

*Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Carrera de Ingeniería Civil*



**Propuesta de diseño de mezcla para la elaboración del
hormigón en la Empresa Militar de Proyectos e
Investigaciones FAR No-4**

Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil

Autor: Sandy García Macías

Tutor: Ing. Liset León Consuegra

Matanzas, 2019

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declaro que soy el único autor de este trabajo de diploma y, en calidad de tal, autorizo a la Universidad de Matanzas a darle el uso que estime más conveniente.

Y para que así conste firmo la presente a los _____ días del mes de _____ del año _____.

Firma del Autor

Sandy García Macías

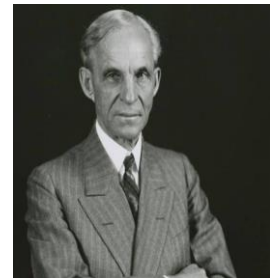
Firma del Tutor

Liset León Consuegra

PENSAMIENTO

**UNO DE LOS GRANDES DESCUBRIMIENTOS QUE UN HOMBRE PUEDE HACER,
UNA DE SUS GRANDES SORPRESAS, ES ENCONTRAR QUE PUEDE HACER LO
QUE TEMÍA QUE NO PODÍA HACER.**

HENRY FORD



NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

Presidente

Secretario

Vocal

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a toda mi familia por haberme apoyado siempre, pero en especial a mi mamá.

AGRADECIMIENTOS

- A mi familia por los consejos, la ayuda y por ser todo en mi vida
- A mi novia por su entrega y amor
- A toda la familia de mi novia por acogerme como un hijo más, en especial a mi suegra, Gladys y Lucy
- A mi tutora Liset León Consuegra por su dedicación, tiempo y sacrificio
- A mis amistades y compañeros de aula, en especial a Lázaro, Marco, Gabriel, Jorgito y Lianet
- A los profesores de la Facultad de Ciencias de Ciencias Técnicas por la profesionalidad y los conocimientos que me han aportado
- A Mirna, Alain, Arianna, Alberto y Ana Eliza por su ayuda incondicional
- A las Teniente Coronel Lilian y Lai

¡A todos muchas gracias!

RESUMEN

El patrimonio construido por el hombre está constituido en un 90% de hormigón, cuyos componentes principales son los áridos y el cemento como material aglomerante. El cemento es uno de los productos más utilizados en el mundo, por lo que con el paso del tiempo se ha incrementado los índices de consumo y la demanda de este producto. Estos índices se hace necesario disminuirlos debido al costo de producción y al impacto negativo que este le proporciona al medio ambiente en su proceso de obtención. La Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4 no se encuentra ajena a esta situación debido a que en los últimos años los índices de consumo han aumentado considerablemente, por lo que se define la vía experimental para investigar esta problemática. Con el objetivo de disminuir los consumos y elevar los rendimientos se propuso un diseño de mezcla de hormigón para la institución. Para ello se emplearon áridos procedentes de la cantera Antonio Maceo y Planta Libertad; el cemento empleado fue Cemento Cienfuegos S.A y el aditivo SAHE B2R9. Al hormigón elaborado se le midieron propiedades en estado fresco y estado endurecido. Se elaboraron 9 probetas de la primera dosificación a las cuales se le midió asentamiento, resistencia a compresión, porosidad efectiva y sorptividad obteniendo resultados que cumplieron con lo establecido en la NC 120:2018, por lo que se propuso una segunda dosificación con un menor contenido de cemento evaluando en ella la resistencia a compresión lográndose un aumento del rendimiento de cemento.

Palabras claves: cemento, rendimiento de cemento, resistencia a la compresión, porosidad efectiva y velocidad de absorción capilar

ABSTRACT

About 90% of the architectural world heritage has been built using concrete, whose main components are aggregates and cement used as binding material. Cement is one of the most worldwide used materials, that's why its rates of consumption and its demand have increased in time. It is a need to reduce these consumption rates due to the high production costs also to the negative impact of the cement obtaining process on the environment. The Project and Investigation Military Enterprise FAR No-4 presents same situation, due to the increasing cement consumption rates in recent years, the investigation of this problem via experiment has been defined in this enterprise. Aiming at reducing the high the consumption and at increasing the efficiency of cement, a concrete mixture was designed, aggregates from Antonio Maceo and Planta Libertad quarry were used, the cement was Cienfuegos S.A. Cement and the additive was SAHE B2R9. The properties of the obtained cement were measured both fresh and hardened. For the first batch, nine test tubes were prepared and properties such as settlement, resistance under compression, effective porosity and sorptivity were measured, the results were according to what is stated in the NC 120:2018, then a second batch with lower cement content was prepared and the resistance under compression was measured again, the result was an increased cement efficiency.

Key words: cement, cement efficiency, resistance under compression, effective porosity and sorptivity

Índice

Introducción	1
CAPÍTULO I: Fundamentos del estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.....	6
1.1 Breve reseña histórica sobre el hormigón	6
1.2 Materiales que componen el hormigón.....	7
1.2.1 Cemento	7
1.2.1.1 Producción y consumo de cemento a nivel mundial	8
1.2.1.2 Producción y consumo de cemento en Cuba.....	9
1.2.2 Áridos.....	10
1.2.3 Agua.....	11
1.2.4 Aditivos.....	12
1.3 Propiedades del hormigón.....	14
1.2.5 Propiedades del hormigón en estado fresco.....	14
1.2.6 Propiedades del hormigón en estado endurecido.....	15
1.3 Diseños de mezclas de hormigón	16
1.3.1 Información previa para el diseño de mezclas de hormigón.....	17
1.3.1.1 Datos de la obra.....	17
1.3.1.2 Datos de los materiales.....	17
1.3.1.3 Los registros de ensayos en obras	17
1.3.2 Procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón	18
1.4.3 Métodos para el diseño de mezclas de hormigón	18
1.4.3.1 Método de la ACI 211.1.....	18
1.4.3.2 Método de Bolomey.....	21
1.4.3.3 Método de Fuller-Thompson	21
1.4.3.4 Método de Faury	22
1.4.3.5 Método de Vitervo O'reilly	23
1.4 Rendimiento de cemento.....	25
1.4.1 Indicadores de rendimientos de cemento	26
1.5 Conclusiones parciales.....	26
CAPÍTULO II: Materiales y métodos utilizados en el diseño de experimento	28
2.1 Definiciones de la campaña experimental	28
2.2 Materiales.....	28
2.2.1 Áridos. Métodos de ensayos	29
2.2.2 Cemento	41
2.2.3 Aditivos.....	42
2.2.4 Agua.....	44
2.3 Ensayos al hormigón.....	45
2.3.1 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono	45
2.3.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión.....	47
2.3.3 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.	50
2.3.4 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).....	52
2.3.5 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.....	56

Conclusiones Parciales.....	60
CAPÍTULO III: Discusión de los resultados obtenidos	61
3.1 Áridos.....	61
3.1.1 Determinación de la granulometría.....	61
3.1.2 Módulo granulométrico o de finura de la arena.	62
3.1.3 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200).	63
3.1.4 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla.	64
3.1.5 Pesos específicos y absorción de agua.....	65
3.1.6 Determinación de los pesos volumétricos y porcentaje de vacíos.	67
3.2 Cemento	68
3.2.1 Ensayos Físicos.....	68
3.2.2 Ensayos Mecánicos.....	69
3.3 Agua.....	70
3.4 Hormigón	71
3.4.1 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono de Abrams.....	71
3.4.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión.....	71
3.4.3 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.....	73
3.4.4 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad	73
3.4.5 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).....	75
3.4.6 Cálculo del rendimiento de cemento.....	75
Conclusiones parciales.....	77
Conclusiones Generales	78
Recomendaciones	79
Bibliografía	80
Anexos	85

INTRODUCCIÓN

La historia del hormigón constituye un capítulo fundamental de la historia de la construcción. Cuando se optó por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos mampuestos para poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante las inclemencias atmosféricas. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen fácilmente.

El hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante. El conglomerante puede ser cualquiera, pero cuando nos referimos a hormigón, generalmente es un cemento artificial, y entre estos últimos, el más importante y habitual es el cemento portland (Arredondo, 1972).

En 1824, Aspdin patentó el cemento portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que les recordaban a las piedras de Portland. Hasta la aparición del mortero hidráulico que auto endurecía, el mortero era preparado en un mortarium (sartén para mortero) por percusión y rotura, tal como se hace en la industria química y farmacéutica, posteriormente entre los años 1825-1872 aparecieron las primeras fábricas de cemento en Inglaterra, Francia y Alemania.

A mediados del siglo XIX aparecen las primeras construcciones de hormigón hidráulico. Primero se comenzó a usar en obras marítimas y más tarde con el desarrollo de la siderurgia se implementó el hormigón armado, que no es más que el embebimiento de barras de acero al aglomerado pétreo, para lograr así mejores prestaciones; habiéndose extendido su empleo tanto en obras públicas como urbanas en puentes y depósitos. En las postrimerías del siglo XIX, se estaban logrando ciertos avances en el proporcionamiento racional de los componentes de la mezcla de hormigón hidráulico; fue R. Feret en 1892, el primero en descubrir la Ley Fundamental que relaciona la resistencia del hormigón con su compacidad (O'Reilly, 2006).

El tema del "diseño de mezclas de hormigón" ha motivado la imaginación de expertos e ingenieros durante más de un siglo. Sin embargo muchos han concluido, después de extensos estudios teóricos y experimentales, que hay una gran dificultad para

concebir, dosificar y fabricar "el hormigón perfecto" es decir aquel producto con sus mejores propiedades estructurales.

En el diseño de una mezcla de hormigón intervienen un gran número de variables que determinan su comportamiento en servicio, desde su concepción, pasando por su mezclado, fraguado y endurecimiento, hasta su madurez, dichas variables son, entre otras, el costo, la resistencia, la trabajabilidad, la durabilidad y la apariencia.

El diseño consiste en optimizar estas variables según unos materiales previamente seleccionados o escogiendo los que mejor se ajusten a cada caso específico, haciendo que cada necesidad especifique un hormigón distinto en el cual predomina una o diversas variables, siendo estas quienes en realidad se optimizan y adoptando valores mínimos para las demás.

Es por estas razones que han surgido varios métodos, cada uno especial para optimizar unas variables en particular y obtener hormigones con calificativos como: normal, seco, pesado, liviano, de alta resistencia, autonivelante, de fraguado rápido, con adiciones, con aditivos y de alto desempeño. Dentro de los cuales se encuentran Bolomey, Faury, Fuller-Thompson, ACI 211.1 Hormigón normal, Vitervo O'Reilly, entre otros.

Los fabricantes de hormigón hidráulico (hormigón) en el mundo andan continuamente en busca de realizar avances en sus procesos productivos. De esta manera mejoran la economía de las obras ejecutadas con este material, al obtenerse mejores consumos de cemento en relación con las solicitaciones requeridas de los elementos, logrando costos más bajos por unidad de fin, así como una relación más amigable con el Medio Ambiente. En la bibliografía consultada relacionada con los hormigones hidráulicos, destacan dos indicadores técnicos fundamentales que los caracterizan, ellos son el contenido de cemento y el rendimiento (Cc y RC) respectivamente.

En Cuba, y en la provincia de Matanzas en sentido general, estos indicadores de consumo de cemento han aumentado considerablemente, por lo que constituye un imperativo estudiar la relación que guardan los diseños de mezclas de hormigón con estos resultados, en fin de obtener criterios que permitan afirmar que dichos diseños influyan en el valor del rendimiento.

Por lo que se define la siguiente **situación problemática**

La Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4 es la encargada de la producción de hormigón y mortero para las obras con fines y necesidades militares, para lo cual utiliza áridos procedentes de la cantera Antonio Maceo y Planta Libertad, el cemento P-35 procedente de Cienfuegos. Los hormigones que se producen varían su resistencia, pero los mayores volúmenes a producir alcanzan como resistencia mínima 300 kg/cm² cumpliendo con lo establecido en la NC 120: 2018. En la actualidad los consumos de cemento de la entidad presenta una evaluación no aceptable en cuanto al rendimiento de cemento e índices de consumos según lo establecido por el Ministerio de la Construcción, lo cual puede depender de los aditivos utilizados, de los diseños de mezclas y la tecnología de producción, según la bibliografía científica relacionada con el tema. Por lo que se hace necesario al no contar con resultados científicos avalados efectuar un análisis de las dosificaciones empleadas teniendo en cuenta las características de los áridos utilizados con el objetivo de lograr un cumplimiento del rendimiento de cemento lo que implicaría un ahorro en cuanto los contenidos de cemento, eficiencia de utilización y calidad del hormigón obtenido cumpliendo con los requisitos establecidos.

Problema Científico: ¿Se logrará un aumento del rendimiento de cemento si se propone un diseño de mezcla de hormigón para la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4?

Objeto de estudio: Resistencia a la compresión, porosidad efectiva y velocidad de absorción capilar.

Campo de estudio: Diseños de mezclas

Hipótesis: Si se propone un diseño de mezcla de hormigón para la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4 podría lograrse el aumento del rendimiento de cemento.

Objetivo General: Proponer un diseño de mezcla de hormigón para la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4.

Del objetivo general se derivan los siguientes **objetivos específicos:**

- ✓ Fundamentar el estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.
- ✓ Describir los materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas.

- ✓ Discutir los resultados obtenidos en los diferentes diseños de mezcla.

Variables de la Investigación:

- ✓ **Variables dependientes:** Resistencia a la compresión, porosidad efectiva y velocidad de absorción capilar.
- ✓ **Variable independiente:** Diseños de mezclas de hormigón.

Los métodos de investigación utilizados en el desarrollo del trabajo son:

Métodos teóricos

El análisis-síntesis se utiliza para examinar la bibliografía y llegar a conclusiones a fin de fundamentar los diferentes enfoques y criterios relacionados con el objeto de investigación.

El histórico-lógico posibilita el establecimiento de las regularidades de la evolución en el tiempo, así como la tendencia actual del tema de investigación.

El inductivo-deductivo permite llegar a la generalización de las características más importantes obtenidas del diagnóstico del estado actual de los diseños de mezcla empleados para elaborar el hormigón.

Métodos empíricos

La medición y experimentación se empleará para la caracterización de los materiales empleados en los diferentes diseños de mezcla, y para la obtención de las propiedades medidas al hormigón.

Pertinencia y novedad de la investigación

Mediante esta investigación se le dará respuesta a un problema relacionado con los rendimientos de cemento en la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4, además se responde al modelo del profesional del Ingeniero Civil. La novedad estará dada en la propuesta de un diseño de mezcla que presente un menor contenido de cemento y por tanto se logre un aumento de rendimiento del mismo.

Resultados esperados

Una propuesta de diseño de mezcla de hormigón para la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4 que logre un aumento del rendimiento de cemento.

Estructura de la investigación

La investigación se ha estructurado en: resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas del autor, bibliografía consultada y anexos.

Capítulo 1: Fundamentos del estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.

Capítulo 2: Descripción de los materiales y métodos empleados.

Capítulo 3: Discusión de los resultados obtenidos en los diferentes diseños de mezclas.

CAPÍTULO I: Fundamentos del estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.

Este Capítulo se abordará lo relacionado con los fundamentos de la influencia de diseños de mezclas en los rendimientos de cemento, además se tendrá en cuenta las propiedades del hormigón como material de construcción, los materiales que lo componen, los consumos de cemento a nivel mundial y de forma particular en nuestro país. También abarcará los diferentes métodos de diseños de mezclas, así como la metodología propuesta por cada uno de ellos. Por otra parte, reflejará todo lo relacionado con los rendimientos de cemento y los índices estipulados a cumplir por el ministerio.

1.1 Breve reseña histórica sobre el hormigón

En la historia, el hombre se ha encargado por la búsqueda de un espacio para vivir con mayor comodidad, seguridad y protección posible; superó la época de las cavernas y aplicó sus mayores conocimientos en delimitar su espacio vital, satisfaciendo primero sus necesidades de vivienda y a medida que el tiempo fue cambiando, a levantar construcciones con requerimientos específicos. Un gran ejemplo de los Hormigones Naturales nacen en la Antigua Grecia, hacia el 500 a. C., en donde se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua, arena, piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, lo que dio origen al primer hormigón de la historia (Chamorro, 2012).

El hormigón es un material heterogéneo, compuesto por una parte cementante (cemento + agua) y otra, que podemos considerar de relleno (los agregados), pero que mejoran notablemente las características del material. Recién preparado tiene un aspecto de fluido viscoso, propiedad que le permite moverse con facilidad rellenando completamente las formaletas de las estructuras. Una vez se pasa esta primera etapa de material moldeable, con el tiempo y bajo condiciones de exposición aceptables (temperatura y humedad), el material se convierte en un sólido capaz de mantener su forma y soportar cargas externas con un comportamiento que se puede considerar, aproximadamente, elasto-plástico. (En forma exacta el hormigón ni es elástico ni es plástico) (Bolívar, 1987).

Es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante. El conglomerante puede ser cualquiera, pero cuando se refiere a

hormigón o mortero, generalmente es un cemento artificial y entre estos últimos, el más importante y habitual es el cemento Portland (Zamora, 2013).

Actualmente es el material más utilizado en la construcción de un sin número de obras civiles (edificios, puentes, carreteras, centrales, hidroeléctricas, plantas de tratamiento, tuberías, canales, etc.). Sin embargo, sus innumerables propiedades lo hacen destacar como un material de construcción cuyo manejo y control requiere amplios conocimientos de las matemáticas y la ingeniería.

