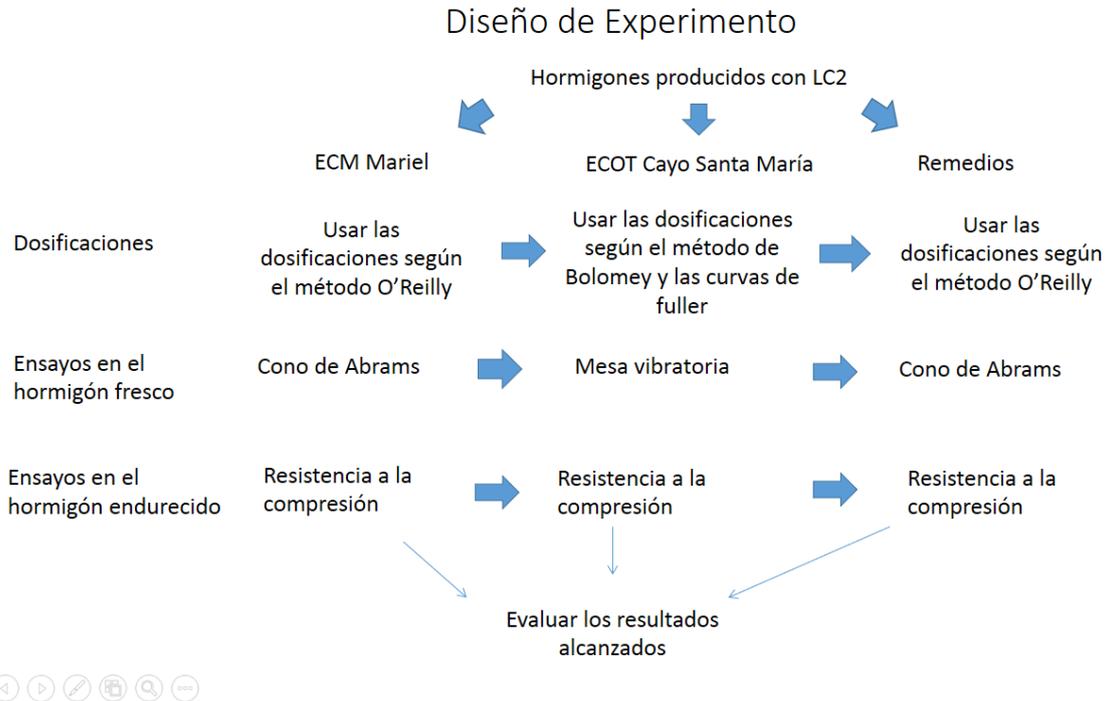
Con respecto al contenido de cemento			Protocolo 1
Aditivos	Patrón	40 % LC ²	100%
Sikaplast 9100	0.5%	1.2%	0.096L
Dynamon SX-32	1%	2%	0.17L
Dynamon SRC-20	1%	2%	0.164L

Tabla 2.26 Dosificaciones.20L de hormigón. (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

P 35 Hormigones		
Material	Muestra Patrón	40 % LC ²
Relación a/c	0.44	0.44
Cemento kg	9	5.4
LC2 kg	0	3.6
A. Grueso kg	17.6	17.6
A. Medio kg	11.3	11.3
A. Fino kg	4.7	4.7
Agua l	3.96	3.96

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

2.5 Diseño Experimental.



2.6 Ensayos en el hormigón fresco (Asentamientos)

Durante la elaboración del hormigón se llevó a cabo el chequeo del asentamiento mediante la medición por el cono de Abrams según establece la “(NC.ISO1920-2, 2010) Ensayos al hormigón Parte 2:Propiedades del hormigón endurecido.

El ensayo se realiza relleno un molde metálico, previamente humedecido, con forma de cono trunco, cuyas dimensiones son: 20 cm de diámetro en su base mayor, 30 cm de altura y 10 cm de diámetro en su base menor, con tres capas de hormigón compactadas con 25 golpes de varilla cada una, distribuidas de manera uniforme en forma de espiral y logrando que la varilla de compactación penetrara de forma leve la capa subyacente, al agregar la última capa se deja que el hormigón sobresalga del borde del molde y se enrasa la superficie con la varilla de compactación, los restos de hormigón sobrante se retiran de los alrededores del molde.

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

Luego de retirar el molde se mide el asentamiento que experimenta la masa de hormigón colocada en su interior. El molde metálico se levanta de forma rápida y en dirección vertical, sin movimientos laterales ni torsión. La operación de extraer el molde se realiza en aproximadamente 5 segundos y todas las operaciones, incluyendo llenado, compactación y extracción del molde se realizan de forma ininterrumpida en aproximadamente 2,5 minutos.

Una vez levantado el molde se mide inmediatamente la disminución de altura del hormigón moldeado respecto al molde. De esta manera, la medida del asiento permite determinar principalmente la consistencia del hormigón.

Tabla 2.27 “Clasificación del asentamiento por el cono de Abrams.” (Fuente: “NC:120, 2014 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono”).

