

*Universidad de Matanzas Sede “Camilo Cienfuegos”
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Construcciones*



Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Civil

Determinación del contenido de cemento ideal para lograr hormigones durables en la
Empresa Constructora Militar No.4

Autor: Rolando García Peña

Tutor(es): Ing. Liset León Consuegra

Ing. Alfredo Domínguez Tundidor

Matanzas, 2020

PENSAMIENTO

“LA COSA MÁS BELLA QUE PODEMOS EXPERIMENTAR ES LO MISTERIOSO. ES LA FUENTE DE TODA VERDAD Y CIENCIA. AQUEL PARA QUIEN ESA EMOCIÓN ES AJENA, AQUEL QUE YA NO PUEDE MARAVILLARSE Y EXTASIARSE ANTE EL MIEDO, VALE TANTO COMO UN MUERTO: SUS OJOS ESTÁN CERRADOS...”

ALBERT EINSTEIN

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Por medio de la presente declare que **Rolando García Peña** 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.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Miembros del Tribunal:

_____	_____	_____
Presidente	Secretario	Vocal

DEDICATORIA

**DEDICO ESTE TRABAJO DE DIPLOMA A TODAS ESAS PERSONAS QUE SIEMPRE
HAN CREÍDO EN MÍ Y ME HAN BRINDADO SU APOYO DURANTE EL CAMINO, EN
ESPECIAL MI FAMILIA.**

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y hermana que me han ayudado mucho y apoyado en todo lo que he decidido.
- A toda la familia que estuvo pendiente en todo momento de lo que pudiera necesitar.
- A mis tutores Liset León Consuegra y Alfredo Domínguez Tundidor por su tiempo y dedicación.
- A mis compañeros de universidad y amigos por tantos buenos momentos y preocupación constante.
- A los trabajadores de la Empresa Constructora Militar #4 y en especial Alain que fue de mucha ayuda.
- Muchas gracias a todos los que contribuyeron a que se pudiera lograr.

RESUMEN

Actualmente cada vez son más las construcciones que se realizan a nivel mundial, en su mayoría el material más empleado es el hormigón, debido a sus bajos costos de producción y mantenimiento en comparación con otros materiales constructivos. Al incrementarse las construcciones esto conlleva elevar los consumos de hormigón y uno de sus materiales constituyentes el cemento, el cual genera gran cantidad de CO₂ a la atmósfera durante su producción, lo cual no contribuye al cuidado del medio ambiente. Debido al impacto negativo que implica la producción de cemento se vuelve necesario tomar medidas para la disminución de los contenidos de cemento; la Empresa Constructora Militar No.4 no está exenta de estos problemas pues sus índices de consumo han aumentado notablemente en los últimos años llegando a consumir 2057 toneladas de cemento en un año, por ello el objetivo es determinar el contenido de cemento ideal para lograr hormigones durables para la empresa. Se empleó en la investigación áridos procedentes de la cantera Planta Libertad, el cemento empleado fue Portland P-35 procedente de Cemento Cienfuegos S.A y el aditivo Dynamon SP 500 los cuales fueron caracterizados mediante la utilización de métodos experimentales. Se elaboraron 12 probetas de la dosificación 1 a las cuales 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 disminuye el contenido de cemento obteniéndose la dosificación 2 evaluándose igualmente las propiedades establecidas en la norma cubana las cuales fueron cumplidas y posteriormente se calculó el rendimiento del cemento, lográndose un aumento del mismo.

Palabras claves: Cemento; durabilidad; hormigón; mezcla, porosidad y resistencia.