1.2 Materiales que componen el hormigón

Según la NC 120:2014 Hormigón hidráulico. Especificaciones es un material constituido por la mezcla de cemento, árido grueso, árido fino y agua, con o sin la incorporación de aditivos o adiciones, que desarrolla sus propiedades por la hidratación del cemento.

1.2.1 Cemento

Con el transcurrir de los siglos y cuando el hombre optó por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir estos mampuestos para poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal; pero éstas se deterioraban rápidamente ante condiciones ambientales desfavorables. Diversas soluciones fueron utilizadas a partir de la mezcla de agua con minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen con facilidad. Es de esta manera como en el antiguo Egipto (alrededor del año 2,570 a. C.) se utilizaron pastas obtenidas con mezclas de yesos y calizas disueltas en agua, para poder unir sólidamente sillares de piedra; como las que aún perduran entre los bloques calizos de la Gran Pirámide de Gizeh. Los egipcios utilizaron este mortero para levantar sus prodigiosas construcciones, como es el caso también de las mezclas que se emplearon hacia el año 1950 a. C. en los muros de piedra del mural de Tebas. Hacia el año 500 a. C., los griegos utilizaban en sus construcciones una mezcla de materiales provenientes de depósitos volcánicos, con caliza, agua y arena. Este mortero ofrecía entonces los mejores niveles de resistencia. Tiempo después, para el siglo II a. C., en la región de Puzzoli (cerca del Vesubio), los romanos desarrollaron el llamado cemento romano o puzolánico a partir de la mezcla de caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico o cenizas volcánicas (lo que hoy

llamamos puzolana). A mediados del siglo XVIII, el reverendo inglés James Parker creó un cemento de manera accidental, al quemar unas piedras calizas. Este descubrimiento fue bautizado como cemento romano porque entonces se pensaba que era el que se había utilizado en los tiempos de esta civilización, empezándose a utilizar en diversas obras en el Reino Unido. Joseph Aspdin y James Parker patentaron el 21 de octubre de 1824 el primer Cemento Portland obtenido a partir de caliza arcillosa y carbón; calcinados a alta temperatura. La denominación Portland responde a su color grisáceo, muy similar a la piedra de la isla de Portland del canal inglés. Más adelante, Isaac Johnson mejoró este proceso de producción aumentando la temperatura de calcinación, obteniendo en 1845 el prototipo del cemento moderno elaborado con base en una mezcla de caliza y arcilla calcinada a altas temperaturas, hasta la formación del clinker. Esta es la razón por la que hoy se conoce a Johnson como el padre moderno del cemento Portland (Vidaud, 2013).

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1300 a 1400°C, a la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clinker. El clinker se enfría y tritura hasta obtener un polvo fino; a continuación, se adiciona un poco de yeso y el producto comercial resultante es el cemento Portland que tanto se usa en todo el mundo (Giordani, 2004).

Los cementos son productos que, amasados con agua, fraguan y endurecen, formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergido en agua. Existen varios tipos de cementos. Las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresa en forma de sus óxidos, y que según cuales sean, formarán compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación (Jiménez, 1987).

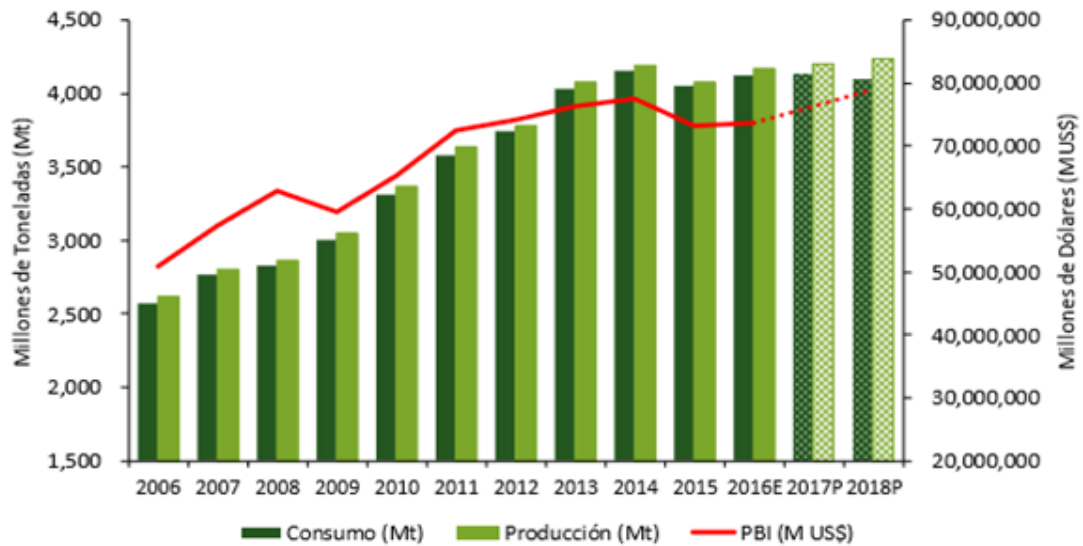
1.2.1.1 Producción y consumo de cemento a nivel mundial

El cemento es uno de los productos más utilizado en el mundo, a pesar que las grandes ciudades ya están llenas de grandes construcciones, el cemento sigue siendo solicitado en las grandes obras. Según la última estadística brindada por Index Mundi, en su reporte Hydraulic Cement: World Production, By Country (2016). La real producción de cemento en el mundo, en dicho reporte se registra 2310 millones de toneladas de

cemento. Siendo China el país con más producción de cemento en el mundo, tendencia que se repite en los últimos registros.

Según the Global Cement Report - International Cement Review, Banco Mundial y FMI (2016) el consumo mundial de cemento alcanzó las 4,129Mt en el 2016. China continuó liderando la demanda de cemento con 2,395Mt en el 2016, alcanzando el 58% de la participación mundial. Dicha participación alcanzó su punto máximo en el año 2014 con 59.4%. Excluyendo a China, el consumo mundial de cemento alcanzó las 1,734Mt en el 2016, creciendo un 1.0% con respecto al 2015.

Gráfico 1.1 Producción y consumo de cemento a nivel mundial en el año 2018



Fuente: Global Cement Report - International Cement Review, Banco Mundial Y FMI (2016)

1.2.1.2 Producción y consumo de cemento en Cuba

Cuba fue el primer país que produjo cemento en América Latina (1895). En 1958 se alcanza un récord de producción de 4,27 millones de toneladas. En 1960 el gobierno cubano nacionalizó todas las fábricas de cemento y pasaron a control estatal. La inversión del gobierno cubano en las plantas de cemento permite incrementar el procesamiento de roca desde 2,5 millones de metros cúbicos en 1960 a 47,6 millones en 1980. El corte de los subsidios soviéticos al precio del petróleo suministrado a Cuba conduce a la reducción drástica de la producción (Hernández, 2013).

En el presente cuenta con 6 fábricas de cemento.

- Cementos Cienfuegos S.A. es una sociedad mixta. La fábrica fue inaugurada en 1980 con el nombre de Carlos Marx. Cuenta con tecnología alemana. Tiene una capacidad para producir 1,5 millones de toneladas de Clinker y cemento al año.
- Fábrica de cemento del Mariel. Inaugurada con el nombre de René Arcay. Inaugurada en 1918. Desde 1973 hasta 1981 se modernizó con equipamiento español. Hasta el año 2001 la fábrica operaba sin filtrar los gases de escape, y expulsaba a la atmósfera entre 60 y 70 toneladas diarias de cemento.
- Fábrica de cemento Siguaney (Provincia de Sancti Spíritus). Inaugurada en 1971.
- Nuevitas (26 de Julio). Inaugurada en 1968.
- Mártires de Artemisa. Inaugurada en 1921.
- Santiago de Cuba (José Merceron). Construida en 1955.

1.2.2 Áridos

El término “árido” engloba a un conjunto de materiales granulares inertes comúnmente conocidos con terminologías como arenas, gravas, gravillas, balasto, etc (Rodríguez, 2008).

Los áridos que se emplean en hormigones se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños para alcanzar una granulometría óptima. Tres factores intervienen en una granulometría adecuada: el tamaño máximo del árido, la compacidad y el contenido de granos finos. Cuando mayor sea el tamaño máximo del árido, menores serán las necesidades de cemento y de agua, pero el tamaño máximo viene limitado por las dimensiones mínimas del elemento a construir o por la separación entre armaduras, ya que esos huecos deben quedar rellenos por el hormigón y, por tanto, por los áridos de mayor tamaño. En una mezcla de áridos una compacidad elevada es aquella que deja pocos huecos; se consigue con mezclas pobres en arenas y gran proporción de áridos gruesos, precisando poca agua de amasado; su gran dificultad es conseguir compactar el hormigón, pero si se dispone de medios suficientes para ello el resultado son hormigones muy resistentes. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más trabajable, pero precisan más agua de amasado y de cemento (Jiménez, 1987).

Los áridos se pueden clasificar de acuerdo a su naturaleza en:

- Áridos naturales: Son aquellos áridos que se obtienen de los yacimientos geológicos utilizando únicamente procedimientos mecánicos. Proceden, bien de depósitos detríticos no consolidados (graveras) en donde se utilizan medios mecánicos de extracción convencionales, o bien de macizos rocosos cuyo arranque requiere medios específicos como ripados o voladuras con explosivos (canteras). Este tipo de árido es, con diferencia, el más consumido a nivel mundial.
- Áridos artificiales: Áridos resultantes de procesos industriales que conllevan modificaciones físico-químicas o de otro tipo, como por ejemplo, las escorias de alto horno.
- Áridos reciclados: Este tipo de árido es el resultado de un tratamiento inorgánico de los materiales que previamente ya han sido utilizados en la construcción.

También se pueden clasificar según su tamaño:

- Áridos Finos o arena: fracción que pasa por el tamiz de 4mm de luz de malla
- Áridos Gruesos: fracción del mismo que queda retenida en ese tamiz

Dentro de las funciones que ejercen los áridos en la mezcla de hormigón se encuentran:

- Relleno de la pasta y así reducir el contenido de cemento por metro cúbico.
- Producir una mezcla de hormigón económica.
- Proporcionar una masa de partículas que sea capaz de resistir grandes esfuerzos a compresión.
- Disminuir los cambios volumétricos que resultan en el proceso de fraguado.

1.2.3 Agua

El agua se emplea en el hormigón para el amasado y el curado. En el agua de amasado participa las reacciones de hidratación del cemento.

La cantidad de agua de amasado debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Sin embargo, una reducción excesiva de agua

originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua (Jiménez, 1987).

El agua de amasado tiene las misiones de:

- Hidratar los componentes activos del cemento
- Actuar como lubricante para hacer que la mezcla sea más fresca y trabajable para una correcta puesta en obra

El agua de curado aporta la humedad necesaria durante las primeras edades de endurecimiento para compensar las pérdidas de agua por evaporación y permitir que se siga la progresiva hidratación del cemento (Gómez, 2012).

1.2.4 Aditivos

Los aditivos son sustancias o productos que se incorporan al hormigón, antes o durante el amasado, produciendo la modificación de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento (Arredondo, 1972).

Clasificación de los aditivos según normativas y organismos:

Clasificación de los aditivos según la norma ASTM 494:

- TIPO A: Reductor de agua
- TIPO B: Retardador de fraguado
- TIPO C: Acelerador de fraguado
- TIPO D: Reductor de agua y retardador
- TIPO E: Reductor de agua y acelerador
- TIPO F: Reductor de agua de alto efecto
- TIPO G: Reductor de agua de alto efecto y retardador

Clasificación de los aditivos según el Centro Tecnológico del Hormigón (C.T.H):

- Retardador de fraguado
- Acelerador de fraguado y endurecimiento
- Plastificante
- Plastificante retardador
- Plastificante acelerador

- Superplastificante
- Superplastificante retardador
- Incorporador de aire

Las funciones de los aditivos son:

- Reducir costos en la construcción de obras civiles.
- Aumentar las especificaciones del hormigón.
- Asegurar la calidad del hormigón en condiciones ambientales severas, durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado.
- Aumentar la manejabilidad y trabajabilidad para el mismo contenido de agua de la mezcla.
- Reducir la segregación por mayor cohesión de la mezcla.
- Retardar o acelerar el fraguado del hormigón.
- Retardar o reducir la generación de calor de hidratación.
- Controlar exudación o sangrado.
- Disminuir la permeabilidad.

Los más utilizados en nuestro clima son los superplastificantes (reductores de agua de alto rango) y aceleradores de fraguado.

Dentro de los diferentes tipos de aditivos que se emplean en nuestro país encontramos:

- Superplastificantes Mapefluid No 100 (grupo industrial Perdurit).
- Dynamons P3: hormigón prefabricado, base acrílica.
- SAHE B2R9 y SAHE A2R9
- SIKAPLAST 9100

De forma particular también se encuentra el DISTIN 200, que se produce en la Universidad de Matanzas el cual cumple función de reductor de agua, mejora la laborabilidad, ahorra cemento, aporta laborabilidad e incrementa resistencia.

1.3 Propiedades del hormigón

El hormigón presenta dos estados fundamentales. El estado fresco o plástico en el que admite ser manipulado y el estado endurecido en el que ha adquirido una rigidez tal que impide su manipulación

1.2.5 Propiedades del hormigón en estado fresco

El hormigón debe cumplir ciertas propiedades en estado fresco dentro de las cuales podemos encontrar:

- Consistencia
- Docilidad
- Homogeneidad
- Masa específica

Consistencia: Es la capacidad del hormigón fresco de deformarse. Principalmente se mide mediante el descenso en centímetros en el ensayo del cono de Abrams.

Cuando se determina la consistencia del hormigón, esta será medida por medio de:

- El ensayo de Asentamiento por el Cono de acuerdo con la NC-ISO 1920-2
- El ensayo por el Consistómetro VeBe de acuerdo con la NC-ISO 1920-2
- El ensayo por la Tabla de Fluidez de acuerdo con la NC-ISO 1920-2
- O bien mediante un método de ensayo específico acordado previamente entre el usuario y el productor del hormigón en el caso concreto de aplicaciones especiales (por ejemplo un hormigón de consistencia de tierra húmeda para la tecnología del hormigón compactado con rodillos)

Docilidad: Es sinónimo de trabajabilidad del hormigón fresco. Es su capacidad de ser puesto en su lugar de destino con los medios de compactación de que se dispone. Principalmente se mide mediante el descenso en centímetros en el ensayo del cono de Abrams.

Homogeneidad: Es la cualidad de distribución por toda la masa de todos los componentes del hormigón en las mismas proporciones. A la cualidad de homogeneidad se opone el defecto de la segregación o decantación. Se mide por la masa específica de porciones de hormigón fresco separadas entre sí.

Masa específica: Es la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen ocupado. Puede medirse con el hormigón compactado o sin compactar. La densidad del hormigón fresco compactado es una medida del grado de eficacia del método de compactación empleado. Se mide en kg/m^2 .

1.2.6 Propiedades del hormigón en estado endurecido

En cuanto al estado endurecido, también hay propiedades fundamentales a tener presentes, tales como son:

- Densidad
- Compacidad
- Permeabilidad
- Resistencia
- Dureza
- Retracción

Densidad: Es la relación de la masa del hormigón y el volumen ocupado. Para un hormigón bien compactado de áridos normales oscila entre 2300- 2500 kg/m^3 . En caso de utilizarse áridos ligeros la densidad oscila entre 1000-1300 kg/m^3 . Y en caso de utilizarse áridos pesado la densidad oscila entre 3000-3500 kg/m^3 .

Compacidad: Es la cualidad de tener la máxima densidad que los materiales empleados permiten. Un hormigón de alta compacidad es la mejor protección contra el acceso de sustancias perjudiciales.

Permeabilidad: Es el grado en que un hormigón es accesible a los líquidos o a los gases. El factor que más influye en esta propiedad es la relación entre la cantidad de agua añadida y de cemento en el hormigón (a/c). Cuanto mayor es esta relación mayor es la permeabilidad y por tanto más expuesto el hormigón a potenciales agresiones.

Resistencia: El hormigón endurecido presenta resistencia a las acciones de compresión, tracción y desgaste. La principal es la resistencia a compresión que lo convierte en el importante material que es. Se mide en MPa y llegan hasta 50 Mpa en hormigones normales y 100 Mpa en hormigones de alta resistencia. La resistencia a tracción es mucho más pequeña pero tiene gran importancia en determinadas aplicaciones, la resistencia a desgaste, de gran interés en los pavimentos se consigue utilizando áridos muy resistentes y relaciones agua cemento muy bajas.

Dureza: Es una propiedad superficial que en el hormigón se modifica con el paso del tiempo debido al fenómeno de carbonatación. Un método de medirla es con el índice de rebote que proporciona el esclerómetro.

Retracción: Es el fenómeno de acortamiento del hormigón debido a la evaporación progresiva del agua absorbida que forma meniscos en la periferia de la pasta de cemento, y el agua capilar. Es el agua menos fijada en los procesos de hidratación.

A la hora del diseño de mezclas hay que tener en cuenta de manera particular ciertas propiedades que el hormigón a diseñar debe cumplir como son: resistencia a la compresión, durabilidad, trabajabilidad, peso unitario y economía.