Tipo	Valoración cualitativa	Asentamiento (mm)
A1	Seca	10 a 40
A2	Plástica	50 a 90
A3	Blanda	100 a 150
A4	Fluida	160 a 210
A5	Muy Fluida	≤220

2.7 Ensayos en el hormigón endurecido (Resistencia a compresión)

El ensayo se lleva a cabo empleando una prensa o máquina estándar de ensayo a compresión, la máquina está calibrada y se verifica anualmente (NC:724, 2015)

La carga se aplica sin saltos bruscos y se incrementa continuamente a una velocidad constante hasta que no pueda ser sostenida una carga mayor. Seleccionando una velocidad de aplicación de los esfuerzos no menor de 0,15 MPa/s y no mayor de 1 MPa/s. (NC:724, 2015)

Capítulo II: Evaluación de las propiedades de las mezclas en estado fresco y endurecido.

2.8 Conclusiones parciales

1. Las diferencias entre los áridos, cementos, aditivos y sustituciones de LC2 hacen imposible establecer una comparación para poder determinar la dosificación ideal
2. Los diseños de las mezclas se hicieron por diferentes métodos, el de Bolomey y el O'Reilly, lo que manifiesta la heterogeneidad en la producción de estos hormigones.
3. La gravilla empleada en la ECM Mariel fue extraída de la cantera La Molina y no cumple con los requerimientos establecidos en la NC 251-2005

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

Introducción.

En este capítulo se exponen los resultados alcanzados durante la evaluación de los hormigones producidos en la ECM Mariel, ECOT Cayo Santa María y la EPP Remedios, expuestos a diferentes ambientes de agresividad. Se evaluaron las resistencias a compresión durante los periodos de 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días de los mismos, así como los asentamientos mediante el cono de Abrams y la mesa vibratoria.

3.1 Ensayos realizados al hormigón fresco

3.1.1 Asentamientos en la ECOT Cayo Santa María

Durante la elaboración del hormigón se llevó a cabo el chequeo del asentamiento mediante la medición por la mesa vibratoria.

La siguiente tabla muestra los resultados

Tabla 3.1 Hormigones, combinaciones de LC2 y asentamientos. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Muestra	Exten (cm)	Agua Efectiva	R a/c	% LC2	OPC	LC2	OPC+LC 2	% Sikaplast
Mezclas. J. Artiles								
15% LC2	56	173	0.43	13	350	53	403	0.96
30% LC2	52	182	0.4	23	350	105	455	0.96
45% LC2	53	203	0.4	31	350	158	508	0.96
Patrón	55	186	0.4	0	350	0	350	0.96

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

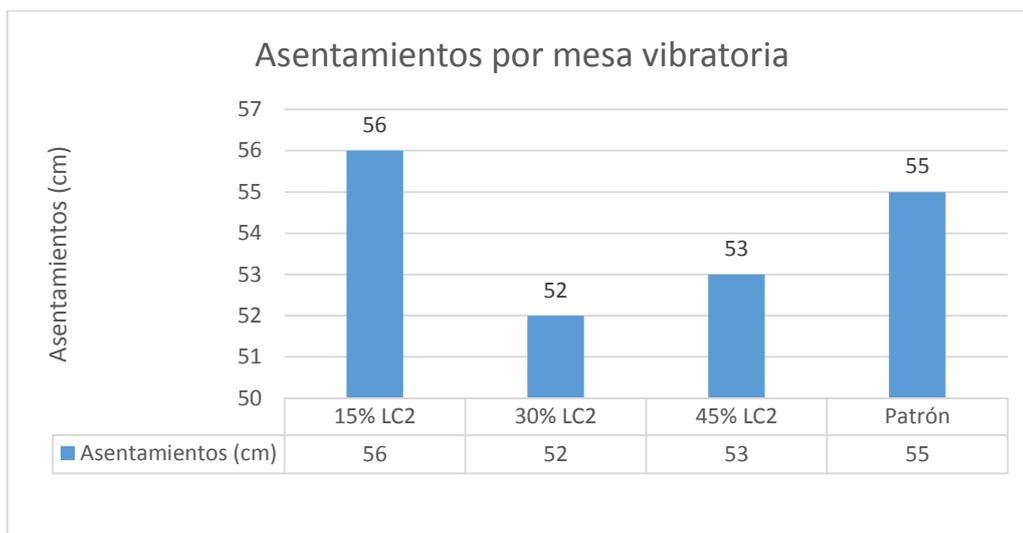


Gráfico 3.1 Valores de Asentamiento en Cayo Santa María.

3.1.2 Asentamientos en el Mariel

Durante la elaboración del hormigón se llevó a cabo el chequeo del asentamiento mediante la medición por el cono de Abrams según establece la “NC 174-2002 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono”.