ABSTRACT

Currently more and more constructions are carried out worldwide, most of the most used material is concrete, due to its low production and maintenance costs compared to other construction materials. As construction increases, this leads to higher consumption of concrete and one of its constituent materials, cement, which generates a large amount of CO₂ into the atmosphere during its production, which does not contribute to caring for the environment. Due to the negative impact of cement production, it is necessary to take measures to decrease the cement content; The Military Construction Company No.4 is not exempt from these problems as its consumption rates have increased significantly in recent years, consuming 2,057 tons of cement in a year, so the objective is to determine the ideal cement content to achieve concretes. durable for the company. Aggregates from the Libertad Plant quarry were used in the investigation, the cement used was Portland P-35 from Cemento Cienfuegos SA and the additive Dynamon SP 500 which were characterized by using experimental methods. Twelve specimens of dosage 1 were prepared, which measured settlement, compressive strength, effective porosity and sorptivity, obtaining results that complied with the provisions of NC 120: 2018, thus reducing the cement content, obtaining dosage 2, evaluating Likewise, the properties established in the Cuban norm, which were complied with and the cement yield was subsequently calculated, achieving an increase in it.

Keywords: Cement; durability; concrete; it mixes, porosity and resistance.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
CAPÍTULO I: Fundamentos del estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.	7
1.1 Breve reseña histórica sobre el hormigón	7
1.2 Materiales que componen el hormigón	8
1.2.1 Cemento	9
1.2.1.1 Producción y consumo de cemento a nivel mundial	10
1.2.1.2 Producción y consumo de cemento en Cuba.....	12
1.2.2 Áridos	14
1.2.3 Agua.....	16
1.2.4 Aditivos.....	16
1.3 Propiedades del hormigón.....	18
1.3.1 Propiedades del hormigón en estado fresco	19
1.3.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido	20
1.4 Diseños de mezclas de hormigón	22
1.4.1 Métodos para el diseño de mezclas de hormigón	24
1.4.1.1 Método de Fuller-Thompson	25
1.4.1.2 Método de Bolomey.....	26
1.4.1.3 Método de Faury.....	27
1.4.1.4 Método de la ACI 211.1.....	28
1.4.1.5 Método de Vitervo O'reilly.....	29
1.5 Rendimiento de cemento.....	31
1.5.1 Indicadores de rendimientos de cemento	32
1.6 Conclusiones parciales	32
CAPÍTULO II: Descripción de los materiales y métodos empleados.....	34
2.1 Caracterización de los materiales	34
2.1.1 Áridos	34
2.1.1.1 Propiedades geométricas de los áridos	35
2.1.1.2 Propiedades química de los áridos.....	38
2.1.1.3 Propiedades físicas de los áridos.....	41
2.1.1.4 Propiedades mecánicas de los áridos	45

2.1.2	Cemento	48
2.1.3	Aditivos	49
2.1.4	Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros—especificaciones. NC 353:2003	52
2.2	Diseño de mezcla	53
2.3	Ensayos al hormigón	55
2.3.1	Ensayos al hormigón — propiedades del hormigón fresco. NC-ISO 1920-2: 2010.	55
2.3.2	Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión. NC 244: 2005.	57
2.3.3	Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. NC 345:2005	60
2.3.4	Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad). NC 967: 2013.	62
2.3.5	Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión. NC 192: 2012	66
2.3	Conclusiones Parciales	70
CAPÍTULO III: Discusión de los resultados obtenidos en los diferentes diseños de mezclas.		71
3.1	Áridos	71
3.1.1	Áridos. Análisis granulométrico	71
3.1.2	Módulo granulométrico o de finura de la arena	72
3.1.3	Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (No. 200)	73
3.1.4	Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla	73
3.1.5	Pesos específicos y absorción de agua	74
3.2	Cemento	75
3.2.1	Ensayos Mecánicos	75
3.3	Hormigón	76
3.3.1	Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono de Abrams	76
3.3.2	Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión	76
3.3.3	Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión	77
3.3.4	Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad	78
3.3.5	Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad)	78
3.3.6	Cálculo del rendimiento de cemento	78
3.3.7	Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono de Abrams	78
3.3.8	Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión	79

3.3.9 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión	79
3.3.10 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad	80
3.3.11 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad)	80
3.3.12 Cálculo del rendimiento de cemento	80
3.4 Conclusiones Parciales	80
Conclusiones	81
Recomendaciones	82
Bibliografía	83
Anexos	86