1.3 Diseños de mezclas de hormigón

El siglo XX marcó una nueva etapa en el conocimiento científico y técnico del material. Fue precisamente el ingeniero francés Rene Feret quien probablemente realizó el primer estudio racional sobre diseño de mezclas de hormigón entre los años 1892-1897 (Laboratorios de Ponts et Chaussees); a Feret le siguieron Abrams, Fuller, Weymouth, Thaulow, Walker, Goldbek, Gray, Talbot, entre otros, quienes cimentaron las bases para la moderna tecnología del hormigón. Prácticamente el comienzo de las técnicas modernas para el diseño de mezclas de hormigón fue a principios de (1900). Los trabajos de Feret, Fuller y Thompson, Abrams, Bolomey, marcaron una nueva etapa en la investigación y desarrollo del hormigón como material de construcción (Bolivar, 1987).

En el diseño de una mezcla de hormigón intervienen un gran número de variables que determinan su comportamiento en servicio, desde su concepción, pasando por su mezclado, fraguado y endurecimiento, hasta su madurez, dichas variables son, entre otras, el costo, la resistencia, la trabajabilidad, la durabilidad y la apariencia.

El diseño consiste en optimizar estas variables según unos materiales previamente seleccionados o escogiendo los que mejor se ajusten a cada caso específico, haciendo que cada necesidad especifique un hormigón distinto en el cual predomina una o diversas variables, siendo estas quienes en realidad se optimizan y adoptando valores mínimos para las demás.

1.3.1 Información previa para el diseño de mezclas de hormigón

Antes de comenzar un diseño de mezclas es necesario conocer los datos referentes a la obra a ejecutar, los materiales disponibles y los registros de ensayos en obras.

1.3.1.1 Datos de la obra

- Las dimensiones de cada uno de los elementos estructurales (planos)
- La resistencia a la compresión especificada, f_c , del hormigón.
- Localización de la estructura
- Condiciones de fabricación y manejo del hormigón en obra
- Las especificaciones recomendadas con respecto al contenido de cemento, calidad de agregados, calidad del agua, contenido de aire, asentamiento, aditivos.

1.3.1.2 Datos de los materiales

- Análisis granulométrico de los agregados. Cálculo del módulo de finura de la arena y estimación del tamaño máximo del cascajo
- Pesos específicos aparentes y porcentaje de absorción de los agregados
- La humedad de los agregados inmediatamente antes de preparar las mezclas.
- Calidad de los agregados; materia orgánica, partículas finas, reactivas, livianas, débiles.
- Calidad del agua de mezclado
- Calidad de los aditivos

1.3.1.3 Los registros de ensayos en obras

- Resultados obtenidos con los agregados seleccionados para este diseño
- Dosis de agua por metro cúbico de hormigón utilizado
- Relaciones obtenidas entre a/c y f_c
- El cálculo estadístico de la desviación típica y el coeficiente de variación en ensayos de resistencia del hormigón

Con esta información recopilada se procede a comenzar el diseño de la mezcla de hormigón.

1.3.2 Procedimiento para el diseño de mezclas de hormigón

Pasos para la elección del hormigón definitivo:

- a) Elección de la trabajabilidad de la mezcla
- b) Elección del tamaño máximo del agregado
- c) Estimación inicial de los contenidos de agua y aire en la mezcla: (A) (a)
- d) Cálculo de la resistencia característica de la mezcla: (f'_c)
- e) Elección de la relación (a/c)
- f) Cálculo del contenido de cemento: (C)
- g) Estimación del contenido de agregado grueso: (G)
- h) Estimación del contenido de agregado fino: (F)
- i) Proporciones iniciales del hormigón
- j) Corrección por humedad en los agregados
- k) Revisiones y correcciones de las mezclas de prueba:
 - Por Asentamiento
 - Por Resistencia

1.4.3 Métodos para el diseño de mezclas de hormigón

Dentro de los métodos encontramos:

Fuller Thompson, Weymouth, Bolomey, Faury, Joisel, Vallete y Dreux.

Todos tienen una forma operacional muy similar y tienen la ventaja de poder combinar varios agregados para obtener así la granulometría más ajustada a la típica.

En cuanto a los métodos propuestos por el Instituto Americano del Hormigón se encuentran:

- Método A.C.I. 211.1 para hormigón normal
- Método A.C.I. 211.1 para hormigón con adición de cenizas volantes

1.4.3.1 Método de la ACI 211.1

Este método es el resultado de extensas investigaciones, en el campo del hormigón, de varias organizaciones norteamericanas entre ellas: el A.C.I., ·P.C.A., U.S.B.R. Se fundamenta en los trabajos experimentales de Andrew Duff Abrams, Richart y Talbot, Goldbeck y Gray. Es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una

amplia información experimental. El procedimiento de diseño se puede realizar ya sea mezclando los materiales por volumen absoluto y luego calculando los pesos de cada uno de los componentes, o, directamente, calculando el peso del hormigón y deduciendo luego el peso de cada uno de los ingredientes, siempre para obtener un metro cúbico de hormigón. Ambas formas de cálculo de la mezcla tienen en cuenta, todo lo relacionado con la facilidad de colocación, resistencia a la compresión o a la flexión, durabilidad y economía.

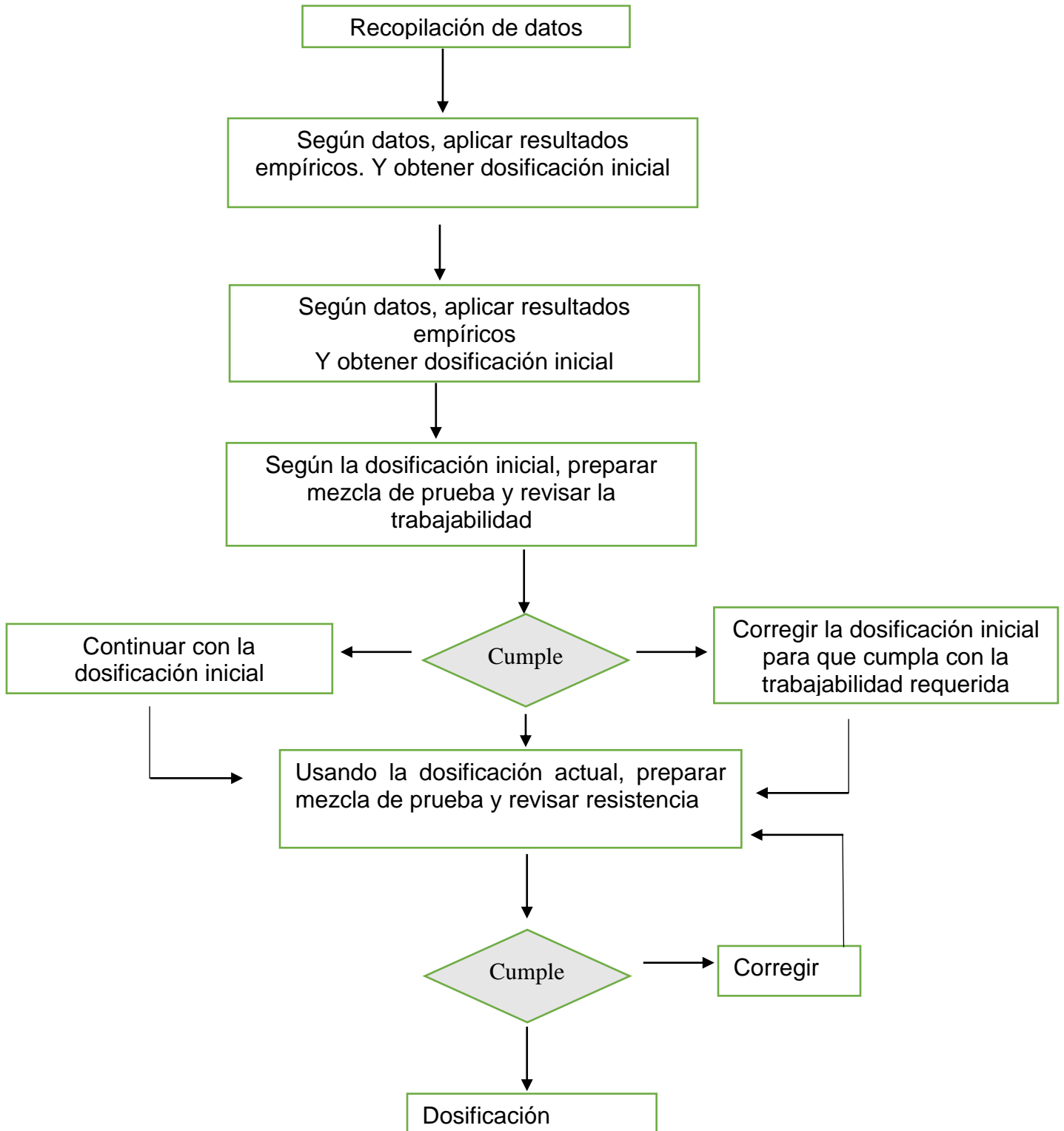
En el año 1991, el Instituto Americano del Hormigón (ACI) presentó, un método con resultados aceptables para hormigones con dos áridos, de masa unitaria entre los 2000 y 2500 kg/m³ y con requisitos de resistencia menores a 42 Mpa. Este método práctico y experimental fue precisado posteriormente en el año 2002 y en la actualidad es el método de diseño de mezclas de hormigón referencia en el continente americano y en buena parte del mundo, conocido como ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”.

Secuencia del Método de la ACI 211.1

La secuencia general de diseño comprende los siguientes pasos:

- Paso1.Estimación de los asentamientos de la mezcla de hormigón.
- Paso2.Elección del tamaño máximo del árido.
- Paso3.Estimado de la cantidad de agua de mezclado y del contenido de aire en la mezcla.
- Paso4. Selección de la relación agua/cemento o la relación agua/materiales aglomerantes.
- Paso5.Cálculo del contenido de cemento en la mezcla de hormigón.
- Paso6.Estimación del contenido de árido grueso.
- Paso7.Estimación del contenido de árido fino.
- Paso8.Ajustes a las cantidades de áridos debido a la humedad.
- Paso9.Ajuste de la mezcla de prueba.

Gráfico 1.2 Fundamentos del Método de la ACI 211.1



Fuente: Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón

1.4.3.2 Método de Bolomey

Este método gráfico, empleado para combinación de áridos gruesos y finos, parte de la determinación de una granulometría ideal de los áridos a mezclar y del ensayo granulométrico de éstos. Según Bolomey, el por ciento ideal de material de una combinación que debe pasar por un determinado tamiz se calcula por:

$$\text{Por ciento pasado por un tamiz} = a + (100 - a) * \sqrt{\frac{d}{D}}, \% \quad (1.1)$$

a: Factor que depende de la consistencia de la mezcla y el tipo de árido.

d: Abertura del tamiz cuyo porcentaje pasado se quiere determinar, mm.

D: Tamaño máximo del árido grueso, mm.

El método Bolomey tiene su aplicación más importante en la dosificación de hormigones masivos (es decir para grandes macizos como en presas, muros de gravedad y vertederos) (Giraldo, Bolívar 1987).

Metodología de Bolomey

- Condiciones de colocación (Asentamientos)
- Requisitos de resistencia ($f'c$)
- Experiencia en el diseño de mezclas
- Características del ambiente y dimensiones de la estructura
- Características de los materiales (Cemento)

1.4.3.3 Método de Fuller-Thompson

El método que se presentan en este numeral corresponde a las investigaciones de William B; Fuller Thompson, quienes seleccionaron una curva granulométrica continua para la composición óptima de los agregados en el hormigón. La curva es de la forma $Y=100(d/D)^{0.5}$; donde: D es el tamaño máximo del agregado total, y Y el porcentaje en peso de agregados que pasan a través del tamiz d.

Según la bibliografía este método resulta recomendable cuando la cantidad de cemento por metro cúbico de hormigón es superior a los 300Kg, la estructura no posee demasiado refuerzo, el tamaño máximo del agregado es menor a los 70 mm y los agregados son redondeados.

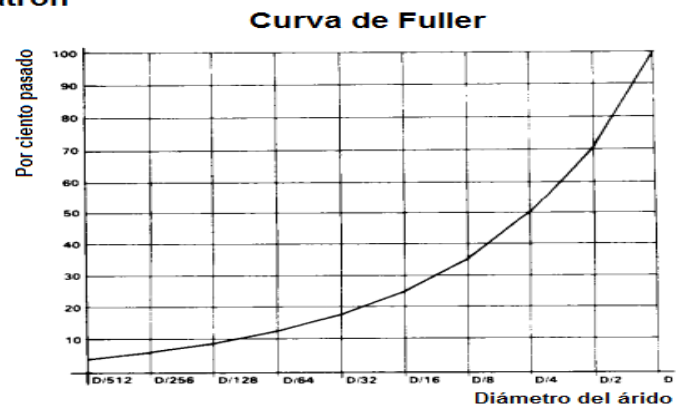
Metodología de Fuller-Thompson

- Condiciones de colocación (Asentamientos)
- Requisitos de resistencia ($f'c$)
- Experiencia en el diseño de mezclas
- Características del ambiente y dimensiones de la estructura
- Características de los materiales (Cemento)

Gráfico 1.3: Curva granulométrica de Fuller.

Porcentajes fijos de la curva patrón de Fuller

Diámetro del árido	% de material
D	100
D/2	71
D/4	50
D/8	35
D/16	25
D/32	18
D/64	12
D/128	9
D/256	6
D/512	4



Fuente: Guía Práctica para el diseño de mezclas de hormigón

A diferencia del ACI 211, en este método se permite la utilización de más de 2 agregados, la cantidad máxima en 1.1 práctica es de 6, es necesario conocer la granulometría, la humedad de absorción y el peso específico en bruto seco de cada uno de ellos

1.4.3.4 Método de Faury

Fue propuesto en el año 1942, como consecuencia de un estudio general del hormigón realizado por Caquot. Faury propone una nueva ley granulométrica de tipo continuo que depende de la raíz quinta del tamaño del agregado $\sqrt[5]{d}$. Su campo de aplicación más importante es en hormigones densamente armados y en estructuras prefabricadas.

La curva granulométrica ideal que conduce a la compacidad máxima del agregado (mínimo de huecos) es prácticamente un diagrama bilineal, distinguiéndose en el hormigón dos clases de agregados: los finos y medios cuyos tamaños son menores que la

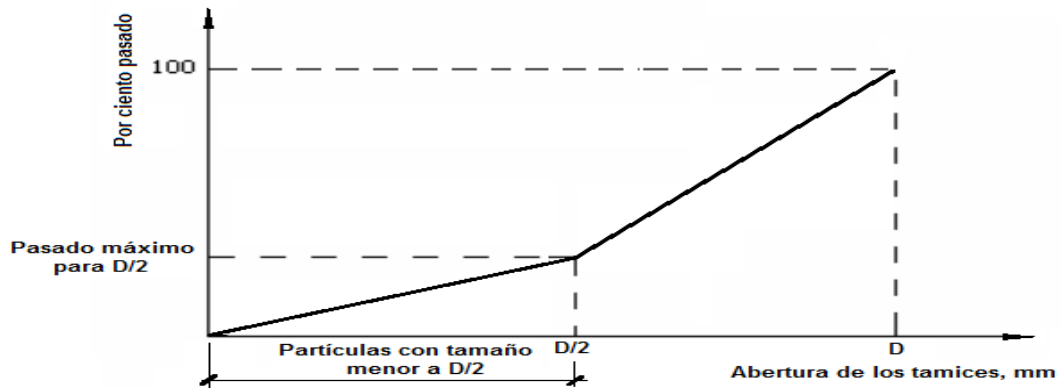
mitad del tamaño máximo de todos los agregados (menor que D/2), y los gruesos con tamaños mayores a D/2.

$$P = a + 17\sqrt[5]{D} * \frac{B}{0,75 * \frac{R}{D}} \quad (1.2)$$

Donde:

- B: Coeficiente que depende de la tecnología de compactación del hormigón.
- R: Ancho del encofrado en las zonas más densamente reforzadas.

Gráfico 1.4: Curva granulométrica de referencia según Faury:



Fuente: Guía Práctica para diseño de mezclas de hormigón

1.4.3.5 Método de Vitervo O'reilly

Otro de los investigadores que realizó un gran aporte al diseño de mezclas fue el Doctor en Ciencias Técnicas Vitervo O'Reilly, quien fuera en aquel entonces Profesor Titular e Investigador Titular y Presidente de la Comisión Nacional del Cemento y el Concreto de Cuba.

Ante la necesidad de mejorar los costos de producción del hormigón fabricado en el país, en el ejercicio de sus funciones como asesor del gobierno de Cuba, el Dr. Ing. Vitervo O'Reilly ha desarrollado y puesto a punto un método de dosificación compendio de sus logros tras largos años de estudio, experimentación y minuciosa observación de las propiedades que presentaban distintos hormigones fabricados con materiales pétreos de varias características y procedencias.

Tras un análisis profundo de los diferentes métodos de dosificación de hormigones habitualmente utilizados (Bolomey, Fuller, Feret, ACI, etc.), el Dr. O'Reilly observa un

denominador común en todos ellos: la atención preferencial que prestan a la composición granulométrica de las partículas de agregados y la escasa consideración que merece la relativa a la forma de dichas partículas. Este planteamiento implica el cuestionamiento de los referidos métodos de dosificación, especialmente para producción de agregado con elevada proporción de fracciones geoméricamente inadecuada, en los que resulta decisivo el factor de, forma del material y no es de aplicación el modelo de referencia de la "curva granulométrica ideal" (Díaz, 2007).

La aplicación de este método aporta ahorros considerables de cemento y logra que el hormigón sea más compacto y menos poroso, también garantiza una mayor protección a las barras de acero que circundan, por lo que constituye un método ideal para la elaboración de hormigones de altos desempeños.