Debido a que este ensayo da resultados muy bajos, se procede a añadir aditivo para obtener un mejor resultado, este proceso se lleva a cabo varias veces por lo que no se puede afirmar que la dosis final de aditivo añadida a las mezclas es de un 1 %, este resultado pudo haber variado al igual que la relación a/c.



Asent= 7.5 cm

A/C= 0.38

%SP= 1.23



Asent= 13 cm

A/C= 0.40

%SP= 1.54



Asent= 19 cm

A/C= 0.42

%SP= 1.84



Asent= 21 cm

A/C= 0.42

%SP= 2.00

Figura 3.1 Resultados de los asentamientos por el cono de Abrams (Fuente: laboratorio ECM Mariel).

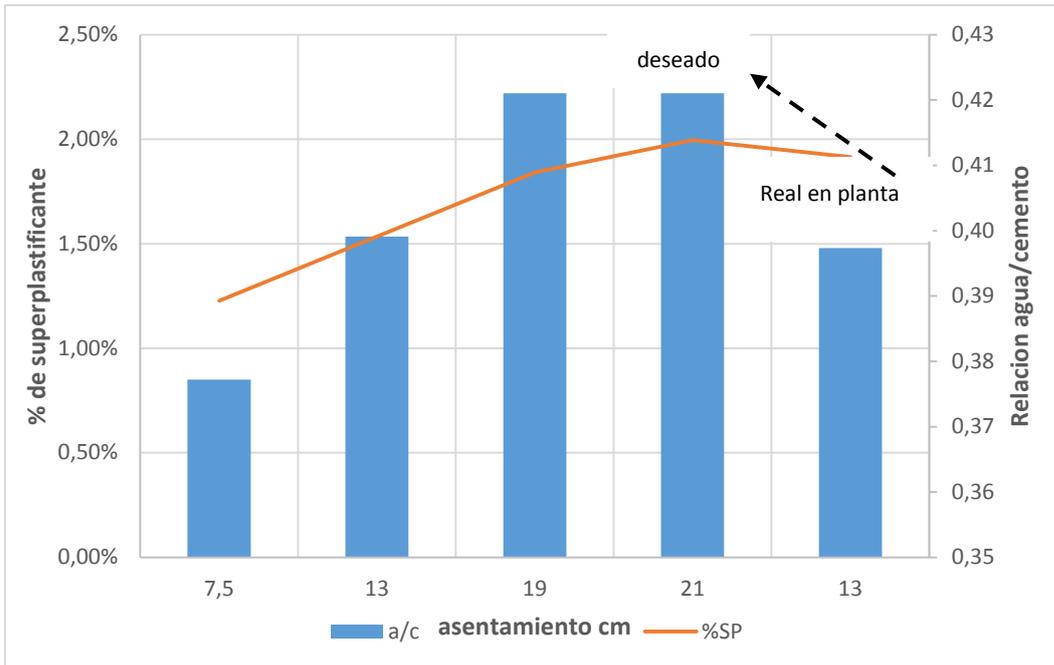


Gráfico 3.2 asentamientos obtenidos a escala de laboratorio y en planta

3.1.3 Asentamientos en Remedios.

Durante la elaboración del hormigón se llevó a cabo el chequeo del asentamiento mediante la medición por el cono de Abrams según establece la “NC 174-2002 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono”.



Figura 3.2 Medición del asentamiento por el cono de Abrams. (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

En el primer instante que se añade aditivo gran parte de este, es absorbido rápidamente por el cemento obteniendo una mezcla fluida y muy laboriosa, propiedad que va perdiendo con el tiempo.

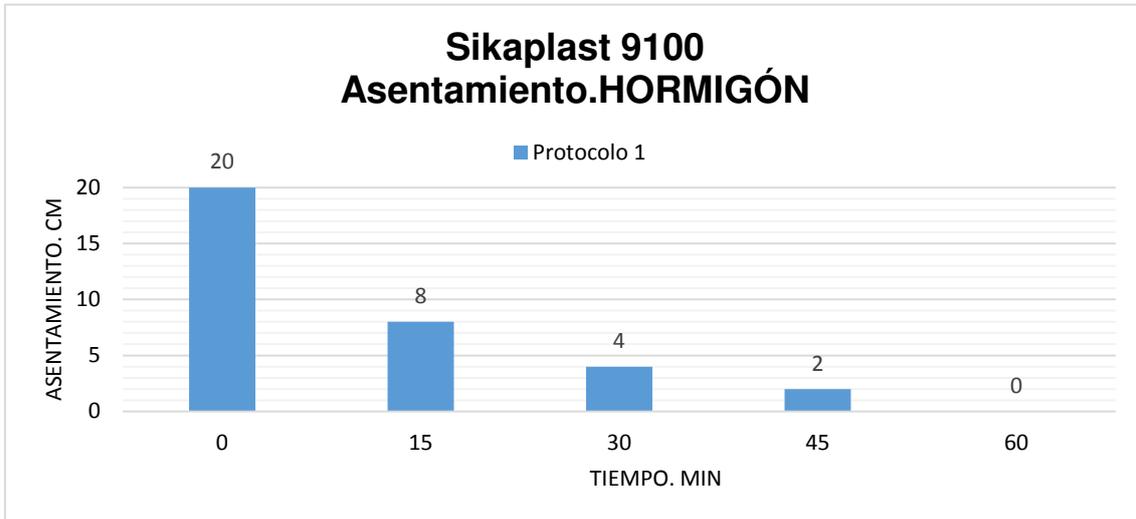


Gráfico 3.3 “Valores obtenidos del asentamiento en hormigones con (40%LC2+60%P35) en el protocolo 1 con el aditivo Sikaplast 9100.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Con el aditivo Sikaplast 9100 en hormigones se logró mantener asentamientos hasta los 45 minutos.