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad no existía el hormigón tal y como lo conocemos hoy, el hombre ante la necesidad de resguardarse del intemperismo se ve obligado a construir su propio refugio y es de esta forma que comienza a tallar las piedras para obtener cobijo en ella, con el paso del tiempo se va perfeccionando la técnica ubicando rocas unas sobre otras según las formas que poseían cada una, logrando que encajaran, más adelante es que comienzan a emplear algún tipo de mortero capaz de repartir las cargas de una forma más equitativa. Pero no es hasta los romanos que surge una fórmula algo parecida a la que se emplea en la actualidad, con la mezcla de piedras, agua y arenas volcánicas que poseen propiedades cementarias, generando un resultado final con características física y mecánicas muy similares a las del hormigón actual, evidencia de ello son algunas de las construcciones del imperio romano que han perdurado a lo largo de los años y en la actualidad las tenemos en pie.

Hace 5000 años aparecen en el norte de Chile las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas. Los romanos dieron un paso importante al descubrir un cemento que fabricaban mezclando cenizas volcánicas con cal viva: cemento de puzolanas. El primer paso en el empleo de la actual materia prima de los cementos se dio en Inglaterra en 1756, al descubrirse las calizas que poseían una proporción importante de arcillas proporcionaban morteros de mejores características. Puede decirse que el primer padre del cemento fue Vicat, que propuso en 1817 el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad: mezclas de arcilla calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente.(Villarino, 2011)

Según González (2012) el hormigón puede definirse como el material resultante de una mezcla íntima y homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua en las debidas proporciones para que pueda fraguar y endurecer de manera óptima. Además, en el momento de su amasado, puede añadirse otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características.

Debido al costo, propiedades físicas y mecánicas es decir ofrece una buena resistencia a compresión, durabilidad, requiere un bajo coste de mantenimiento y la disponibilidad de su materia prima en casi cualquier lugar del mundo es el hormigón uno de los materiales de la construcción más empleado construcciones de todo tipo.

Algunos investigadores piensan que para lograr un hormigón durable es suficiente con diseñar las mezclas con baja relación agua - cemento (a/c), lo cual no es exactamente así, porque se pueden obtener hormigones mal proporcionados, que pueden tener una baja relación a/c y sin embargo ser altamente porosos.(O'Reilly and Pérez, 2008)

Los métodos de dosificación de hormigones tienen por finalidad encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes componentes de los mismos para conseguir mezclas que posean determinadas características de consistencia, compacidad, resistencia y durabilidad. El diseño teórico de una mezcla no es definitorio, es necesario llevar a cabo ensayos y experimentos para comprobar la veracidad de dicho experimento. Existen diferentes métodos de dosificación dentro de los cuales se encuentran Bolomey, Faury, Fuller-Thompson, ACI 211.1 Hormigón normal, Vitervo O'Reilly, entre otros y no se puede mencionar uno como el mejor, según las características del hormigón y las condiciones a la que se va a enfrentar, el proyectista debe ser capaz de elegir cual será el método de dosificación idóneo para el caso.

La mezcla de hormigón se encuentra compuesta de elementos que encontramos en la naturaleza y que mediante un proceso industrial se generan variaciones a su estado inicial de forma tal que cumplan con indicadores normados para que no alteren el resultado final del hormigón, dentro de estos elementos se encuentran el agua, áridos y cemento.

El cemento es el producto industrial más utilizado en el mundo. Es el producto artificial resultante de calcinar hasta un principio de fusión mezclas rigurosamente homogéneas de caliza y arcilla, las cuales se pulverizan junto con otros aditivos como el yeso, el cual sirve para retardar su fraguado.(García, 2011)

A pesar de ser un excelente producto que dota a la mezcla de hormigón de buenas propiedades finales, no se puede pasar por alto que la producción de cemento genera

grandes daños al medio ambiente por la alta acción contaminante que posee, debido a la emisión de CO₂ durante su fabricación y esto sumado al elevado consumo energético que conlleva su producción.