Pasos a seguir según el método de Vitervo O'reilly

- Primer paso: Se determina el PEC y el PUC de la arena y la grava que se han secado en la estufa
- Segundo paso: Determinar el Peso Unitario Compactado de las mezclas secas de arena y grava en las proporciones: 35:65,40:60,45:55, 60:40
- Tercer paso: Se calcula el peso Específico Corriente de cada mezcla anterior
- Cuarto paso: Se calcula el % de vacío de cada mezcla
- Quinto paso: Con la mezcla óptima de agregados, que es la que posee el menor vacío se fabrican 20 L de mezclas de hormigón de una consistencia y resistencia deseada, colocando la cantidad de cemento y agua acostumbrada y con ello:
 - a) Queda determinada la cantidad de agua por tanteo para un As requerido
 - b) Se fabrican 18 testigos de prueba para romper a los 28 días con la a/c obtenida
 - c) Al mismo tiempo se determina la resistencia R_e del cemento usado, a los 28 días
- Sexto paso: Con los datos anteriormente obtenidos se calcula la característica "A" de la grava usada
- Séptimo paso: Con la característica "A" del agregado grueso, se determina la cantidad de cemento necesaria
- Octavo paso: Determinado el valor de $v=a/c$ podemos determinar la cantidad de cemento realmente necesaria: $c=a/v$

Donde "a" es el agua usada en la investigación para obtener un As necesario

1. Noveno paso: Conocida la cantidad de cemento y agua, se determina la cantidad de arena y grava de acuerdo a la proporción de la mezcla óptima. Partiendo de la necesidad de los materiales para 1 m³ de hormigón con un 2 o 3 % de aire atrapado.

1.4 Rendimiento de cemento

Es muy importante la comprensión y aplicación adecuada del concepto de rendimiento de cemento para evaluar la eficiencia de las dosificaciones y para también poder hacer los ajustes requeridos en el caso de que un lote sea rechazado, con el objetivo que no vuelva a suceder.

En la valoración de un lote puede resultar necesario ajustar el contenido de cemento en la mezcla. El consumo de cemento en la mezcla se determina a partir del rendimiento de cemento del lote. Este rendimiento constituye uno de los mejores indicadores para medir la eficiencia en el uso del cemento tanto de un diseño determinado de mezcla de hormigón, como de todo el sistema de la producción del hormigón y se define como el cociente de la resistencia a compresión del hormigón a la edad especificada y el consumo de cemento utilizado en su producción.

$$R_{\text{cemento}} = \frac{f_{\text{cm}} \text{ ó } f_{\text{ck}}}{C} \quad (1.3)$$

Donde:

- f_{cm} : Resistencia media a la compresión, kg/cm².
- f_{ck} : Resistencia característica a la compresión, kg/cm².
- C: Consumo de cemento, kg/m³.

Para el diseño de mezcla en el laboratorio, la resistencia a la compresión del hormigón a utilizar es la media (f_{cm}), pues en estos casos la población disponible es pequeña. A los efectos de la producción de campo del hormigón, ya sea industrial o a pie de obra, es indispensable utilizar la resistencia característica obtenida (f_{ck}), que es la resistencia especificada en los proyectos.

1.4.1 Indicadores de rendimientos de cemento

Tabla 1.1 Rendimiento del cemento en condiciones de explotación en el campo.

Tipo de hormigón	Rendimiento del cemento	
	Buena	Aceptable
Hormigones sin aditivos	0,65 o más	0,60 a 0,64
Hormigones con aditivos plastificantes (Hasta un 15 % de reducción del agua de amasado)	0,75 o más	0,70 a 0,74
Hormigones con aditivos superplastificantes (Hasta un 30 % de reducción del agua de amasado)	0,80 o más	0,75 a 0,79

Fuente: Howland Albear Juan J. y Gayoso Blanco R., 2006

1.5 Conclusiones parciales

1. El hormigón es el material compuesto por una mezcla de cemento, agregados y agua, sus propiedades van a depender de los aditivos químicos y de los resultados de las caracterizaciones de los materiales
2. Los diseños de mezclas constituyen métodos para optimizar el trabajo y ahorrar recursos, es por ello que muchos investigadores incursionaron en este tema. De los diversos diseños abordados en el capítulo se pudo apreciar que tienen gran similitud en cuanto a la elección del asentamiento, el tamaño máximo de áridos, entre otros; por lo cual se eligió por el autor para realizar el trabajo el método de la ACI 211.1, por ser el que reúne mayores elementos a la hora de preparar una dosificación.
3. El rendimiento de cemento constituye un indicador para evaluar el hormigón producido, cuyo rendimiento dependerá del consumo de cemento empleado y de

la resistencia característica a compresión del hormigón, así como del empleo de aditivos químicos en la mezcla, para posteriormente obtener una evaluación de acuerdo al valor calculado y lo estipulado en las tablas.

CAPÍTULO II: Materiales y métodos utilizados en el diseño de experimento

Este capítulo tiene como objetivo describir los materiales y métodos utilizados en la campaña experimental, como parte de los métodos particulares empíricos de investigación científica a través de los diseños de mezclas de hormigón.

2.1 Definiciones de la campaña experimental

En la Empresa de Proyectos e Investigaciones de las FAR (EMPI-FAR No.4), resulta de gran importancia la elaboración de hormigones correctamente dosificados para satisfacer las necesidades de obras destinadas con fines militares. Basándonos en las dosificaciones elaboradas por la ENIA, se diseñó una mezcla de hormigón, empleando el cemento de una forma más económica y racional, para verificar que cumpliera con lo estipulado por el Ministerio de la Construcción.

Se elaboró un hormigón de resistencia 30 MPa, utilizando los áridos procedentes de los centros de producción Antonio Maceo y Planta Libertad, el aditivo empleado fue SAHE B2R9. El material elaborado será empleado en las viviendas prefabricadas tipo FORSA de Gelpi (Matanzas).

Objetivo de los experimentos a realizar:

El objetivo de los experimentos es caracterizar los materiales empleados, determinar la resistencia a compresión del hormigón, según el diseño de mezcla elaborado siguiendo la metodología de la ACI. Por último determinar la porosidad efectiva y la sorptividad del hormigón elaborado, para evaluar posteriormente los valores de rendimientos de cementos obtenidos.

2.2 Materiales

Los materiales constituyentes del hormigón no pueden contener sustancias dañinas en cantidades tales que puedan tener una influencia negativa en la durabilidad del hormigón o provoquen la corrosión del acero de refuerzo y deberán ser adecuados para el uso previsto del hormigón. Aunque la aptitud general del uso de un material

constituyente esté establecida, eso no significa que pueda ser empleado en todos los casos y para todo tipo de hormigones.

A partir del diseño de mezcla realizado, se obtendrán los resultados de la resistencia a la compresión del hormigón a las edades de 7 y 28 días, también se evaluarán los parámetros relacionados con relación agua/cemento, asentamiento y extensión del hormigón.

Según la NC120: 2018 los requisitos para cada tipo de exposición serán especificados en términos de:

- Tipos y calidades permitidas para los materiales constituyentes
- Relación agua/cemento máxima
- Contenido mínimo de cemento
- Valor mínimo de resistencia a compresión del hormigón
- Valor máximo de porosidad efectiva del hormigón. f (%)
- Valor máximo de velocidad inicial de absorción capilar (Sorptividad) del hormigón. $S \left(\frac{m}{s} \right)^{1/2}$

Y en el caso en que resulte necesario:

- Contenido mínimo de aire incorporado en el hormigón

2.2.1 Áridos. Métodos de ensayos

Los áridos se caracterizaron y se evaluó la conformidad por los requisitos de la NC 251:2018 la cual tiene como título Áridos para Hormigones Hidráulicos- Requisitos.

Propiedades geométricas de los áridos. Técnicas de ensayos.

2.2.1.1 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200).

Fundamento el método:

El procedimiento se basa en separar mediante lavados y tamizados sucesivos, las partículas finas existentes en los áridos. Entendiéndose por finos las porciones que pasan a través del tamiz de 0,074 mm (No. 200).

Aparatos y utensilios:

- Estufa: La misma deberá ser capaz de mantener una temperatura constante entre 105 - 110 ° C.
- Recipiente metálico o plástico: Su capacidad deberá ser suficiente para mantener la muestra cubierta de agua.
- Tamices: Dos tamices de agujeros cuadrados: Uno de 0,074 mm (No. 200) y otro con abertura mayor de aproximadamente 1,19 mm (No.16).
- Frasco lavador: Frasco lavador de 500 ml de capacidad.

Preparación de la muestra:

- La muestra se homogeneiza con suficiente humedad para evitar la segregación del árido objeto del análisis.
- Se pone en un recipiente y se deseca en la estufa hasta peso constante a una temperatura que no exceda de 105 – 110°C.
- El peso de la muestra para el ensayo se tomará según la Tabla 2.1, cuando esté a temperatura ambiente y después de cuarteada

Tabla 2.1 Peso de la muestra para el ensayo

Tamaño nominal de las partículas mayores	Peso de la muestra (kg)
Hasta 4,76 mm	0,5
Mayores de 4,76 mm y menores de 38mm	2,5
38 mm o mayor	5,0

Fuente: NC 182: 2002: Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (no. 200).

Procedimiento:

- La muestra después de pesada se colocó en el recipiente y se le añadió agua hasta cubrirla para poder mezclarla y agitarla convenientemente sin que se produjeran pérdidas, tanto de áridos como de agua.
- Se agitó vigorosamente con el fin de poner en suspensión las partículas finas que pasan por el tamiz de 0,074 mm (No. 200) hasta obtener su separación de las partículas gruesas.
- Inmediatamente después se vertió el agua que contenía las partículas en suspensión en los dos tamices colocados con el tamiz más grueso encima, evitando en lo posible la decantación de las partículas gruesas de la muestra.
- El proceso de lavado se repitió hasta que el agua utilizada salió completamente limpia y clara.
- Todo el material retenido en los tamices se unió a la muestra lavada. El árido lavado se deseca hasta peso constante.

Determinación por volumen:

- Se tomó un volumen de agua suficiente para cubrir la muestra y se echó en el frasco. Se introdujo la muestra de peso conocido y se agitó el frasco hasta eliminar el aire atrapado.
- El volumen combinado de la muestra y el agua se determinará mediante la lectura directa cuando se utilice un frasco graduado.
- Se determinó el volumen combinado de la muestra y el agua, llenando el frasco hasta la marca con un volumen medido de agua y restando este volumen del frasco.

Método de cálculo:

Se calculará el porcentaje de material fino que contiene el árido con arreglo a la fórmula:

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = \frac{a-b}{a} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

a: peso de la muestra original seca

b: peso de la muestra seca después de lavada

Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla.

Fundamento del método:

Se obtienen las partículas de arcilla contenidas en los áridos por medio de una selección, y se determina el porcentaje que representan del peso del árido.

Aparatos y utensilios:

- Estufa: La misma deberá ser capaz de mantener una temperatura constante entre 105 °C - 115 °C
- Recipiente: Sus dimensiones deberán permitir la extensión, en su fondo, de las muestras de áridos en capas delgadas
- Tamices: Tamices de 38,1 mm; 19,1 mm; 9,52 mm; 4,76 mm; 2,38 mm; 1,19 mm y 0,84 mm
- Balanza: Su capacidad deberá ser no menor de 5 kg y sensibilidad de 0,1 g

Preparación de la muestra:

- Las muestras se obtuvieron por cuarteo. Las mismas se trataron de manera tal que no se rompieran las partículas de arcilla que pudieran estar presentes
- Las muestras se secaron hasta peso constante a una temperatura de 105 - 110° C
- Las muestras de áridos finos fueron formadas por las partículas retenidas en el tamiz con abertura de malla de 1,19 mm (No. 16) y su peso no fue menor de 100g.

- Las muestras de áridos gruesos se separaron en diferentes tamaños usándose los siguientes tamices: 38,1 mm (1 ½´´) - 19,1 mm (3/4´´) - 9,52 mm (3/8´´) – 4,76 mm (No.4). El peso de la muestra cumplió que no fuera menor del indicado en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Peso mínimo de la muestra para el ensayo

Tamaño de las partículas	Peso de la muestra (g)
Mayores o igual de 38,1 mm	5000
38,1-19,1 mm	3000
19,1-9,52 mm	2000
9,52-4,76 mm	1000

Fuente: NC 179: 2002: Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcillas

- En el caso de mezclas de áridos finos y gruesos, el material se separó en dos tamaños por medio del tamiz de 4,76 mm (No. 4) y las muestras de áridos finos y gruesos se separaron de acuerdo a lo indicado en los puntos anteriores.

Procedimiento:

- Se extendió la muestra en una capa delgada en el fondo del recipiente y se examinó para descubrir las partículas de arcilla. Cualquier partícula que pueda dividirse finamente con los dedos se clasificó como partícula de arcilla. Estas se deberán presionar contra una superficie dura.
- Después de haberse pulverizado todas las partículas de arcilla, se separó el residuo de las mismas usando los tamices que se prescriben en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Relación entre el tamaño de las partículas de la muestra y el tamaño del tamiz de ensayo

Tamaño de las partículas que conforman la muestra	Tamaño de tamiz para separar los residuos de las partículas de arcilla
Mayores o igual de 38,1 mm	4,76 mm (No.4)
38,1-19,1 mm	4,76 mm (No.4)
19,1-9,52 mm	4,76 mm (No.4)
9,52-4,76 mm	2,38 mm (No.4)
Árido fino retenido en el tamiz de 1,19 mm (No.16)	0,84 mm (No.20)

Fuente: NC 179: 2002: Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcillas

Expresión de los resultados:

Se calcula el porcentaje de partículas de arcilla con aproximación de 0,1 %, tal como sigue:

$$L = \frac{W - R}{W} \quad (2.2)$$

Donde:

L: Porcentaje de partículas de arcilla en la muestra

W: Peso de la muestra (g)

R: Peso de la muestra después de separarle las partículas de arcilla (g)

Módulo de finura

El módulo de finura para áridos finos se encuentra entre 2,2 y 3,58 según lo planteado por la NC 251: 2018: Áridos para hormigones hidráulicos-Requisitos.

$$MF = \frac{\text{Por ciento retenidos acumulados en tamices normados}}{100} \quad (2.3)$$

Propiedades Físicas de los áridos

2.2.1.2 Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo

Fundamento del método:

Se obtienen los pesos específicos y la absorción de agua por medio del pesaje de la arena en estado seco y saturado en agua.

Aparatos, utensilios y condiciones ambientales del local:

- Balanza: Balanza con capacidad de 1 kg o más y una sensibilidad de 0,01 g.
- Frasco: Un frasco volumétrico (matraz) graduado de 500 ml de capacidad.
- Molde cónico: Molde metálico en forma de cono truncado de 73 mm de altura.

Los diámetros serán de:

- 38 mm +/- 1 mm en la parte superior
- 89 mm +/- 1 mm en la base

- Varilla de compactación: Una varilla metálica cilíndrica de 25 mm +/- 3 mm de diámetro y un peso de 340 g con sus extremos terminados en forma plana para el apisonado.
- Secador de arena: Un secador de arena que proporcione una corriente de aire caliente de velocidad moderada.
- Estufa: Una estufa capaz de mantener uniformemente una temperatura de 105°C - 110°C.
- Condiciones ambientales del local: El local para el ensayo debe ser cerrado y mantener:
 - una temperatura de 20°C +/- 5°C
 - una humedad relativa de 60 % +/- 10 %

Preparación de la muestra:

- Se obtuvieron por cuarteo 1 000 g de la muestra colocándolos en una bandeja. En caso de suciedad en la arena, se realizó un lavado por decantación de la misma.
- Después de desecados a una temperatura de 105°C a 110°C hasta peso constante, se cubrieron con agua y se dejaron sumergidos durante 24 horas.
- Después del período de inmersión se extendió la muestra sobre una superficie plana y comenzó la operación de desecar la superficie de las partículas dirigiendo sobre ella una corriente de aire caliente moderada mientras se agitaba constantemente con el objeto.
- La desecación de la superficie de la arena se realizó hasta que fluyeron libremente las partículas, sin adherirse entre sí. Para comprobar esto se llenó el molde tronco cónico con la muestra suelta sin comprimir. Se apisonó ligeramente la superficie dando 25 golpes con la varilla de compactación e inmediatamente se levantó el molde verticalmente.

Procedimiento:

- Se introdujeron inmediatamente en el frasco volumétrico 500 g de la muestra preparada y se añadió agua destilada hasta un poco por debajo de la marca del enrase del frasco. Para eliminar las burbujas que quedaron se pueden aplicar los siguientes métodos de operación:
 - a) El frasco se somete al Baño de María y se mantiene en ebullición durante 2 horas aproximadamente hasta que sean expulsadas todas las burbujas.
 - b) Se coloca el frasco volumétrico sobre una superficie plana, se inclina unos 30° y se hace rodar expulsadas todas las burbujas.
- Después se colocó en un baño de agua durante una hora aproximadamente, hasta alcanzar la temperatura ambiente. Al final de ese tiempo se añadió agua destilada hasta alcanzar la marca de enrase y determina el peso total con un error menor de 0.01 g.
- A continuación se extrajo la arena del frasco volumétrico y se desecó a peso constante en una estufa a temperatura comprendida entre 105° C y 110° C. Se dejó enfriar a la temperatura ambiente y se pesó con un error menor de 0.01 g.

Expresión de los resultados:

Método de cálculo.