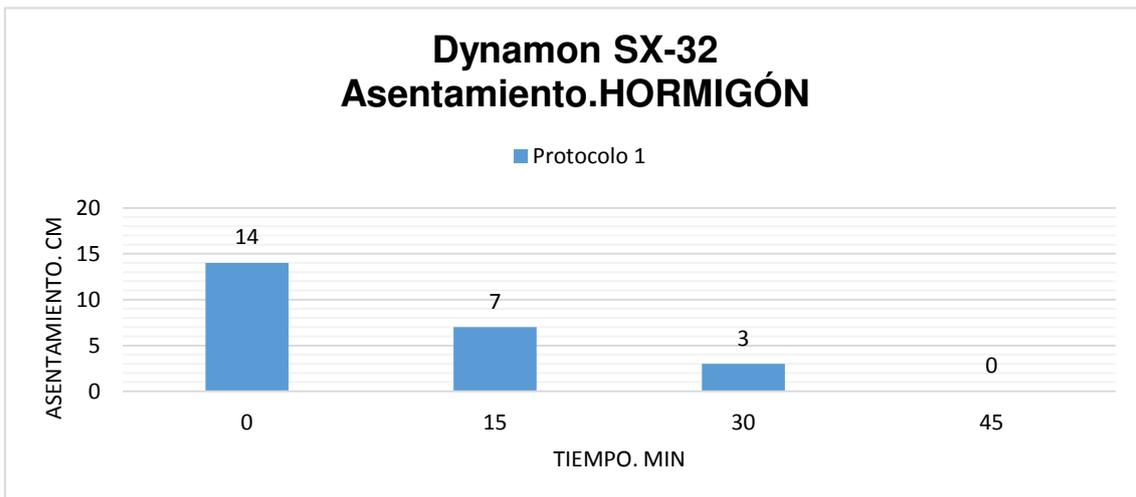


Gráfico 3.4 “Valores obtenidos del asentamiento en hormigones con (40%LC2+60%P35) en el protocolo 1 con el aditivo Dynamon SX-32.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

Con el aditivo Dynamon SX32 en el primer protocolo, se logró mantener asentamientos hasta los 30 minutos.

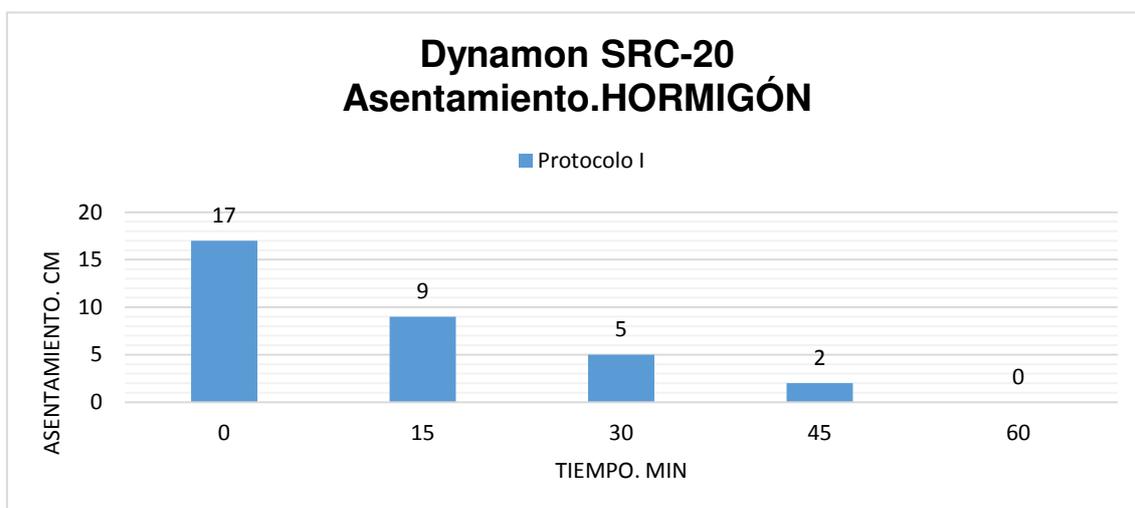


Gráfico 3.5 “Valores obtenidos del asentamiento en hormigones con (40%LC2+60%P35) en el protocolo 1 con el aditivo Dynamon SRC-20.” (Fuente: Tesis de Carlos Mario).