Desafortunadamente, el cemento portland, el componente principal para el aglutinante hidráulico en la industria del hormigón en la actualidad, no es tan respetuosa con el medio ambiente debido al uso intensivo de energía y desempeñar un papel activo en el desarrollo sostenible de grandes emisiones de dióxido de carbono. Típicamente, el concreto ordinario contiene aproximadamente 12% de cemento portland, 8% de agua de mezcla y 80% agregado en masa. La producción de una tonelada de clínker de cemento portland genera liberaciones aproximadamente de una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. La producción de cemento aporta alrededor de 1.500 millones de toneladas de CO₂ a los gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera de la tierra.(Rusjanto, 2010)

Además de la energía consumida, y del CO₂ liberado, las actividades mineras necesarias para la obtención de la roca caliza pueden favorecer la destrucción de ciertos hábitats, así como la liberación de contaminación al aire y agua. En cuanto a este aspecto, se preferirán las explotaciones mineras subterráneas a las canteras a cielo abierto, si bien es cierto, que su coste es sensiblemente mayor.(Cagio et al., 2010)

Según (Lazo and Machado) las estructuras de madera en Cuba son muy limitadas debido a la escasez de la misma. Las construcciones metálicas cuyos perfiles de aceros, están restringidas a escasas construcciones. En contraposición a estas dificultades objetivas actuales, existen en Cuba los yacimientos que puedan suministrar las materias primas necesarias para la fabricación de cemento, las canteras que pueden proporcionar los áridos y fábricas productoras de barras de refuerzos.

La producción de cemento en Cuba se encuentra cercana a los dos millones de toneladas, y se espera que para el 2030 la producción aumente hasta los 7,5 millones de toneladas de cemento, destinado a la construcción de caminos, puertos, edificios, fábricas y otras obras.(2018)

Llevando a cabo una correcta dosificación de la mezcla de hormigón es posible reducir el elevado consumo de cemento y de esta manera colaborar en la disminución de emisiones de gas nocivo y desechos tóxicos que atentan contra la sostenibilidad del medio ambiente.

Por lo que se define la **situación problemática** como:

La Empresa Constructora Militar No.4 es la encargada de la producción de hormigón y mortero para las obras con fines y necesidades militares, la cual no se encuentra ajena al consumo de grandes cantidades de cemento, ejemplo es el año 2019 donde se consumió 2057 toneladas de cemento el cual solamente está destinado al prefabricado, el consumo total asciende cuando se tiene en cuenta el resto de las producciones de la empresa, esto puede suceder según los diseños de mezclas, tecnologías de producción y aditivos empleados por la empresa. Es necesario realizar nuevos diseños de mezclas con los áridos que emplea la empresa con el fin de lograr una disminución del contenido de cemento para mejorar los requisitos de rendimiento de cemento y abaratar los costos del hormigón, ahorrar en gastos de cemento para la empresa y generar un impacto más amigable con el medio ambiente consumiendo una menor cantidad de cemento.

Problema científico: ¿Cuál es el contenido de cemento ideal a utilizar en los diseños de mezcla de la Empresa Constructora Militar No.4?

Objeto de estudio: diseños de mezcla.

Campo de estudio: diseños de mezcla de la Empresa Constructora Militar No.4.

Hipótesis: Una disminución del contenido de cemento en los diseños de mezclas utilizados en la Empresa Constructora Militar No.4 permitirá obtener hormigones durables.

Objetivo General: Determinar el contenido de cemento ideal para lograr hormigones durables en la Empresa Constructora Militar No.4.

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

1. Fundamentar el estado del arte relacionado con el hormigón, los diseños de mezclas y rendimientos de cemento.
2. Describir los materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas.
3. Discutir los resultados obtenidos en los diseños de mezcla.

VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN:

- ✓ Variables dependientes: Relación agua - cemento (a/c), resistencia a la compresión, contenido de cemento, consistencia, sorptividad y porosidad.
- ✓ Variable independiente: Hormigón durable.

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:

Con la investigación se pretende determinar el contenido de cemento ideal el cual permita la obtención de hormigones durables en la Empresa Constructora Militar No.4 y así aumentar los rendimientos de cemento.