Peso específico corriente: El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen los poros accesibles al agua y los no accesibles, se calcula aplicando la fórmula siguiente:

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{A}{C+B-C_1} \quad (2.4)$$

Donde:

A: Peso en gramos de la muestra secada en la estufa

B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca

C: Peso en gramos del frasco lleno con agua

C1: Peso en gramos del frasco con la muestra y agua hasta la marca del enrase

Peso específico saturado: El peso específico de las partículas saturadas de agua y con la superficie seca, incluyendo en el volumen los poros accesibles al agua y los no accesibles, se calcula aplicando la formula siguiente:

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{B}{C + B - C_1} \quad (2.5)$$

Peso específico aparente: El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen sólo los poros inaccesibles al agua, se calcula aplicando la formula siguiente:

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{C + A - C_1} \quad (2.6)$$

Absorción: El porcentaje de agua absorbida por la arena seca, se calculará aplicando la fórmula siguiente:

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (2.7)$$

2.2.1.3 Áridos. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo

Fundamentos del método:

Se determina el porcentaje de huecos en los áridos utilizando el peso específico corriente y el peso volumétrico compactado determinados a los mismos.

Procedimiento:

A partir de la determinación del peso específico corriente y el peso volumétrico compactado según las normas de referencia, se aplica la fórmula de porcentaje de huecos.

Expresión de los resultados:

Método de cálculo:

El porcentaje de huecos en los áridos se determina con arreglo a la fórmula siguiente:

$$\text{Porcentaje de huecos} = \frac{\text{PEC} - \text{PVC}}{\text{PEC}} * 100 \quad (2.8)$$

Donde:

PEC: Peso específico corriente del árido

PVC: Peso volumétrico compactado del árido

Propiedades mecánicas de los áridos. Técnicas de ensayos.

2.2.1.4 Áridos gruesos. Determinación del índice de triturabilidad

Fundamento del método:

Se basa en la determinación del índice de triturabilidad de la porción de árido grueso sometida a esfuerzo de compresión constante.

Aparatos y utensilios:

- Prensa hidráulica: Prensa hidráulica con capacidad de carga de 0 a 1 000 kN (o a 100 tf).
- Balanza: Balanza técnica de 0 a 20 kg y valor de división de 0,1 kg.
- Estufa: Estufa capaz de mantener uniformemente una temperatura de 105- 115°C.
- Tamices: Tamices con aberturas de malla cuadrada de 38,1 mm, 19,1 mm, 9,52 mm, 4,76 mm, 2,38 mm y 1,19 mm.
- Varilla de compactación: Varilla metálica lisa y recta, con una sección circular de 16 mm de diámetro y 450 mm de longitud, con el extremo para compactar en forma semicircular.
- Depósitos: Depósitos consistentes en dos cilindros de 150 mm y 75 mm de diámetro con fondos desmontables y pistones según el diámetro.

Preparación de la muestra:

El árido grueso que constituye la muestra de ensayo se pasará por tamices de abertura igual al tamaño máximo y mínimo de la fracción en cuestión. La muestra del árido grueso a ensayar será secada en la estufa durante un tiempo no mayor de 24 horas y a un intervalo de temperatura de 105- 110°C. Concluido el secado, la muestra se enfriará a la temperatura ambiente del laboratorio.

Procedimiento:

Preparación de la porción de ensayo:

- De la muestra de árido grueso a ensayar que ha sido tamizada, secada y enfriada se tomó una porción no menor de 6 kg, esta a su vez se dividió en dos partes iguales con el fin de realizar dos ensayos paralelos.
- Se colocó el cilindro sobre el fondo desmontable, se pesó para conocer su masa y se comenzó a verter en el mismo la porción de árido grueso a ensayar en tres capas, dejando caer el material desde una altura de 50 mm, compactando uniformemente la superficie de cada capa con la varilla de compactación.
- Después se pesó el cilindro con la porción del árido grueso a ensayar que contiene, para conocer su masa por diferencia de masa.
- A continuación se colocó sobre la superficie nivelada el pistón del equipo triturador y éste se centra entre los platos de la prensa hidráulica, se aplicó una carga de 200 kN (20 tf) durante 2 minutos aproximadamente, contados a partir del inicio de la aplicación de la carga para la trituración. Transcurrido este tiempo, se retiró el cilindro y se sostuvo, quitándole el fondo sobre una bandeja limpia. Se extrajo el material contenido en el cilindro golpeando las paredes del mismo con un martillo de goma adecuado hasta que las partículas sueltas cayeron sobre la bandeja. El resto de las partículas y el polvo adherido al fondo del pistón y a las paredes interiores del cilindro se desprendieron de ambos utilizando una brocha de cerdas.

- Posteriormente, el contenido de la bandeja fue tamizado por el tamiz de control según el límite de las fracciones del árido grueso, como se muestra en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Definición de los tamices de control para el ensayo

Límite de las fracciones del árido grueso, mm	Tamices de control, mm
38,1-19,1 mm	4,76
19,1-9,52 mm	2,38
9,52-4,76 mm	1,19

Fuente: NC 190: 2002: Áridos gruesos. Determinación del Índice de triturabilidad

Expresión de los resultados:

Método de cálculo:

- El índice de triturabilidad se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$IT = \frac{m_1 - m_2}{m_1} * 100 \quad (2.9)$$

Donde:

m1: Masa de la porción de árido grueso a triturar (g)

m2: Masa de la porción de árido grueso triturada y retenida en el tamiz de control (g)

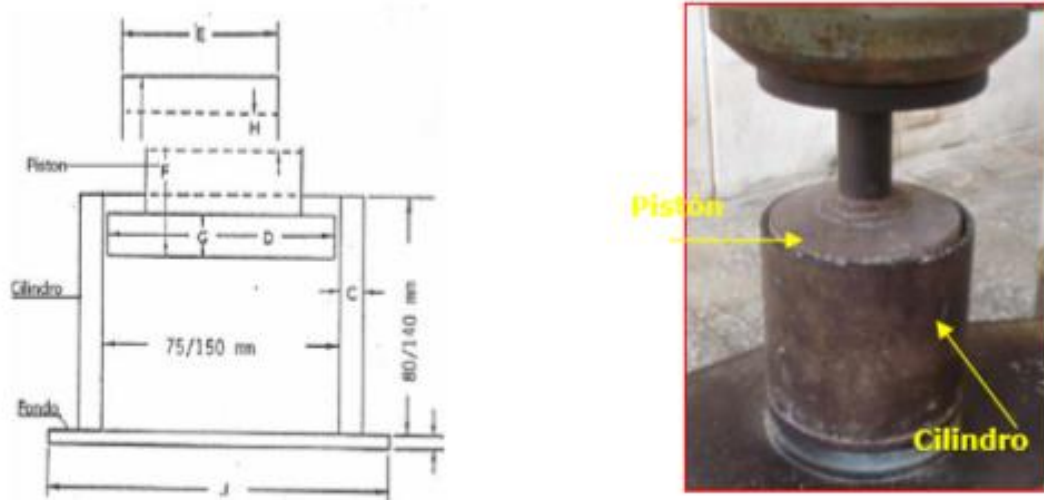


Figura 2.1 Dispositivo para el ensayo del Índice de Triturabilidad

- El índice de triturabilidad de una fracción de árido grueso se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$IT = \frac{\left(\frac{m_{11} - m_{21}}{m_{11}}\right) + \left(\frac{m_{12} - m_{22}}{m_{12}}\right)}{2} * 100 \quad (2.10)$$

Donde:

m11: Masa de la porción de árido grueso a triturar correspondiente al primer ensayo (g)

m21: Masa de la porción de árido grueso triturada y retenida en el tamiz de control correspondiente al primer ensayo (g)

m12: Masa de la porción de árido grueso a triturar correspondiente al segundo ensayo (g)

m22: Masa de la porción de árido grueso triturada y retenida en el tamiz de control correspondiente al segundo ensayo (g)

- El índice de triturabilidad de una mezcla se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ITM = \frac{\sum_{n=1}^s ITF_n * m_n}{100} \quad (2.11)$$

Donde:

- ITFn: Índice de triturabilidad de cada una de las fracciones de árido grueso que componen la mezcla.
- Mn: Porcentaje de cada una de las fracciones de árido grueso que componen la mezcla.

2.2.2 Cemento

El cemento empleado fue Portland P-35 procedente de Cienfuegos. En la caracterización del cemento, se empleó el soporte normativo vigente, según los requisitos establecidos en la NC 95:2017 Cemento Portland- Especificaciones.

Tabla 2.5: Requisitos y métodos de ensayo para diferentes grados de Cemento Portland.

Índice	Requisitos	UM	P-35	Método de ensayo		
Físicos	Superficie específica de Blaine	cm ² /g	2800	NC 980		
	Tiempo fraguado inicial (mín.)	min	45	NC 524		
	Tiempo fraguado final (máx.)	h	10	NC 524		
	Estabilidad de volumen por Le Chatelier (máx.)	mm	10	NC 504		
Mecánicos	Resistencia a la compresión (mín.)	3d	MPa	25	NC 506	
		7d				35
		28d				45

Fuente: NC 95: 2017: Cemento Portland. Especificaciones

2.2.3 Aditivos

Los aditivos químicos deberán cumplir los requerimientos establecidos y se considerarán aptos cuando hayan pasado satisfactoriamente las pruebas de laboratorio y de campo en la producción del hormigón con el resto de los materiales constituyentes previstos.

El aditivo empleado fue SAHE B2R9, Superfluidificante de alta concentración, reductor de agua y retardador formulado para climas calientes.

En cuanto a la descripción del producto Sahe B2R9 es un aditivo líquido a base de una mezcla de polycarboxilatos modificados con una notable propiedad superfluidificante y retardante.

Este aditivo está particularmente indicado para hormigón de alta resistencia. Aumenta la trabajabilidad del hormigón aunque tenga un bajísimo reporte A/C, dándole a este buena impermeabilidad y alta resistencia mecánica a diferentes tiempos de fraguado, conforme a la norma ASTM C-494 Tipo A y Tipo G.

Transporte, almacenamiento, dosificación y rendimiento:

- Sahe B2R9 se encuentra disponible en envases de 208 Lts o envases por pedido en cisterna de 1000 Lts.
- Almacenar el producto bajo techo, en un lugar seco donde la temperatura se encuentre entre los +5c y +50c.

- La dosificación recomendada es variable, y está entre 0,5% y el 0,7% sobre el peso del cemento (0.5 – 0.7 Kg por cada 100 kg de cemento).

Recomendaciones para el uso:

Para obtener el máximo de rendimiento Sahe B2R9 debe ser introducido en la mezcla una vez terminada la operación de agregar el agua a la mezcla. Una eventual sub dosificación (Max 2%) no es dañino. Dosis superiores al 4% produce fuertes aglomeraciones de aire, con una consecuente baja en la resistencia mecánica. Se encuentra disponible la herramienta necesaria para la dosificación automática de Sahe B2R9

Propiedades:

El agregar Sahe B2R9 al hormigón le da a la mezcla las siguientes ventajas:

- Fuerte reducción del reporte agua/cemento sin alterar la laborabilidad.
- Reducción del fenómeno de bleeding aún en mezclas con elevados asentamientos.
- Incremento de la resistencia,
- Transportación de largas distancias

Composición de máxima:

- Polycarboxilatos modificados 18 – 22 % (± 2 %) cantidad sólida
- Ph 5 - 6.0 (± 1.0)
- Densidad 0.02 ± 1.09

Tipos de aplicación:

Para el confeccionamiento en obras de:

- Hormigón de alta resistencia y de alta durabilidad
- Hormigón especial para el premezclado (tiempos rápidos de recuperación del molde)
- Hormigón con alta resistencia con adiciones de sílica de fume
- Hormigón impermeable.

2.2.4 Agua

Especificaciones del agua para el amasado y curado del hormigón:

- Se considera apta para el amasado y curado de los hormigones y morteros el agua fresca potable, proveniente de acueductos y de otras fuentes de abastecimiento, cuya utilización esté adecuadamente avalada por resultados prácticos, con materiales análogos y uso semejante.
- Cuando las aguas para el amasado y curado de los hormigones y morteros no tenga antecedentes de uso, o en caso de dudas, se tomarán muestras y se ensayarán para comprobar su aptitud para el uso previsto.
- El pH del agua estuvo entre 5 y 1.
- El agua no contendrá sustancias que modifiquen la coloración del hormigón y morteros en aquellos que tengan una exigencia estética en su superficie.
- El agua de reciclaje producto del lavado de las tamboras de los carros hormigoneras, se podrá utilizar en el amasado de hormigones y morteros, siempre que la misma no se haya contaminado con agentes nocivos al hormigón, en su proceso de obtención y siempre que se demuestre prácticamente que su uso no produce alteraciones en las propiedades de los hormigones y morteros al compararlos con aquellos producidos con agua potable.
- Las sustancias nocivas y sus limitaciones para el agua de amasado y curado de hormigones y morteros se establecen en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Sustancias Nocivas

Tipo de sustancias nocivas	Contenido máximo permisible (mg/l)
Productos derivados del petróleo, grasas y aceites	1500
Contenido de residuo seco	2000
Contenido de materia orgánica	30
La oxidabilidad del agua	15
Hidratos de carbono y azucares	Exenta

Fuente: NC 353: 2004: Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros—Especificaciones.

Cumpliendo con las especificaciones planteadas anteriormente, fue agregada con diferentes dosis siempre teniendo en cuenta que no afectase la relación agua-cemento.

Posteriormente de haber analizado cada uno de los materiales que componen al hormigón en conjunto con sus ensayos correspondientes, se procede al diseño de mezclas según la metodología de la ACI, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 2.7: Dosificación 1

Materiales	Peso (Kg)
Agua	175
Cemento Portland (P-35)	430
Arena (Planta Libertad)	825
Granito 10-5mm (Antonio Maceo)	760
Aditivo Sahe B2R9	2,65

Fuente: Elaboración propia

Después de haber introducidos los datos a la planta de la ECM-No.4, se realizó la toma de muestras el 15 de abril de 2019, y el llenado de 9 probetas para realizar un primer análisis, en cuanto a resistencia a compresión, porosidad y sorptividad.

2.3 Ensayos al hormigón

2.3.1 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono

Principio del método:

Este método de ensayo se basa en determinar la consistencia del hormigón fresco, a través de la comprobación de la disminución de la altura de una porción de la mezcla fresca de hormigón que ha sido moldeada y compactada en un recipiente en forma de cono trunco.

Utensilios:

- Molde: El molde será construido con chapa galvanizada de 1,5 mm de grosor y tendrá forma de cono truncado. La base inferior tendrá 200 mm de diámetro, la base superior 100 mm y la altura será de 300 mm. La base y el extremo superior estarán abiertos, paralelos entre sí y formarán ángulos rectos con el eje del cono. La superficie interior del molde será perfectamente lisa y la superficie exterior tendrá en su parte inferior dos piezas simétricas, una a cada lado, para apoyar los pies y a 100 mm de la cara superior, dos asas también simétricas, el cual se puede completar con un embudo adicional para facilitar la colocación del hormigón en el molde. (Ver figura 2.3)
- Varilla de compactación: Es una varilla o barra lisa de acero, recta de sección circular, de 15,8 mm de diámetro y 600 mm de longitud, con el extremo redondeado, en forma de semiesfera, utilizada para compactar la mezcla.

Procedimiento.

- El molde para realizar el ensayo estaba completamente limpio, este se sostuvo firmemente en el lugar mientras se llenó por el operador, parado sobre las dos piezas para apoyar los pies. Se llenó el molde rápidamente con hormigón en tres capas cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde. Se compactó cada capa con veinticinco golpes cada una con la varilla de compactación, distribuyendo los golpes en forma de espiral, uniformemente sobre la sección transversal de cada capa. Para compactar la capa del fondo se inclinó la varilla ligeramente para lograr compactar la zona cercana al perímetro del cono y en forma vertical al centro del área de la sección transversal.
- Al llenar y compactar la capa superior se dejó que el hormigón sobresaliera ligeramente del molde.
- Después que la capa superior ha sido compactada, se enrasó con la varilla de compactación, por medio de un movimiento haciendo rodar la varilla por el borde superior del molde y se limpió el posible derrame originado alrededor del cono

- Posteriormente se extrajo el molde rápidamente con cuidado en dirección vertical. La operación de extraer el molde se realizó aproximadamente en 5 segundos con un movimiento vertical y firme, sin que se produjeran movimientos laterales o torsión.
- La operación de llenado del molde, compactación y extracción del molde se realizó sin interrupción en aproximadamente 2,5 minutos.
- Inmediatamente que se extrajo el molde, este se colocó junto a la muestra de hormigón y se midió el asentamiento, mediante de una, determinando la diferencia entre la altura del molde y la altura de un punto promedio de la muestra de hormigón.

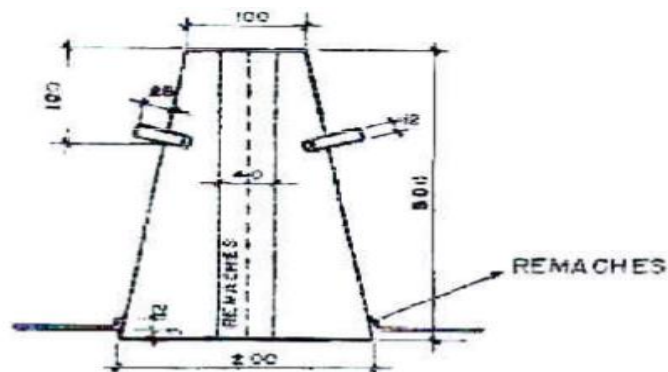


Figura 2.2 Molde para medir asentamiento

2.3.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión

Se realizó el ensayo de resistencia a compresión según lo planteado por las norma NC 244: 2005 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión

Principio del método

Determinar la resistencia a compresión del hormigón.