Cuando se analiza el asentamiento en el primer protocolo se ve una gran y rápida pérdida de consistencia en la mezcla, valores que se pudieron mantener hasta los 45 min.

Se puede apreciar el efecto del Dynamon SRC 20 y el del Sikaplast 9100 como los aditivos que mejores resultados presentan y el Dynamon SX-32 el que pierde su consistencia en menor tiempo. Al sustituir contenido de clínker por arcilla calcinada y carbonato de calcio, aumenta la superficie de contacto del cemento y áridos con el agua, provocando una mayor demanda de esta, al agregarle aditivo a la mezcla este actúa como fluidificante, recubriendo individualmente las partículas de cemento, adquiriendo entre ellas la misma carga eléctrica superficial y en consecuencia se repelen recíprocamente, impidiendo que se agrumen. De esta manera disminuye la resistencia que se opone a la movilidad de la mezcla.

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

3.2 Ensayos realizados al hormigón endurecido.

3.2.1 Resistencia obtenida en la ECOT Cayo Santa María.

Los ensayos de resistencia en la ECOT Cayo Santa María se realizaron solamente a 24 horas, 3 días, 7 días y 90 días en el caso de las series 15% LC2, 30% LC2, 45% LC2 y el Patrón

Tabla 3.2 Resistencia de los hormigones a las diferentes edades (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

Prueba Artiles. Santa María. 22/05/2018									
Mezcla	Fecha	Resistencia a Compresión (MPa)					Extensión (cm)	R a/c	Poros . %
		Laboratorio Artiles							
		24h	3 días	7 días	28 días	90 días			
		Rbm	Rbm	Rbm	Rbm	Rbm			
15% LC2	22/05/2018	21.2	34.7	46.4		68.05	56	0.43	13.26
30% LC2	22/05/2018	20	35.2	47.9		76.8	52	0.4	13.36
45% LC2	22/05/2018	17.2	32.9	46.8		79.9	53	0.4	14.47
Patrón	10/03/2018	25.1	38.4	48.2	56.3	60.6	55	0.4	9.2

En el gráfico siguiente se muestran los resultados obtenidos de los hormigones en estado endurecido.

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

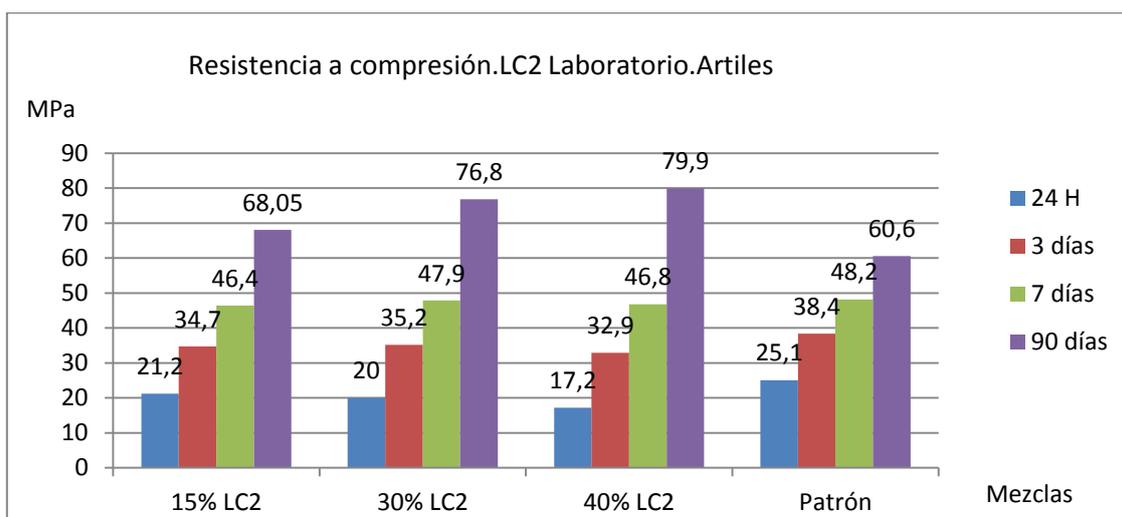


Gráfico 3.6 Resistencia a compresión de hormigones elaborados con LC2 en la ECOT Cayo Santa María. (Fuente: laboratorio ECOT Cayo Santa María).

3.2.2 Resistencia obtenida en el Mariel.

Los resultados de los ensayos de resistencia a compresión muestran en el gráfico 3.6. En esta se presentan los resultados de la resistencia a los 3, 7 y 28 días. Se usan de referencia algunos valores de los hormigones producidos con la misma dosificación, pero usando solamente P35 (380 kg/m³).