Estructura de la investigación:

La investigación se ha estructurado en: resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, 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 tiene como objetivo comentar brevemente el origen y evolución del hormigón, fundamentar sobre las propiedades de sus materiales componentes de forma individual, como se comporta la producción y consumo de cemento a escala global y específicamente en Cuba; las propiedades que posee el hormigón tanto en estado fresco como endurecido. Además, se hará alusión a los diseños de mezclas para hormigones y los indicadores de calidad del hormigón.

1.1 Breve reseña histórica sobre el hormigón

Las primeras referencias sobre un aglomerante con características similares al concreto están dadas por Plinto, autor romano, quién se refiere a las proporciones de un aglomerante empleado en la construcción de las cisternas romanas, indicando que deben mezclarse: cinco partes de arena de gravilla pura, dos de la cal calcinada más fuerte, y fragmentos de sílice.

En sus construcciones tanto los griegos como los romanos empleaban material puzolánico mezclado con cal para preparar morteros hidráulicos o concretos. Vitruvius, el gran arquitecto romano, decía de un polvo volcánico llamado puzolana, es una especie de arena la cual, por sí misma, posee cualidades extraordinarias, si se mezcla con cal y piedra, ella endurece tan bien bajo agua como en edificios comunes. Los mejores concretos empleados en las más famosas construcciones romanas, fueron hechos de ladrillo rojo, cal y puzolana. Primeras dosificaciones cuyos buenos resultados se evidencian hasta la fecha El Panteón de Adriano es un ejemplo de ello.(Rivva, 1992)

Según Nistal et al. (2012) a partir de la década de los 50 del siglo XIX se comienza de manera consciente a unir el hormigón y acero dando lugar a un material heterogéneo llamado hormigón amado, se introducían armaduras de acero con la idea de aumentar la resistencia a la flexión. Los trabajos realizados en hormigón armado eran realmente intuitivos y experimentales; tenían como base de cálculo la comparación con otros materiales y el sentido práctico del constructor, pero su técnica no estaba aún constituida

ni normalizada en modo alguno. Desde mediados del siglo XX hasta la actualidad, la investigación en los diferentes ámbitos de utilización del hormigón armado, especialmente obra civil y arquitectura, ha avanzado a una velocidad realmente espectacular y vertiginosa, de hecho, se han producido importantes descubrimientos en el ámbito de la potenciación de determinadas características del material con la aparición de nuevos aditivos, y también se han conseguido con estos elementos puestas en obra del material en condiciones cada vez más extremas.

El hormigón tal y como lo conocemos hoy en día, es un material construcción constituido básicamente por rocas, de tamaño máximo limitado, que cumplen ciertas condiciones respecto a sus características mecánicas, químicas y granulométricas, unidas por una pasta formada por un conglomerante (cemento) y agua. A este material básico y en el momento de su amasado, pueden añadirse otros productos o materiales para mejorar algunas características determinadas. El que al hormigón se le considere hoy como al rey universal de los materiales de construcción se debe a sus indiscutibles ventajas, entre ellas lograr cualquier forma por más complicada que parezca debido a su carácter plástico en estado fresco; resistencia apreciable a la compresión y aunque no es igual a tracción, valiéndose de aceros en su interior en los lugares adecuados se obtiene el llamado hormigón pretensado y armado y por último se logran estructuras monolíticas, en ocasiones lográndose prescindir de juntas o uniones que son zonas débiles.(Villarino, 2011)

1.2 Materiales que componen el hormigón

Según NC 120:2018 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.

Según Kumar and Monteiro (2001) el hormigón es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio obligatorio de partículas en el cual está incluido fragmentos de agregados; el agregado es el material granular, como arena, grava, piedra triturada o escoria de alto horno de hierro. En el hormigón la carpeta se forma de una mezcla de cemento hidráulico y agua.

Se puede decir que el hormigón hidráulico es el resultado de combinar agregados finos y gruesos, cemento y agua; aditivos y adiciones en caso de que lo estime conveniente el proyectista.