Aparatos:

- Se usará una máquina de ensayos de compresión que cumpla las características que se señalan a continuación en la figura 2.

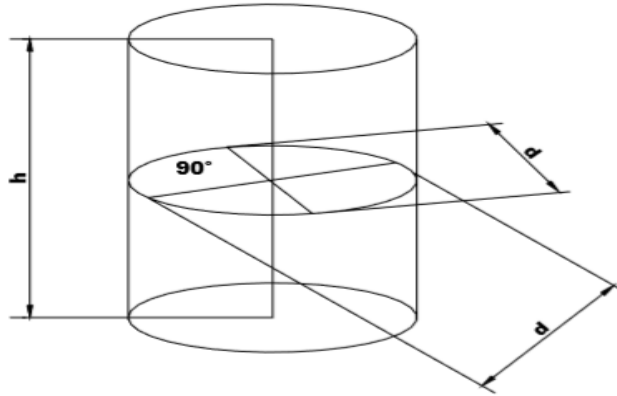


Figura 2.3 Máquina de ensayos de compresión

- Sistema de regulación de aplicación de las cargas: La máquina debe estar provista de un sistema de regulación de cargas tal, que estas puedan aumentarse de forma continua y sin saltos bruscos.
- Platos de carga: La máquina dispondrá de dos platos de acero con una dureza en las caras de contacto con las probetas, no inferior a 55 HRC y con tratamiento tal, que la profundidad de la capa tratada sea tal menos de 5 mm.
 - Plato inferior: 25 mm en estado nuevo y 22.5 mm cuando esté usado.
 - Plato superior: Cuando el radio de la rótula sea inferior al radio de la probeta a ensayar, la porción del plato que sobresale de la esfera de la rótula, debe tener un espesor igual o mayor a la diferencia entre el radio de la probeta y el radio de la esfera.
- Rótula: El plato superior estará montado sobre una rótula esférica que permita efectuar giros de al menos 4 grados sexagesimales alrededor del eje vertical y de cualquier valor en el eje horizontal. El centro de la esfera de la rótula debe coincidir con el centro de la superficie de apoyo del plato superior sobre la probeta, con una tolerancia de $1/200$ de la diagonal o diámetro del plato según sea éste cuadrado o circular. A su vez el centro de la rótula estará en la vertical del centro del elemento que trasmite la carga a los platos, con una tolerancia de $(0.2 \pm h/20)$ mm, siendo h, la distancia entre platos expresada en mm en el ensayo

considerado. La rótula tendrá un diámetro superior al 75 % del diámetro de la probeta a ensayar

- Elementos de lectura de cargas
- Verificación y precisión de la máquina de ensayo

Procedimiento operatorio:

- Probetas, formas y dimensiones: Se emplearon las probetas de dimensión 300x150 mm
- Colocación en la prensa: Las probetas que por las condiciones del ensayo se han curado en cámara húmeda o sumergida en agua, no deben perder humedad antes de la rotura. Para ello se procuró que el tiempo transcurrido desde su extracción de la cámara húmeda o balsa de conservación, hasta el ensayo de compresión, fuera como máximo de 2 h. La probeta se colocó cuidadosamente centrada en el plato inferior. Se movieron los platos de la prensa de forma que el plato superior apoye en la cara superior de la probeta, sin que ayude al elemento de carga. Antes de empezar la carga, se giró con la mano suavemente el plato superior, para conseguir que se efectúe un asiento uniforme
- Aplicación de la carga: A continuación se aplicó la carga de forma continua y sin choques bruscos, de manera que el aumento de tensión media sobre la probeta fuera de $5 \pm 2 \text{ Kgf/cm}^2/\text{s}$ ($0.5 \pm 0.2 \text{ mPa/s}$)
- Carga de rotura: La carga se aplicó sin variación de las condiciones indicadas, hasta que la probeta se deformara rápidamente antes de la rotura. A partir de ese momento, no se modificaron las posiciones de los mandos de la máquina, tomándose como carga de rotura la máxima alcanzada

Expresión de los resultados:

Resistencia a la compresión de una probeta (R'_{bi}), la resistencia a la compresión de una probeta ensayada en MPa se calcula por la fórmula:

$$R_{bi} = \frac{10F}{A} \quad (2.12)$$

Donde:

F: Carga de rotura en kN.

A: Área de la sección transversal de la probeta en cm².

Resistencia a la compresión de una serie de probetas (R'_{bs}). La resistencia a la compresión de una serie de probetas en MPa se calcula por la fórmula:

$$R'_{bs} = \frac{\sum R'_B}{n} \quad (2.13)$$

Donde:

n: Número de probetas de una serie.

2.3.3 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad.

Fundamento del método:

Según la NC 345:2005 Hormigón endurecido - determinación de la absorción de agua por capilaridad se establece un método para determinar la absorción de agua por capilaridad en hormigones endurecidos mediante el método de ensayo propuesto por Göran Fagerlund. Es de utilidad para establecer los requisitos de durabilidad en el diseño de los hormigones y para el chequeo de la capilaridad en los hormigones endurecidos.

Equipos, herramientas, utensilios y medios de medición:

- Bandejas de laboratorio.
- Balanzas con exactitud de 1 gramo.
- Probetas de 250 ml a 500 ml.
- Pie de rey con exactitud de 0,1 mm.
- Arena no absorbente.

- Estufa.
- Resina epoxi o parafina.
- Cubeta de fondo plano.
- Máquina extractora de testigos con sus aditamentos.

Procedimiento:

- Se tomó una probeta cilíndrica o un testigo y se aserró como una lámina delgada de hormigón o mortero de 20 mm a 30 mm de espesor que es preacondicionada a equilibrio de humedad. Este equilibrio se logró con un secado a 50°C por 48 horas (hasta peso constante) y posterior enfriamiento en un desecador. La superficie de succión será la parte aserrada de la muestra que esté libre de carbonatación y otras impurezas. Las probetas ya preacondicionadas se colocaron sobre un lecho de arena fina de no más de 10 mm de espesor en un recipiente estanco que contenga una altura de agua por encima del lecho de arena de aproximadamente 5 mm. Para mantener el nivel del agua en el recipiente se llenó una probeta de agua y se colocó en posición invertida a 5 mm sobre el lecho de arena. Para la realización de este ensayo se empleó agua potable.
- Las probetas se pesaron antes de ser colocadas en el agua y se volvieron a pesar a las edades de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4 h; 6 h; 1; 3; 5 y 7 días contadas desde el inicio del ensayo o su contacto con el agua. Antes de cada pesada se limpió la superficie de la probeta para que no quedasen partículas de arena adheridas.

Cálculo de los resultados:

- Resistencia a la penetración del agua:

$$m = \frac{t_n}{h^2} \text{ (s/m}^2\text{)} \quad (2.14)$$

Donde:

t_n : es el tiempo en el punto crítico (obtenido del gráfico), expresado en s. h es la altura o espesor total del espécimen, expresada en m.

- Coeficiente de absorción capilar:

$$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} * \frac{1}{A} \text{ (Kg/m}^2\text{xS}^{1/2}\text{)} \quad (2.15)$$

Donde:

Q_0 : es el peso del espécimen al inicio expresado en kg.

Q_n : es el peso del espécimen en el punto crítico expresado en kg.

t_n : es el tiempo en el punto crítico (obtenido del gráfico) expresado en s.

A : es el área de succión del espécimen expresada en m^2 .

- Porosidad efectiva

$$\xi_e = \frac{Q_n - Q_0}{A * h * 100} \text{ (\%)} \quad (2.16)$$

Donde:

h : es la altura o espesor total del espécimen expresada en m^2 .

Q_0 : es el peso del espécimen al inicio expresado en kg.

Q_n : es el peso del espécimen en el punto crítico expresado en kg.

A : es el área de succión del espécimen expresada en m^2 .

2.3.4 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).

La velocidad de absorción de agua depende no solo del porcentaje de porosidad efectiva, sino de la tortuosidad, de los cambios de sección y de la interconectividad de los poros

capilares. Este ensayo es de utilidad para establecer y comprobar los requisitos de durabilidad tanto para el diseño de los hormigones a partir de las probetas, como para los hormigones en las estructuras, a partir de los testigos extraídos.

Según la NC 967: 2013 este método de ensayo pretende determinar la susceptibilidad de un hormigón no saturado a la penetración del agua. En general la velocidad de absorción de agua del hormigón en la superficie, difiere de la velocidad de absorción de agua de una muestra tomada en su interior. La superficie exterior está frecuentemente sujeta a un curado deficiente y está expuesta a las condiciones más potencialmente adversas. Este método de ensayo permite medir la velocidad de absorción tanto de la superficie como del interior del hormigón a través de un testigo perforado, por lo tanto se puede evaluar la velocidad de absorción a diferentes distancias de la superficie expuesta. El testigo se puede perforar vertical u horizontalmente.

En este método de ensayo solamente una superficie es expuesta al agua a la temperatura del local de ensayos, mientras las otras superficies son selladas para simular la absorción de una estructura que está en contacto con el agua sólo por uno de sus lados.

La velocidad de absorción de agua (sorptividad) del hormigón hidráulico se determina midiendo el incremento de la masa de una probeta como resultado de la absorción de agua en función del tiempo, cuando sólo se expone al agua una superficie de la probeta. La superficie de la probeta que está expuesta al agua se sumerge y el agua ingresa al hormigón no saturado debido a la succión capilar a partir del contacto con el agua.

Reactivos y materiales:

- Resina epóxica o parafina para el sellaje de las superficies laterales de la probeta. El material utilizado para el sellaje no requiere un tiempo de curado mayor de 10 minutos.
- Bolsas de polietileno para almacenaje, con cinta de sellado, lo suficientemente grandes para contener al menos una probeta de ensayo, pero no mayor que cinco veces el volumen de la probeta.
- Toalla de papel o paño, para secar el exceso de agua de la superficie de la probeta.

Aparatos:

- Máquina extractora de testigos con sus aditamentos
- Cortadora de probetas de hormigón (adecuada para obtener un corte uniforme).
- Calibrador o pie de rey para medir las dimensiones de las probetas hasta el 0,1 mm más cercano.
- Bandejas de laboratorio o cubetas de fondo plano que sean impermeables al agua de un material resistente a la corrosión y lo suficientemente grande para acomodar las probetas de ensayos apoyadas sobre los cintillos con las superficies a ser ensayadas expuestas al agua.
- Báscula de plato superior con capacidad suficiente para pesar las probetas de ensayo y con una exactitud como mínimo de $\pm 0,01$ gramos.
- Dispositivos de soporte, pines, cintillos de madera, plásticos finos o de cualquier otro material resistente a la corrosión en agua o en soluciones alcalinas, que permita el libre acceso al agua o a la superficie expuesta de la probeta durante el ensayo.
- Cronómetro, reloj con parada u otro dispositivo de tiempo con exactitud de ± 1 s.
- Cámara medioambiental, una cámara con circulación de aire capaz de mantener una temperatura ambiente de $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(80 \pm 3) \%$. Alternativamente se puede emplear una estufa que garantice una temperatura de $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ y dentro un desecador lo suficientemente grande para contener las probetas a ensayar. La humedad relativa es controlada en el desecador a $(80 \pm 0,5) \%$ mediante la colocación de agua en su parte inferior que no esté en contacto directo con las probetas.

Procedimiento:

- Se colocaron las probetas de ensayo en la cámara medioambiental a temperatura de $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ y una humedad relativa de $(80 \pm 3) \%$ durante 3 días.

Alternativamente, se colocaron las probetas de ensayo en un desecador dentro de una estufa a temperatura de $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ por 3 días.

- Después de los 3 días, se colocó cada probeta dentro de una bolsa de polietileno para almacenaje sellable. Utilizando una bolsa separada para cada probeta.
- Se almacenó la bolsa sellada a $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ como mínimo durante 15 días antes de comenzar con el procedimiento de la absorción.
- Se extrajo la probeta del recipiente de almacenaje y registró la masa de la probeta acondicionada al 0,01 g más cercano, antes de sellar sus superficies laterales.
- Se midieron 4 diámetros de la probeta en la superficie a que va a quedar expuesta al agua. Se midieron los diámetros al 0,1 mm más cercano y se calculó el diámetro promedio al 0,1 mm más cercano.
- La superficie lateral de cada probeta fue sellada con resina epóxica, parafina o un material de sellado apropiado. Se selló el extremo de la probeta que no va a quedar expuesto al agua utilizando una liga o banda elástica.
- . El procedimiento de absorción Se realizó con $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ empleando agua de la pila acondicionada a la misma temperatura.

Expresión de los resultados:

- La absorción I, es el cambio en la masa dividida entre el producto del área de la sección transversal de la probeta de ensayo y la densidad del agua. Para este ensayo la variación de la densidad del agua con la temperatura es obviada y se utiliza un valor constante de $0,001 \text{ g/mm}^3$.

Las unidades de I son en mm.

$$I = \frac{m_t}{a + d} \quad (2.17)$$

Donde

I: Absorción (mm)

m_t : Cambio en la masa de las probetas en gramos, al momento t

a: Área expuesta de la probeta, (mm²)

d: Densidad del agua, (0,001 g/mm³)

- La velocidad inicial de absorción de agua (mm/s^{1/2}) se define como la pendiente de la línea que sea el mejor ajuste a I ploteado contra la raíz cuadrada del tiempo (s^{1/2}).
- La velocidad secundaria de absorción de agua (mm/s^{1/2}) se define como la pendiente de la línea que sea el mejor ajuste a I ploteado contra la raíz cuadrada del tiempo (s^{1/2}), utilizando todos los puntos desde 1 día a 7 días. Utilice la regresión lineal por mínimos cuadrados para determinar la pendiente. Si los datos entre (1 y 7) días no siguen una relación lineal (un coeficiente de correlación de menos de 0,98) y muestran una curvatura sistemática, la velocidad secundaria de absorción de agua no puede ser determinada.
- Precisión: El coeficiente de variación de la repetibilidad ha sido determinado como el 6,0 % en mediciones preliminares de la absorción por este método de ensayo, para un simple laboratorio y un simple operador. Se requiere la organización de un programa ínterlaboratorios para desarrollar los valores de repetibilidad y reproducibilidad.

2.3.5 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.

Fundamentos del método:

Calcular la resistencia característica real a la compresión

Método de cálculo:

- La resistencia a la compresión de cada una de las probetas ensayadas (f_{ci}) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{ci} = \frac{10F}{A} \quad (2.18)$$

Donde

F: Carga de rotura (kN);

A: Área de la sección transversal de la probeta (cm²)

- La resistencia a compresión de la serie de probetas se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{ci} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \quad (2.19)$$

Donde

n: número de probetas de la serie

- El recorrido de la serie de probetas se calcula como la diferencia entre el valor mayor de resistencia a compresión de las probetas de la serie menos el valor menor. Si las probetas se han ordenado adecuadamente en el registro, o sea de mayor a menor, entonces:

$$R = f_{c1} - f_{cn} \quad (2.20)$$

- La resistencia media a la compresión del hormigón del lote (f_{cm}) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{cs}}{m} \quad (2.21)$$

Donde

m: número de series del lote.

- El valor del recorrido medio del lote de hormigón (R) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.22)$$

- La desviación típica interna del ensayo se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$S_1 = \frac{1}{d_2} * \bar{R} \quad (2.23)$$

Donde

1/d2: Constante que depende del número de probetas promediadas en una serie (Ver Tabla 2.8)

Tabla 2.8 Valor de la constante 1/d2

Cantidad de probetas	Valor de 1/d2
2	0,8865
3	0,5967

Fuente: NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real

- El coeficiente de variación interno del ensayo (Within Test) se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$V_1 = \frac{S_1}{f_{cm}} * 100 \quad (2.24)$$

Los valores límites de V1 para diferentes grados de control se muestran en la Tabla 2.9. Este coeficiente permite evaluar la calidad del ensayo y el nivel de control en la preparación de las probetas, tanto a pie de obra, en las plantas preparadoras, como en la confección de mezclas de prueba en el laboratorio.

- La desviación típica del lote se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{s=1}^m (f_{cs} - f_{cm})^2}{m - 1}} \quad (2.25)$$

La Sn refleja las variaciones entre amasadas de hormigón, o lo que es lo mismo, entre las series de probetas. Estas variaciones son debidas fundamentalmente a las variaciones propias de las características y propiedades de los materiales componentes del hormigón,

a las variaciones en la dosificación, el mezclado y el muestreo e incluyen la desviación típica interna del ensayo.

Tabla 2.9 Valores de S_n para diferentes grados de control en hormigones de $f_{ck} \leq 34,5$

Tipo de operación	Valor de S_n en Mpa para diferentes grados de control				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Deficiente
Control de campo (a pie de obra o en planta)	Menor que 2,81	2,82 a 3,52	3,53 a 4,22	4,23 a 4,92	Mayor que 4,92

Fuente: NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real

- El coeficiente de variación del lote se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$V_n = \frac{S_n}{f_{cm}} * 100 \quad (2.26)$$

- La resistencia característica del lote se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,34 * S_n \quad (2.27)$$

Donde

1,34: Valor de Z para una fracción defectuosa permisible aproximadamente del 10%.

- La expresión (2.30) sólo puede aplicarse cuando se cuente con 15 o más valores de medias muestrales. En el caso de poblaciones más pequeñas la expresión de la resistencia característica del lote será:

$$f_{ck} = f_{cn} - t * S_n \quad (2.28)$$

Donde

t: Percentil de Student para un nivel de confianza del 90%, cuyos valores, en función de los grados de libertad “v” se indican en la Tabla 2.10. Donde ($v = n - 1$), o sea, la población de series menos 1.