Los bajos resultados de resistencia a 3 días de las mezclas con LC2 tienen que ver con las altas dosis de aditivo usadas (casi el doble en relación a las muestras de referencia), y se genera un incremento de la dosis de retardador en el aditivo. Se trabaja con los suministradores de aditivos para resolver el problema (disminuir la dosis de retardador en el aditivo)

A partir de 7 días los hormigones de prueba producidos superan a la gran mayoría de las mezclas producidas en ECM Mariel con resistencias alrededor de los 50 MPa a los 28 días en ambos casos, entre un 15-20% de incremento, a pesar de haber disminuido 140 kg de cemento P35 en la mezcla, al sustituirlos por similar cantidad de LC2. El índice de consumo de cemento P35 baja a 266 kg/m³ y el rendimiento sería en el orden de 0.58 kg/cemento por kg/cm² de resistencia, es decir, casi tres veces más bajo que el promedio del país, para tan altos valores de resistencia.

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

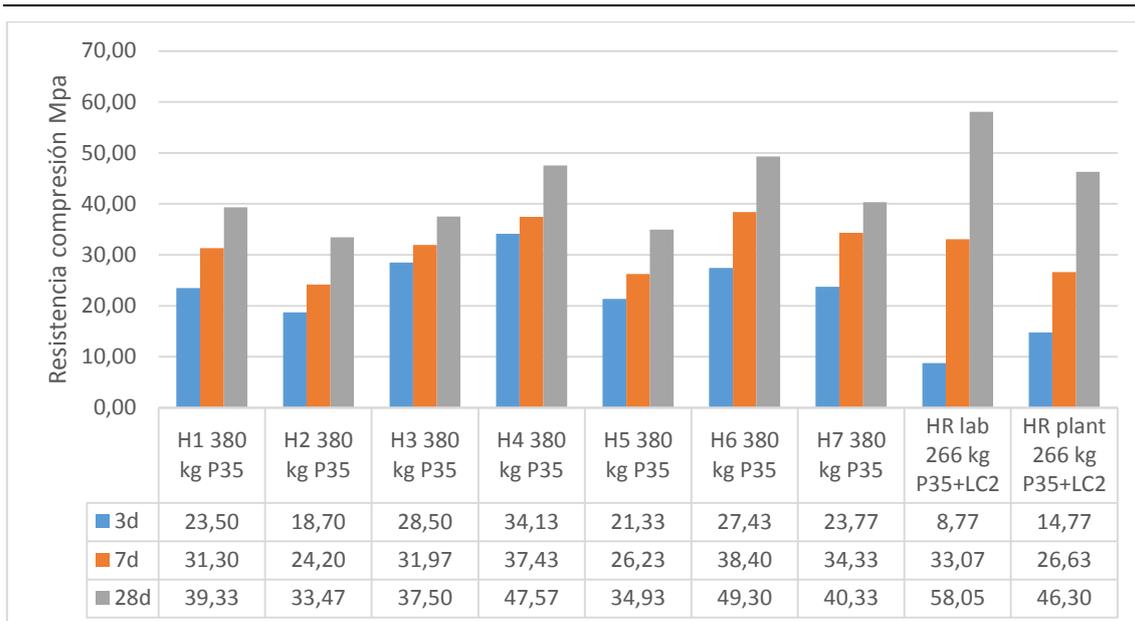


Gráfico 3.7: Resultados de resistencia a compresión en los hormigones ensayados y muestras industriales producidas. (Fuente: laboratorio ECM Mariel).

3.2.3 Resistencia obtenida en Remedios.

Una de las propiedades más importantes por las que se rigen todos los sistemas constructivos es la resistencia que presenta los hormigones con los que son elaborados, por eso es evidente analizar cuánto puede afectar el cambio de una dosificación a esta propiedad. El ensayo de resistencia a la compresión se realizó a las 24h, 3, 7 y 28 días de curado en el tanque, obteniéndose los siguientes resultados.

En las muestras producidas con P35 se observa que a la edad de 7 días todas están por encima de 35MPa y se espera que alcancen a los 28 días valores elevados de resistencia, siendo el Sikaplast 9100 el aditivo que mejores resultados nos ofrece alcanzando resistencias mayores de 40MPa.

Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

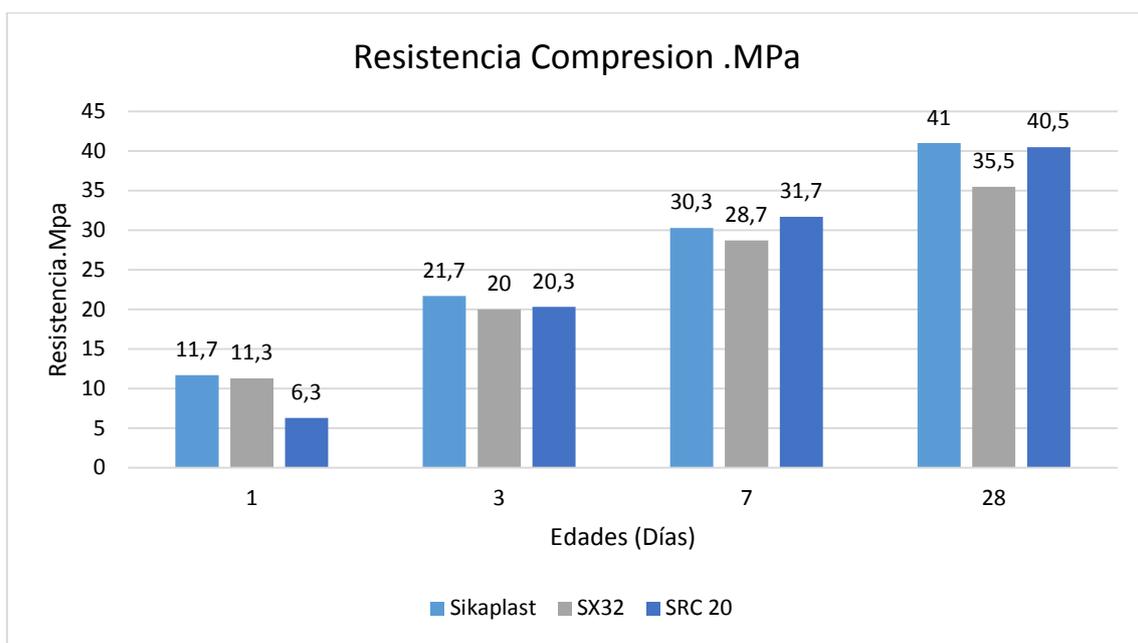
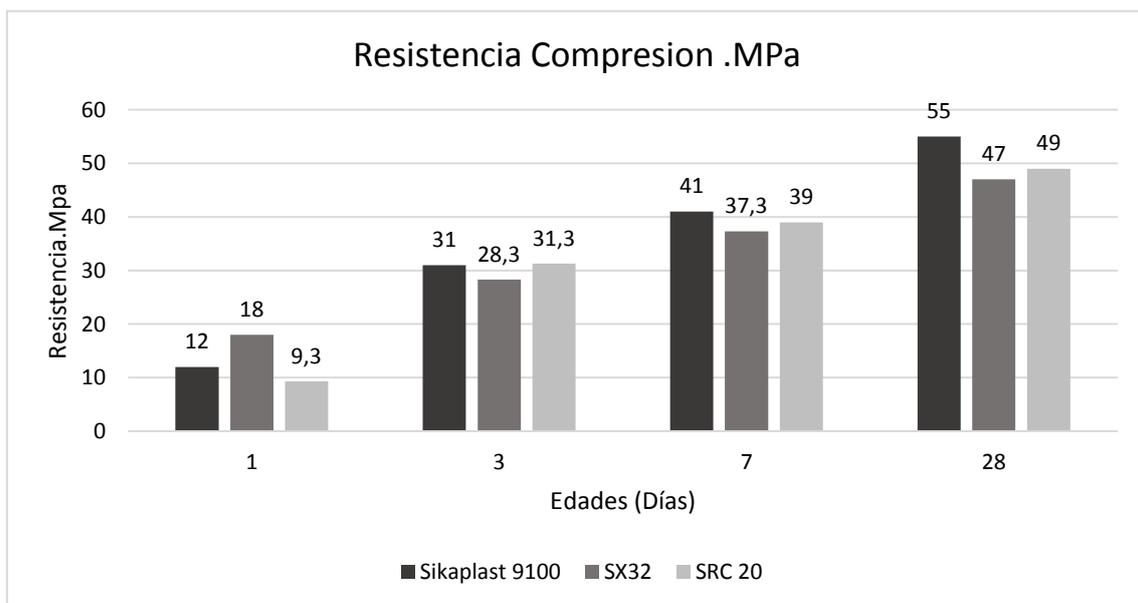


Gráfico 3.8 “Comparación de resistencia a compresión en hormigones con (40%LC2+60%P35) y los diferentes aditivos (Sikaplast 9100, Dynamon SX32, Dynamon SRC 20).”

Las mezclas con (40%LC2+60%P35) a las edades de 28 días cumplen todas con la resistencia para la que fueron diseñadas (35Mpa), siendo el Dynamon SX32 el aditivo que menores valores adquiere, estando casi en el límite permisible, en cambio el Sikaplast 9100 y el Dynamon SRC 20 logran adquirir resistencia por encima de los 40Mpa siendo el primero el que mejor lo hace.



Capítulo III: Estudio, discusión y análisis de resultados.

Gráfico 3.9 “Comparación de resistencia a compresión en hormigones con P35 y los diferentes aditivos (Sikaplast 9100, Dynamon SX32, Dynamon SRC 20).”

Las mezclas con P35 a las edades de 28 días cumplen todas con la resistencia para la que fueron diseñadas (35Mpa), siendo el Dynamon SX32 el aditivo que menores valores adquiere y el Sikaplast 9100 y el aditivo que mejores resultados alcanzó logrando resistencias por encima de los 50Mpa.