1.2.1 Cemento

Los primeros datos encontrados con morteros datan del 2000 antes de cristo. La pirámide de Keops está construida con un mortero de sulfato cálcico, carbonato cálcico, sílice, alúmina, carbonato magnésico y óxido de hierro. En la India, también se utilizaron los morteros de cal grasa, azúcar y leche. Podemos decir que antes del Imperio Romano no se conocían cales hidráulicas. Durante aquella época, el mortero era una mezcla de grasa y puzolana que servía para pegar ladrillos y piedras con el que se construyó entre otras muchas cosas el Coliseo. Lo más destacable que aprendieron los romanos y que aún nos es útil, es la propiedad de puzolana de endurecer los morteros y hormigones de cal grasa, hasta el estado pétreo incluso cuando están sumergidos y por tanto sustraídos al secado, ha permanecido inexplicable hasta nuestros días. Hasta mediados del siglo XIX no aparece un aglomerante hidráulico de alta calidad, es decir, el cemento tal y como se conoce actualmente.(Martínez, 2014)

Por conglomerante se entiende la sustancia capaz de endurecerse a corto o medio plazo al mezclarse con agua, siendo utilizable para unir o trabar materiales de diversa naturaleza. Este término es, por tanto, muy abierto y engloba sustancias de naturaleza tanto orgánica (resinas o polímeros en general), como inorgánica. Dentro de los materiales conglomerantes de tipo inorgánico, que son los más comúnmente utilizados en construcción, hay tres tipos básicos: cementos, cales y yesos.(Bustillo, 2008)

El cemento es un material clásico en la edificación y la ingeniería civil del mundo moderno. Desde los tiempos de Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII, el conglomerante más frecuentemente utilizado era la cal y, en ocasiones, el yeso, pero tanto uno como otro presentaban problemas por su durabilidad limitada, sobre todo en exteriores sometidos a condiciones meteorológicas adversas. Las razones por las que el cemento ha alcanzado este singular protagonismo en la construcción moderna, a partir de su

descubrimiento a comienzos del siglo XIX, se deben al hecho de que las materias primas para su fabricación son abundantes y de bajo coste, de que su fabricación es relativamente sencilla y económica y de que, tras su hidratación, es moldeable, pudiendo tomar todas las formas deseadas, adaptándose a todas las necesidades arquitectónicas posibles y prestándose a muy diversos tratamientos y procedimientos de puesta en obra.(Bustillo, 2008)

El cemento se puede fabricar tanto a partir de materiales de origen natural, como con productos industriales, con tal de que los elementos elegidos aporten los componentes requeridos para el proceso. Estos componentes, en forma de óxidos, son básicamente cuatro: cal (CaO), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3). Su mezcla, en dosis bastante delimitadas, permite obtener el crudo a partir del cual se fabrica el cemento. Aunque las opciones para obtener los citados componentes, evidentemente, son variadas, lo más frecuente es la explotación de calizas para producir el óxido de calcio y de arcillas para el resto de compuestos, lo que implica, dado el consumo a nivel mundial del cemento, una extracción intensiva de estos recursos minerales.(Bustillo, 2008)

Posteriormente, y dado que no existe ningún material natural o artificial que posea los citados componentes en las cantidades adecuadas, es imprescindible llevar a cabo un proceso de mezcla de diferentes sustancias para conseguir la dosificación que debe tener el denominado “crudo del cemento”, entendido éste como el material que forma la base para la obtención de los diferentes productos a lo largo del proceso de fabricación del mismo. Frecuentemente, es necesario acudir a la utilización de los denominados correctores, sustancias que aportan determinados compuestos que entran en pequeñas proporciones con el objetivo de aumentar la cantidad del óxido deficitario. Así, por ejemplo, se introduce las bauxitas como mena de aluminio, las piritas como fuente de hierro o las arenas silíceas para compensar el déficit en sílice. En general, para obtener una tonelada de cemento portland, el tipo de cemento más común y base de la mayor parte de las variedades de cemento, se emplean aproximadamente 1,5 toneladas de materias primas, de las cuales entre un 80 y un 85% son calizas y entre un 15 y un 20% son arcillas.(Bustillo, 2008)