Tabla 2.10 Valores del percentil t de Student para un nivel de confianza del 90%

Grados de libertad (v)	T	Grados de libertad (v)	t	Grados de libertad (v)	T
1	3,078	12	1,356	23	1,319
2	1,886	13	1,350	24	1,318
3	1,638	14	1,345	25	1,316
4	1,533	15	1,341	26	1,315
5	1,476	16	1,337	27	1,314
6	1,440	17	1,333	28	1,312
7	1,415	18	1,330	29	1,311
8	1,397	19	1,328	30	1,310
9	1,383	20	1,325	31	1,303
10	1,372	21	1,323	32	1,296
11	1,363	22	1,321	33	1,289

Fuente: NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real

Conclusiones Parciales

1. Los materiales empleados en el diseño de mezcla fueron árido grueso procedente de Antonio Maceo, árido fino de la cantera Planta Libertad, el cemento de Cemento Cienfuegos S.A y aditivo SAHE B2R9.
2. Los métodos experimentales fueron utilizados para la caracterización de los materiales siguiendo los procedimientos establecidos por las normas cubanas.

CAPÍTULO III: Discusión de los resultados obtenidos

Introducción

Este capítulo tiene como objetivo discutir los resultados obtenidos en la campaña experimental de la caracterización de los materiales empleados en el diseño de mezcla y los ensayos correspondientes resistencia a compresión, sorptividad y porosidad efectiva del hormigón obteniendo resultados de rendimiento de cemento.

3.1 Áridos

Propiedades geométricas del árido

3.1.1 Determinación de la granulometría

Para obtener los resultados deseados se usaron los tamices de malla cuadrada de la serie normada ASTM que van desde el N° 3/8” - 9,52mm hasta el N°200 - 0,075 mm, siendo la apertura de cada uno el doble del siguiente y mitad del anterior. Los resultados se muestran en las Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Tabla 3.1 Granulometría del árido fino

Análisis Granulométrico de Agregado Fino No. 4 (4,75 Mm)- No. 100 (0,15 mm)												
Tamices	Pulgadas	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	Conforme
Tamices	mm	25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15	
Por Ciento Pasado	%				100	97	75	45	33	15	4	
Incertidumbre (U) Para K=2	%					±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	±0,01	
Especificaciones	Máximo (%)	100	100	100	100	100	100	80	60	30	10	
	Mínimo (%)	100	100	100	100	90	70	45	25	10	2	

Tabla 3.2 Granulometría del árido grueso

Análisis Granulométrico del árido grueso (10-5mm)						No Conforme
Tamices(pulgadas)	1/2 "	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	
Tamices (mm)	12,50	9,52	4,75	2,36	1,18	
% Pasado	100	90	11	3	3	
Especificaciones	100	100	35	10	5	
	100	85	15	0	0	

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados obtenidos de granulometrías, el autor considera que la arena al evaluarse de conforme no afectará la resistencia del hormigón, mientras que el granito presenta problemas en cuanto al porcentaje de pasado en el tamiz No. 4, puesto que el contenido de granos exigidos por las especificaciones de dicho tamiz se quedó por debajo, lo que significa que el árido no poseía el fino necesario para que fuera evaluado de conforme. Esta ausencia de finos afectaría propiedades como densidad y compacidad a la hora de cubrir los espacios vacíos, en cuanto a la superficie específica sería menor la que el material tendría que cubrir al igual que el contenido de cemento a emplear.

3.1.2 Módulo granulométrico o de finura de la arena.

Para obtener el módulo de finura se empleó la ecuación (2.3):

$$MF = \frac{\text{Por ciento retenidos acumulados en tamices normados}}{100}$$

$$MF = \frac{3 + 25 + 55 + 67 + 85 + 96}{100} = 3,31$$

Según la NC 251:2018: Áridos para hormigones hidráulicos- Requisitos, el rango del módulo de finura para los áridos finos será entre 2,2 y 3,58. Por lo que la arena resulta conforme de acuerdo a este parámetro. Este resultado es válido puesto que poseer muchos finos aumenta la docilidad y la trabajabilidad pero aumenta el contenido de agua y cemento. Por lo que según Guevara (2011), al adicionar más agua aumenta la fluidez de la mezcla, y por tanto, la trabajabilidad y plasticidad, lo cual presenta grandes beneficios para la mano de obra, pero no obstante, comienza a disminuir la resistencia debido al mayor volumen de espacios creados por el agua libre.

Nunca el módulo de finura será índice de la granulometría. Pueden existir infinidad de áridos con el mismo módulo de finura que tengan granulometrías totalmente diferentes. La ausencia de finos según Vélez (2010) garantiza la permeabilidad de las mezclas para obtener un hormigón menos poroso y garantizar una mayor durabilidad, debido también a una menor velocidad de absorción capilar.

3.1.3 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200).

Cuando este material se encuentra en exceso en los áridos tiende a adherirse a las partículas de mayor tamaño, impidiendo una buena adherencia de este último con la pasta de cemento. Esto trae como resultado baja resistencia a los esfuerzos mecánicos de los hormigones que contienen dichos áridos (Franco, 2015).

Al aumentar el contenido de granos finos disminuye la compacidad del árido y será necesario aumentar la cantidad de cemento y agua. En cada caso habrá que satisfacer ambos aspectos: la compacidad del árido y el contenido óptimo de finos (Jiménez 2000).

Para el cálculo del material más fino que pasas por el tamiz de 0,074 mm (No.200) se empleó la ecuación 2.1

Árido fino

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = \frac{a - b}{a} * 100$$

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = \frac{500 - 484,5}{500} * 100 = 3,10 \%$$

Árido Grueso

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = \frac{500 - 490,5}{500} * 100 = 1,90 \%$$

Teniendo en cuenta la NC 251:2018: Áridos para hormigones hidráulicos- Requisitos, 3,10 % es un valor conforme. Mientras que para el árido grueso según la especificación de la norma debe ser menor que 1%, por lo cual no cumple y se evalúa de no conforme. Según Franco (2015) cuando este material se encuentra en exceso en los áridos tiende a adherirse a las partículas de mayor tamaño, impidiendo una buena adherencia de este último con la pasta de cemento. Esto trae como resultado baja resistencia a los esfuerzos mecánicos del hormigón. Es decir, analizando el caso de estudio, quien tendrá problemas es el árido grueso que no cumple con la normativa, lo que traería consigo problemas de

adherencia con el cemento, dando lugar a existencia de posibles poros, aumentando la velocidad de absorción capilar y problemas de resistencias.

3.1.4 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla.

Los terrones de arcilla constituyen una impureza dentro del árido, que en dependencia de su magnitud puede tornarse muy grave y por lo tanto anular su posible empleo en la producción de hormigones.

La presencia de arcilla en el hormigón puede ser el origen de un aumento de la cantidad de agua necesaria para el amasado y de un eventual hinchamiento que motiva retracción y fisuración cuando la mezcla se seque, provoca además, una disminución notable de la adherencia árido/pasta reduciendo considerablemente la resistencia de los hormigones (Gayoso, 2007).

Se considera perjudicial hasta un 1% de arcilla pues afecta la resistencia a compresión del hormigón elaborado con ese árido.

Para el cálculo del contenido de partículas de arcilla se empleó la ecuación 2.2

Árido fino

$$L = \frac{W - R}{W}$$

$$L = \frac{1000 - 1000}{1000} = 0$$

Árido Grueso

$$L = \frac{1000 - 1000}{1000} = 0$$

Basándose en la NC 251:2018 la cual tiene como título Áridos para hormigones hidráulicos- Requisitos, el porcentaje de partículas de arcillas no dañarán al agregado, puesto que cumple que sea menor que el 1% en el caso del fino, mientras que el agregado grueso cumple también siendo menor que 0,25%. Por tanto los resultados arrojados permiten afirmar que la mezcla no presentó problemas de adherencia ni de esfuerzos mecánicos, lo que contribuirá a la existencia de menos poros y una menor velocidad de absorción capilar.

Propiedades físicas del árido

3.1.5 Pesos específicos y absorción de agua

El peso (masa) específico es una importante característica de la composición mineralógica y naturaleza de la roca. Respecto al hormigón, la importancia que tiene el peso específico de un árido reside en el hecho de que sus valores son el punto de partida para el cálculo de las dosificaciones de las mezclas y de los porcentos de vacíos.

El objetivo fundamental de la obtención del peso específico del árido radicó en la determinación de los porcentos de vacíos, factor fundamental para desarrollar el diseño de la mezcla de hormigones.

Los pesos específicos se determinaron por la relación entre el peso y el volumen que ocupan. La diferencia entre los distintos pesos específicos que se calcularon está en los volúmenes de las partículas que se consideraron en cada caso, por medio de las fórmulas (2.6), (2.7), (2.8) y (2.9).

Árido fino

1. Peso específico corriente

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{A}{C + B - C_1}$$

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{494,071}{632,25 + 500 - 940} = 2,57 \text{ g / cm}^3$$

2. Peso específico saturado

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{B}{C + B - C_1}$$

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{500}{632,25 + 500 - 940} = 2,60 \text{ g / cm}^3$$

3. Peso específico aparente

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{C + A - C_1}$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{494,071}{632,25 + 494,071 - 940} = 2,65 \text{g} / \text{cm}^3$$

4. Absorción de agua

$$\% \text{ de absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500 - 494,071}{494,071} * 100 = 1,20\%$$

Árido Grueso

5. Peso específico corriente

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{490,19}{630 + 500 - 936,24} = 2,53 \text{g} / \text{cm}^3$$

6. Peso específico saturado

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{500}{630 + 500 - 936,24} = 2,58 \text{g} / \text{cm}^3$$

7. Peso específico aparente

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{490,19}{630 + 490,19 - 936,24} = 2,67 \text{g} / \text{cm}^3$$

8. Absorción de agua

$$\% \text{ de absorción} = \frac{500 - 494,19}{490,19} * 100 = 2\%$$

La absorción de un árido se define como la cantidad de agua que contiene el árido en sus poros, grietas y otros vacíos. Se determina con el fin de controlar el contenido neto de agua en el hormigón y se puedan determinar los pesos correctos de cada mezcla. En la práctica la absorción del árido se limita con el fin de evitar que incrementos de agua, en la dosificación de la mezcla, vayan a redundar en la pérdida de calidad del hormigón. Se conoce además que en áridos muy absorbentes se producen reblandecimientos con pérdida de la resistencia mecánica del árido (Gayoso, 2007).

La absorción es quizás la propiedad del árido que más influye en la resistencia y consistencia del hormigón, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla.

Además se ha comprobado que cuando el árido a utilizar es poroso, caracterizado así por su elevada absorción de agua, se incrementará la porosidad y permeabilidad del hormigón.

Los resultados de los pesos específicos de la arena, según el autor, cumplieron con la condición establecida en la norma NC 251: 2018: Áridos para hormigones hidráulicos-Requisitos, pues los pesos específicos obtenidos fueron mayores que $2,5 \text{ g/cm}^3$ y la absorción de agua no superó el 3 % de la masa seca del mismo. En cuanto al agregado grueso también se cumplieron los requisitos de la norma antes expuesta. Los mismos son de gran utilidad para el cálculo de los porcentos de vacíos, considerado como uno de los parámetros necesarios para medir porosidad.

3.1.6 Determinación de los pesos volumétricos y porcentaje de vacíos.

Se determinaron los pesos volumétricos suelto y compactado por medio de los pesajes de los materiales en cuestión en un recipiente de volumen conocido. Luego se calcularon los pesos unitarios, estos se emplearon para establecer relaciones prácticas entre volumen- peso y se usaron para calcular el porcentaje de vacíos en el agregado inerte como lo indica la ecuación (2.10).

Árido fino

9. Determinación del por ciento de huecos

$$\text{Porcentaje de huecos} = \frac{\text{PEC} - \text{PVC}}{\text{PEC}} * 100$$

$$\text{Porcentaje de huecos} = \frac{2,57 - 1,152}{2,57} * 100 = 44,82\%$$

Árido Grueso

$$\text{Porcentaje de huecos} = \frac{2,53 - 1,344}{2,53} * 100 = 46,87\%$$

El volumen que ocupa un árido según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al hormigón en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla. Los materiales granulares pueden presentar muy diversos pesos unitarios en dependencia del grado de compactación que alcancen en el volumen cubicado y esto se hará más crítico mientras el tamaño de los granos sea más pequeño (Gayoso, 2007).

A consideración del autor, los resultados obtenidos en cuanto a los porcentos de huecos, se encuentra en concordancia con lo que se analizó anteriormente, puesto que el árido que presentó problemas en la granulometría fue el grueso, debido a la ausencia de finos que pasaron por el tamiz N0.4, es por ello que el porcentaje de huecos de este es mayor que el de la arena, lo que puede traer consigo un aumento de porosidad del hormigón y afectar la durabilidad de la estructura.

3.2 Cemento

Los resultados del cemento fueron evaluados según la NC 95:2017: Cemento Portland. Especificaciones” y la NC 524:2015: Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado por Aguja Vicat

3.2.1 Ensayos Físicos

Se le fueron realizados ensayos de consistencia normal y tiempo de fraguado, densidad del cemento y porcentaje de residuo, como muestra la Tabla 3.3. Los cuales resultaron conformes según la NC 524:2015: Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado por Aguja Vicat.

Según Gómez (2012) el proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La fase inicial de hidratación se llama fraguado y se caracteriza por el paso de la pasta del estado fluido al estado sólido. Posteriormente continúan las reacciones de hidratación alcanzando a todos los constituyentes del cemento, que provocan el endurecimiento de la masa y un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas.

Los valores de consistencia normal y tiempos de fraguados arrojaron resultados positivos que favorecerán los procesos de compactación, colocación y curado, constituyendo este

último según Castaño (2013) un factor de gran importancia para garantizar un mejor sellado de los elementos, disminuyendo la sorptividad del hormigón y por tanto contribuye a una mayor durabilidad de la estructura.

Tabla 3.3 Ensayos Físicos al cemento

Ensayo	Método de ensayo	Resultados			Especificaciones	Evaluación
					P-35	
Consistencia normal y tiempo de fraguado	NC 524-2015	Min	60	T.F.I	Mín. 45	Conforme
		H	2,5	T.F.F	Máx. 10	Conforme
		%	25,0	Consistencia normal	-	Conforme

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Ensayos Mecánicos

En cuanto a estos ensayos el que se le realizó fue el de resistencia a la compresión, teniendo en cuenta la NC 506:2013: Cemento Hidráulico-Método de ensayo-Determinación de la resistencia Mecánica, como se muestra en la Tabla 3.4. Los mismos se evaluaron según las especificaciones de dicha norma como valores conformes.

De forma general, a consideración del autor, el cemento empleado se encuentra en óptimas condiciones para ser empleado en la elaboración de este hormigón hidráulico, cumpliendo con todos los requerimientos de cada una de las normas antes expuestas. Esto trae como resultado que el mismo desempeñe todas las funciones que le confiere a la mezcla, como puede ser la adherencia necesaria para aglomerar los materiales, ser resistente a la compresión y resistir los agentes destructivos exteriores. De esta manera el hormigón elaborado tendrá mayor calidad y una mejor resistencia.

Tabla 3.4 Ensayos Mecánicos al cemento

Ensayo	Método	Resultados		Especificaciones	Evaluación
Resistencia Compresión	NC 506-2013	M Pa	37,8	Mín. 35	Conforme

Fuente: Elaboración propia

Para un volumen dado de cemento, la pasta con el mayor contenido de agua tendrá el mayor volumen total de espacio disponible, pero después de la hidratación completa, todas las pastas contendrán la misma cantidad de productos sólidos resultantes de tal proceso, por lo que la pasta con el mayor espacio total termina en un correspondiente mayor volumen de huecos capilares. Estos espacios huecos se atan entre sí, creando la porosidad. Frecuentemente, los poros crean unas quebraduras finísimas dentro del hormigón, debilitándolo. Los poros están entretrejidos e interconectados, permitiendo así el pasaje lento del agua a través del concreto. Cuanto más denso el hormigón, más apretados los poros y menos agua puede pasar a través de ellos. La estructura de la porosidad en el concreto influye fuertemente en su actuar. La porosidad determina las proporciones a las que las especies agresivas pueden entrar en la masa y causar destrucción (Guevara, 2011).

3.3 Agua

El agua es un componente de suma importancia en la elaboración de pastas, morteros y hormigones hidráulicos, utilizándose principalmente: para hacer reaccionar las partículas de cemento, de laborabilidad o amasado, para mojar los áridos y para el curado. Por este motivo cuando vaya a ser utilizada y no se posean antecedentes de su utilización o en caso de dudas, deberán analizarse en el laboratorio, adaptándose las que cumplan las especificaciones (Franco, 2015).

El agua que se utilizó en el diseño no contenía sustancias en suspensión o disueltas que alterasen el fraguado del cemento, con $\text{pH} < 7$. El agua fue incolora, inodora, fresca y no contenía materia orgánica.

El estudio del agua de mar es de mucha importancia, porque nuestra Isla (Cuba), que es larga y estrecha, al estar rodeada de mar, puede darse el caso de que el agua a utilizar en una obra construida cerca del mar esté contaminada. Si esto ocurre y dicha agua no cumple las especificaciones no podrá ser usada y se recurrirá a otra fuente de abastecimiento, ya que las consecuencias para los morteros y hormigones puede ser catastrófica (Franco, 2015).