Conclusiones parciales

1. A pesar de no existir una adecuada coordinación entre las diferentes empresas que realizaron las pruebas se lograron resultados satisfactorios en cuanto a resistencia, siendo las edades tempranas las más afectadas.
2. Los asentamientos medidos por el cono de Abrams arrojan resultados en las mezclas que oscilan entre plásticas y fluidas.
3. Las resistencias obtenidas en la EPP Remedios demuestra que el aditivo Sikaplast 9100 es el que mejor se comporta en este parámetro y en el asentamiento es el Dynamon SRC 20.

Conclusiones Generales

1. Los materiales cementicios suplementarios son sumamente importantes en la producción de hormigones debido a sus características puzolánicas, su uso es muy generalizado por las propiedades que estos le pueden conferir al hormigón, resistencia mecánica, a la penetración de agentes externos, baja porosidad, entre otras.
2. Para la realización de este trabajo se recopilaron datos de hormigones producidos con LC2 en la ECM Mariel, ECOT Cayo Santa María y EPP Remedios con diferentes dosificaciones.
3. Los hormigones elaborados con LC2 garantizan la resistencia y la laborabilidad necesarios para poder ser usados a gran escala en la producción, solo presentan un problema, y es que a edades muy tempranas su resistencia es relativamente baja.

Recomendaciones

1. Realizar investigaciones más profundas y homogéneas sobre los hormigones producidos con LC2 para lograr hacer comparaciones y determinar dosificaciones más factibles
2. Tomar los resultados y conclusiones de este trabajo diploma para estudios posteriores relacionados con el LC2.

Referencias bibliográficas

Ángel, M., Barbudo, S. & Yepes, C., *INTRODUCCIÓN A LA FABRICACIÓN Y NORMALIZACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND*,

Anon, (PDF) Desarrollo y producción industrial de un cemento de bajo carbono en Cuba.

Anon, 2012. GESTIÓN Y ANÁLISIS DE.

Anon, Hormigones de altas prestaciones.

Calleja, P.J., 1983. “ Adiciones y cementos con adiciones ”*.

Cancio, Y., 2017. Limestone calcined clay cement as a low-carbon solution to meet expanding cement demand in emerging economies. , 2(May 2016), pp.82–91.

Carrera, T.F. De, Alejandro, A. & Martínez, R., 2014. Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional , con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana.

Cenizas, L., CIP 30 - Adiciones al cemento ¿.

De, P., 2006. 6. Proceso de fabricación del hormigón. , pp.51–57.

Fielding, R., 2019. LC3 : de chocolate y Ron. file:///F:/Tesis/Bajado%2015-5-19/LC3-ForImmediateRelease_PressRelease-SPANISH.pdf

François Avet, K. S. (2018). Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3).

Guerra, E.P., 2015. Primera ronda de evaluación de durabilidad de los elementos colocados en el sitio de exposición de Cayo Santa María (cloruros y permeabilidad al aire). , pp.2014–2015.

Ing, D., Giordani, C. & Leone, I.D., Docentes: Ing. Claudio Giordani Ing. Diego Leone 1º Año Ingeniería Civil – Comisión 02 – Turno Tarde. , pp.1–10.

Ingenier, E. & Grupo, U.C. V, Escuela Ingeniería en Construcción - UCV Grupo de Hormigón.

KOSMATKA, S. H. K., BEATRIX; PANARESE, WILLIAM C.; Y TANESI, JUSSARA: 2004. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. In: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (ed.). Skokie, Illinois, EE.UU.

Karen Scrivener, F. M. (2017). Calcined clay limestone cements (LC3).

Lara, R.C., 2010. Puzolanas de alta reactividad a partir de la activación térmica y mecánica.

MARTIRENA, D. J. F. 2018. Cuba produce cemento ecológico menos costoso y más resistente. *Cubadebate*.

NC.ISO1920-2 2010. Ensayos al hormigón Parte 2:Propiedades del hormigón endurecido.

NC:724 2015. Ensayos de hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido.

NC:120, 2014. Hormigón hidráulico-especificaciones.

Pérez, C.E., INDUSTRIALIZADOS A BASE DE ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN ”.

Prescripciones, P.D.E. & Particulares, T., Aditivos para hormigones.

Rica, U.D.C., 2012. Concreto hidráulico: Usos y aplicaciones.

Rodríguez, S.B., 2015. Fraguado y endurecimiento del cemento Portland. , (14), pp.1–12.

Scrivener, K. L. 2014. Options for the future of cement. *Indian Concr. J*, 88, 11-21.

Villas, L. & Hern, F.M., 2015. Cemento de bajo carbono gana espacio en el mundo. , pp.8–11.

Vizcaíno Andrés, L.M., 2015. *CEME*

Vizcaíno, A. (2014) Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada -caliza. Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas: Santa Clara. Editorial Universitaria

NTO DE BAJO CARBONO A PARTIR DEL SISTEMA CEMENTICIO TERNARIO CLÍNQUER – ARCILLA CALCINADA – CALIZA, Editorial Universitaria.