1.2.1.1 Producción y consumo de cemento a nivel mundial

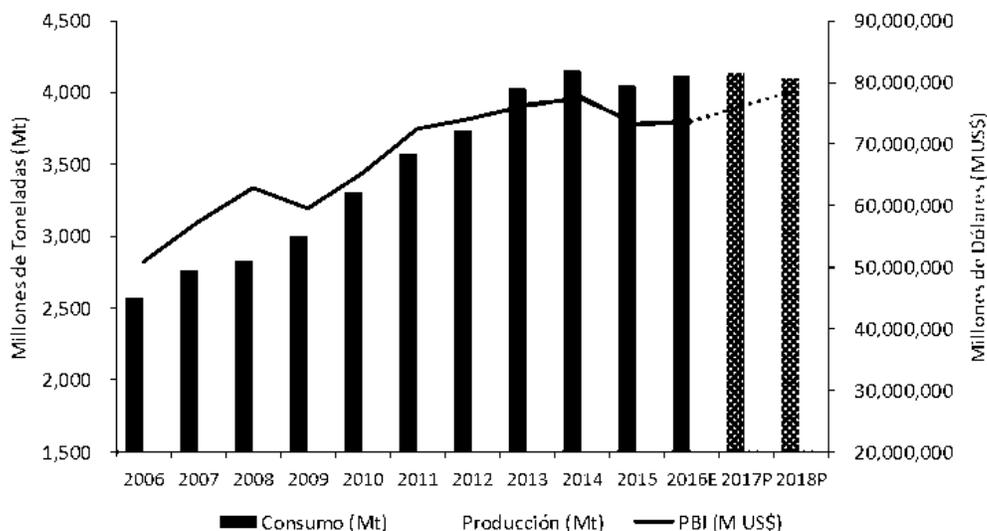
Después del agua, el concreto es el segundo material más consumido en el mundo y como el concreto se elabora con cemento, arena, grava, agua y aditivos químicos, entonces el cemento se convierte en uno de los materiales más consumidos después del agua. Adicionalmente, a la industria del cemento se le atribuye el cinco por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, CO₂.(Beristain and Mendiola, 2013)

El consumo mundial de cemento alcanzó los 4 129 millones de toneladas (Mt) en el 2016, logrando un avance de 1,8% con respecto al año 2015 y, en el 2015, se contrajo en 2,4% con respecto al 2014.(Report et al., 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.(Report et al., 2016)

Como se aprecia en el Gráfico 1.1 el consumo de cemento tiende a aumentar con el transcurso de los años, esto debido a la necesidad cada vez mayor de construir. Al ser el hormigón un material para la construcción que brinda grandes resistencias, su costo de producción y mantenimiento es inferior en comparación a otros materiales como la madera y el acero, todo esto lo hace el material idóneo para construir o al menos ser el más empleado. Esto sin embargo trae consigo el empleo de cemento como material aglutinante de la mezcla y el cual en su producción genera grandes emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y otras sustancias tóxicas para el medio ambiente; por lo cual se hace necesario reducir el consumo de cemento y buscar variantes alternativas capaces de producir los mismos resultados, pero con un impacto medioambiental menos perjudicial.

Gráfico 1.1 Consumo y Producción de Cemento, y PBI del Mundo (2006-2018)



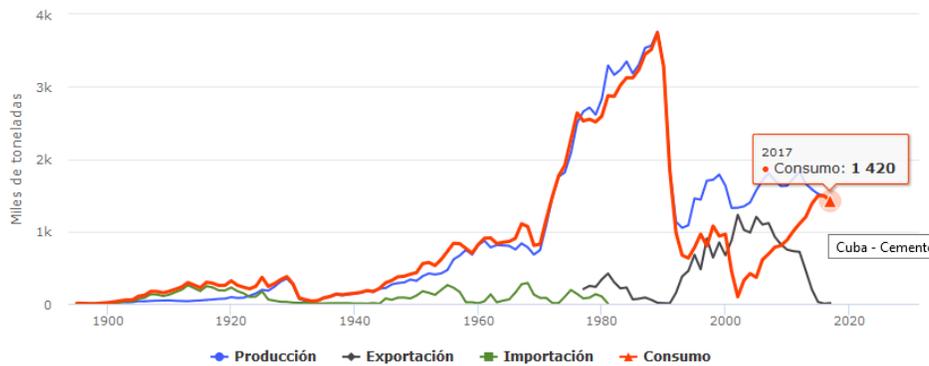
Fuente: Global Cement Report - International Cement Review, Banco Mundial Y FMI (2016)