A consideración del autor estas buenas características que presentó el agua ayudó a mejorar la mezcla en cuanto a laborabilidad, crear la reacción con el cemento y

posteriormente para el curado del hormigón para que el mismo tuviera la resistencia requerida.

3.4 Hormigón

3.4.1 Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono de Abrams

Al realizar este ensayo, el resultado obtenido se compara con la Tabla 3.5, la cual muestra las clasificaciones de los diferentes asentamientos, según lo establecido por la NC 120:2018.

Tabla 3.5 Tipo de asentamiento por el cono de Abrams.

Valoración cualitativa	Asentamiento (mm)
Seca	10 a 40
Plástica	50 a 90
Blanda	100 a 150
Fluida	160 a 210
Muy fluida	> 220

Fuente: NC 120:2014 Hormigón hidráulico –Especificaciones

El resultado obtenido de asentamiento fue 180 mm por lo que la mezcla se evalúa como fluida, donde el aditivo empleado SAHE B2R9 aumenta la trabajabilidad, la impermeabilidad y la resistencia del hormigón.

3.4.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión

El ensayo se le realizó a las edades de 7 y 28 días y arrojó los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 3.6 y Tabla 3.7.

Tabla 3.6 Resultado del ensayo de resistencia del hormigón a la edad de 7 días en MPa

Muestra	Fecha	Altura (mm)	Diámetro	fci	fcs
1	24-04-19	300	150	26,77	27,24
2	24-04-19	300	150	27,25	27,24
3	24-04-19	300	150	27,72	27,24

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de resistencia a los 7 días se realizan con el fin de verificar el proceso a medida que transcurre el tiempo y detectar una posible anomalía para poder tomar medidas a tiempo. En el caso de estudio dichos resultados son positivos debido a que el hormigón ya superó la resistencia especificada en el proyecto.

Existe el consenso mundial de tomar los 28 días como la edad de referencia para caracterizar la resistencia a compresión de un hormigón, pues se considera que en ese momento ya ha adquirido casi la totalidad de su resistencia final. Pasados los 28 días continúa de forma cada vez más lenta la hidratación del cemento y con ello el aumento de la resistencia a compresión del hormigón (Albear, 2016).

Tabla 3.7 Resultado del ensayo de resistencia del hormigón a la edad de 28 días en MPa

Muestra	Fecha	Altura (mm)	Diámetro	fci	fcs
1	14-05-19	300	150	41,9	41,76
2	14-05-19	300	150	42,4	41,76
3	14-05-19	300	150	41,0	41,76

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados a los 28 días reportan una gran resistencia y por tanto contribuirá a una buena durabilidad de la estructura.

Según Serrano (2017) la evolución de la resistencia en el tiempo viene dada por los valores mostrados en la Tabla 3.8.

Donde se aprecia que dicho parámetro representa a la edad de 3 días el 40% y a los 7 días el 65%, de los 28 días.

Tabla 3.8 Resistencia a compresión de las probetas.

Edad del hormigón	3 días	7 días	28 días
Hormigones de endurecimiento normal (%)	0,40	0,65	1,00

3.4.3 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.

A través de la NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real, se obtuvieron los valores de resistencia característica real, mediante las ecuaciones (2.28) y (2.30).

$$S_n = \sqrt{\sum_{s=1}^m \frac{(f_{cs} - f_{cm})^2}{m-1}} = 0.$$

Como $f_{cs}=f_{cm}$ no hay desviación por lo que esta es nula. Por lo que estimamos mediante la tabla 2.10 la desviación de la planta suponiendo que el grado de control es bueno.

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,34 * S_n$$

$$f_{ck} = 41,76 - 1,34 * 3,53$$

$$f_{ck} = 37,03 \text{Mpa}$$

Como se preveía la resistencia obtenida satisface las necesidades del proyecto por lo que sería bueno discutir los resultados de los ensayos de porosidad efectiva y velocidad de absorción capilar.

3.4.4 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad

La porosidad está reconocida en todo el mundo como uno de los parámetros en el hormigón endurecido de mayor influencia en los mecanismos de transporte de los agentes agresivos hacia el interior de su estructura. Más específicamente dentro del estado poroso-capilar del hormigón es la porosidad efectiva, o sea la porosidad interconectada y conectada a su vez con el exterior, la que tiene una influencia decisiva en el intercambio de humedad con el entorno y por lo tanto en la materialización de dichos mecanismos de transporte. El porcentaje de porosidad efectiva de los hormigones está considerado una medida del grado de durabilidad de las estructuras frente a los agentes agresivos. Además se ha comprobado que cuando el árido utilizado es poroso (lo que se caracteriza por su elevada absorción de agua), se incrementará con ello la porosidad y permeabilidad del hormigón (Howland, 2012).

El ensayo se le realizó a dos muestras, la temperatura ambiente era de 25 °C, arrojando los resultados que se muestran en la Tabla 3.9.

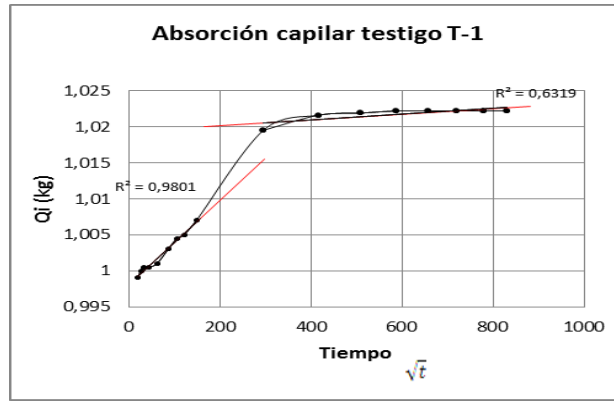
Tabla 3.9 Resultados del ensayo de porosidad

Testigo	Diámetro	Altura	Peso	Peso	Porosidad	Porosidad	U(p)
No.	di (m)	(m)	Inicial Qo(kg)	Qn (kg)	(%)	Media (%)	(%)
1	0,1504	0,02540	0,9980	1,020721	5,040	6,16	2,06
2	0,1502	0,02530	0,9875	1,020083	7,270		

Fuente: Elaboración propia

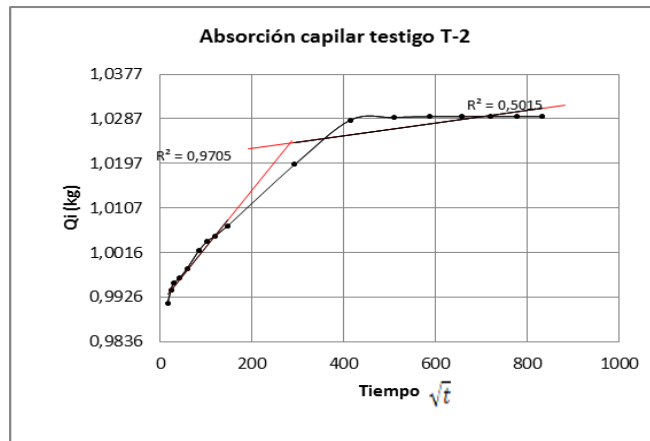
La absorción capilar de los testigos se muestra en las siguientes gráficas:

Gráfica 3.1: Absorción capilar del testigo 1



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 3.1: Absorción capilar del testigo 2



Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar el valor obtenido de porosidad cumple con la NC 120:2018 Hormigón hidráulico-especificaciones, la cual plantea que la porosidad efectiva tiene que ser menor que 10%, aportando entonces al criterio de durabilidad presente también en dicha normativa.

3.4.5 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).

La absorción “I” en mm, en el método de la Sorptividad se define como el cambio en la masa que manifiesta la probeta dividida entre el producto del área de la sección transversal de la probeta de ensayo y la densidad del agua. Para este ensayo la variación de la densidad del agua con la temperatura es obviada y se utiliza un valor constante de 0,001 g/mm³. “I” entonces se calcula por la expresión (2.17).

Mediante este ensayo se obtuvo una velocidad de absorción capilar de $4,21 \times 10^{-5}$, cumpliendo este valor con los requisitos de durabilidad de la NC 120: 2018, la cual plantea para hormigones armados y una zona de agresividad alta una velocidad de absorción capilar no mayor de $5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$.

La velocidad de absorción depende también de la orientación y distribución de los áridos y de la composición de la mezcla (Nasco, 2016). El tipo de agregado y su granulometría, a criterio del autor tiene gran influencia en el resultado final de la sorptividad a causa de la distribución y orientación que estos pueden ocupar dentro del hormigón, llenando mejor los espacios vacíos para evitar la entrada de agua hacia el interior del material.

Según Taus (2003) la sorptividad aumenta a medida que aumenta la relación agua/cemento, por lo que a consideración del autor se hace necesario controlar el empleo del agua en la mezcla, así como del cemento los cuales vienen interrelacionados.

3.4.6 Cálculo del rendimiento de cemento

Posteriormente de obtener la resistencia característica real se calculó rendimiento de cemento empleando la ecuación (1.3).

$$R_{\text{cemento}} = \frac{f_{\text{cm}} \text{ of } f_{\text{ck}}}{C}$$

$$R_{\text{cemento}} = \frac{370,3}{430} = 0,86$$

Este resultado se evalúa como buena basándose en la Tabla 1.2, y según Batista (2013) un rendimiento del cemento de aproximadamente 1, puede interpretarse como, que por cada 1 kg de cemento se obtiene 1kg/cm² de resistencia a la compresión; criterio este que muchos autores lo presentan como índice óptimo a alcanzar en hormigones convencionales. Por tanto, a consideración del autor basándose en lo planteado

anteriormente se realizó un diseño de mezcla donde se empleó un menor contenido de cemento con el objetivo de aumentar este parámetro de rendimiento.

Debido a lo expuesto anteriormente se realizó una nueva dosificación, los materiales se encuentran en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Dosificación 2

Materiales	Peso (Kg)
Agua	175
Cemento Portland (P-35)	420
Arena (Planta Libertad)	945
Granito 10-5mm (Antonio Maceo)	870
Aditivo Sahe B2R9	2,65

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos mediante el ensayo: Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión, arrojaron los resultados mostrados en la Tabla 3.11. Las muestras fueron elaboradas el 22-05-19.

Tabla 3.11 Resultado del ensayo de resistencia del hormigón a la edad de 7 días en MPa

Muestra	Fecha	Altura (mm)	Diámetro	fci (MPa)	fcs (MPa)
1	29-05- 19	300	150	31,4	31,13
2	29-05- 19	300	150	31,2	
3	29-05- 19	300	150	30,8	

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar los resultados de resistencia de esta dosificación son mayores a pesar de haberse utilizado menor cantidad de cemento, esto se debe a que el empleo de

áridos fue mayor. Mediante la tabla 3.8 que muestra la evolución de la resistencia se pudo estimar que la serie de probetas tendrá a los 28 días una resistencia característica real de 41.52 MPa y al calcular el rendimiento de cemento, se obtuvo mediante la ecuación 1.3 un valor de 0,98 el cual es superior al anterior, lo que significa un mejor empleo, eficiencia y ahorro de este material; además que al ser este resultado aproximadamente igual a 1 significa que por cada 1kg de cemento se obtendrá 1kg/cm² de resistencia a la compresión, considerado esta situación lo ideal que pudiera suceder según los investigadores del tema.

Conclusiones parciales

1. De la caracterización del árido fino se obtuvo que cumplió con todas las especificaciones normadas en la NC 251:2018, por lo que se declara conforme, mientras que el árido grueso se evaluó de no conforme debido a que su granulometría no cumple, influyendo esto en propiedades como densidad y compacidad.
2. De los ensayos físicos y mecánicos realizados al cemento se obtuvieron resultados conformes de acuerdo a la NC 95: 2017, influyendo de forma positiva en los valores obtenidos de resistencia, porosidad efectiva y sorptividad del hormigón.
3. El hormigón elaborado en la dosificación 1 cumplió con los valores límites establecidos en la NC 120: 2018, mientras que el hormigón elaborado con la dosificación 2 cumplió con dicha norma en cuanto a resistencia a la compresión.

Conclusiones Generales

1. El rendimiento del cemento depende en gran medida de los diseños de mezcla, el cual interviene en propiedades de durabilidad como resistencia a la compresión, porosidad efectiva y sorptividad del hormigón.
2. Es de gran importancia la utilización de los métodos experimentales establecidos en la caracterización de los materiales los cuales nos van a permitir obtener los resultados para una posterior comparación con los requisitos normados.
3. Los resultados obtenidos de la caracterización de los áridos y del cemento influyeron en el cumplimiento de los requisitos de durabilidad del hormigón establecidos en la NC 120:2018.
4. La dosificación propuesta cumple con el requisito de resistencia a la compresión, puesto que posee un menor contenido de cemento lo cual conlleva a que aumente el rendimiento del mismo.

Recomendaciones

1. Se recomienda a la Empresa de Proyectos e Investigaciones de las FAR que continúe esta investigación con un mayor número de muestras y ensayos para obtener resultados con mayor grado de confiabilidad.
2. Se recomienda otras procedencias de materiales para los diseños de mezclas.
3. Aplicar métodos de algoritmos genéticos para obtener dosificaciones ideales para las condiciones.

Bibliografía

- Albear, J. J. H. 2016. Relación entre la resistencia a compresión de testigos y probetas de hormigón. Estado del arte y propuestas para actualización de la normativa cubana.
- Batista, D. A. 2013. Análisis de relación entre contenido, rendimiento del cemento y resistencias en hormigones hidráulicos.
- Bouza, A. C. R. 2016. Manual técnico de procesos productivos y uso de equipos para la producción local de materiales de construcción.
- Bolívar, O. G. (1987). "Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón".
- Claudio Giordani, D. L. (2004). Cementos.
- Chamorro, A. (2012). Diseño de hormigón de alto desempeño.
- Díaz, V. A. O. R. 2007. Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño.
- Franco, L. 2015. Folleto de prácticas de laboratorio. Instituto superior pedagógico para la educación técnica y profesional.
- Gaspar-Tebar, D. 2009. Aditivos para el hormigón. Calidad y normativa.
- Gayoso, R. 2007. Áridos para hormigón. Especificaciones y ensayos.
- Gómez, M. D. (2012). Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la retracción por secado. Trabajo de diploma. Universidad de Villa Clara Martha Abreu.
- Hernández, R.S. (2013). Controles preventivos del cumplimiento de especificaciones. Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil. Departamento de Construcciones. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Howland, J. J. 2012. Study about the capillary absorption and the sorptivity of concretes with cuban limestone aggregates.

- Jiménez P., García A. y Morán F. (2000) Hormigón Armado. 14 edición. Editorial Gustavo Gili, SA, Barcelona.
- José Vera Agulló, J. G. M. 2009. Filamentos de carbono en hormigones.
- Kumar Mehta, P y Monteiro, Paulo (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. (pp. 54) New York: McGraw-Hill.
- León Consuegra, Liset (2011). Evaluación del mortero restaurador de estructuras Cover Fs Structural V/O con un árido grueso. Matanzas. Trabajo de diploma. Universidad de Matanzas.
- Martínez, A. R. 2014. Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana Universidad Politécnica de Valencia.
- Metclaf, J. B., 1970, "The Specification of Concrete Strength, Part II, The Distribution of Strength of Concrete for Structures in Current Practice," RRL Report No. LR 300, Road Research Laboratory, Crawthorne, Berkshire.
- Metha P., Folliard. K. Rice husk- A unique supplementary cementing material. Durability aspects. Advances in Concrete Technology. ACI SP 154; 2006.
- Murdock, C. J., 1953, "The Control of Concrete Quality," Proceeding, Institution of Civil Engineers (London), V. 2, Part I, July.
- Nasco Díaz, Alberto Gabriel, (2016)," Evaluación del transporte de iones cloruros en especímenes de hormigón hidráulico producidos con cementos de bajo carbono
- NC 95: 2017. Cemento portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 120: 2018. Hormigón hidráulico. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.

- NC 177: 2002. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 178: 2002. Análisis granulométrico. Oficina Nacional de Normalización Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 179: 2002. Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 181: 2002. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 182: 2002. Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (no. 200). Método de ensayo. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 190: 2002. Áridos gruesos. Determinación del índice de triturabilidad. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 192: 2012. Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 251: 2018. Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 345: 2011. Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 353: 2004. Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 504: 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la estabilidad por volumen. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 506: 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la resistencia mecánica. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.

- NC 524: 2015. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la consistencia normal y tiempos de fraguado por Aguja Vicat. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 967: 2013. Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad). Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 980: 2013. Cemento hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la finura y la superficie específica. Oficina Nacional de Normalización. Ciudad de La Habana, Cuba.
- Neville A. Aggregates bond and modules of elasticity of concrete. "ACI Materials journal," U.S.A, 1997.
- Olivares, M. 2004. Evaluation of concrete mechanical strength through porosity.
- Osorio, J. D. 2013. Diseño de mezclas de concreto: Conceptos básicos.
- Pérez, J. R. 2015. Estudio de factibilidad técnico-financiero de las alternativas de inversión para la industria cementera cubana a corto, mediano y largo plazo. Trabajo de diploma. Universidad de villa clara Martha Abreu.
- Rodríguez, T. V. (2008). Los áridos.
- Romea, C. 2014. El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario.
- Serrano, E. M. 2017. Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura.
- Taus, Valeria, (2003), "Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, Vol. 26.
- Vélez, L. M. 2010. Permeabilidad y Porosidad en Concreto.
- Vidaud, E. (2013). De la historia del cemento.

Zamora, L. M. (2013). Límites de conformidad de finos pasados por el tamiz 200. Influencia reológico-mecánica en la matriz del hormigón. Tesis de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil. Departamento de Construcciones. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.

Anexos