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 estado cubano nacionalizó todas las fábricas de cemento y pasaron a su control. 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. Mas tarde, el corte de los subsidios soviéticos al precio del petróleo suministrado a Cuba conduce a la reducción drástica de la producción.(foresightcuba, 2019)

Según foresightcuba (2019) la producción de cemento disminuye por quinto año consecutivo y debido a la exportación de cemento, en el año 2002 el consumo disminuyó a un nivel inferior a las 100 000 toneladas. En el período 1997 – 2010, el estado exportó el 59% de la producción de cemento. A continuación, se puede apreciar en el gráfico 1.2 las tendencias del cemento en Cuba en cuanto a consumo, importación, exportación y producción.

Gráfico 1.2 Consumos de cemento en Cuba



Fuente: ONEI, 500 años de construcción en Cuba

Como se puede apreciar en el gráfico en los últimos 10 años se vio en ascenso el consumo de cemento en nuestro país, sin embargo, la exportación se mantuvo en descenso y la producción del mismo fluctuó; desde la década de los 80' no hay importación del mismo. Según las fluctuaciones del gráfico se puede estimar que su comportamiento tiende al descenso de los consumos de cemento; aunque hoy se producen cerca de dos millones de toneladas y según Martirena (2018) se espera que para el 2030 la producción aumente hasta los 7,5 millones de toneladas de cemento, destinado a la construcción de caminos, puertos, edificios, fábricas y otras obras.

En el presente existen 6 fábricas de cemento en Cuba:

- 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 Mercerón), construida en 1955.

1.2.2 Áridos

Según Geología (2010) los áridos son una serie de rocas que, tras un proceso de tratamiento industrial (simple clasificación por tamaños en el caso de los áridos naturales, o trituración, molienda y clasificación en el caso de los áridos de machaqueo), se emplean en la industria de la construcción en múltiples aplicaciones, que van desde la elaboración, junto con un material ligante, de hormigones, morteros y aglomerados asfálticos, hasta la construcción de bases y subbases para carreteras, balasto y subbalasto para las vías de ferrocarril, o escolleras para la defensa y construcción de puertos marítimos.

Los áridos ocupan entorno al 60-80% del volumen del hormigón. Es lógico, entonces, que sus características influyan en su estructura y, por lo tanto, en sus propiedades; sobre todo, en la densidad, en las propiedades elásticas y en la deformabilidad. Así, no parece totalmente adecuado considerar que el árido es un componente inerte del hormigón, pues desempeña un papel económico y técnico muy importante en las características de este material. (González, 2012)

En Sarria et al. (2014) hacen alusión a los áridos provenientes de las Empresas de Materiales de Matanzas que presentan productos como las arenas, de las cuales se especula que poseen altos contenidos de arcilla debido a su coloración rojiza, lo cual no es ideal para la mezcla de hormigón; debido a que puede generar que no se integre bien los materiales componentes de la mezcla de hormigón; aunque los productos procedentes de esta vía no siempre cumplen la granulometría adecuada, la su investigación ha demostrado pueden ser utilizados en la producción de hormigones durables, siendo necesario el uso de aditivos químicos superplastificantes para logra mantener las relaciones agua/cemento que garanticen la coherencia y laborabilidad del hormigón sin detrimento de la durabilidad.

Los resultados de la investigación arrojaron resistencias superiores a las de diseño, demostrando la calidad de los áridos de la provincia de Matanzas para realizar hormigones durables.

Los áridos poseen diferentes características, según Luaces (2007) estas son:

- Propiedades geométricas: tamaño, forma de las partículas (por ejemplo: si son alargadas o no), caras de fractura y calidad de los finos.
- Propiedades mecánicas y físicas: resistencia al desgaste (por ejemplo: para que los coches no se deslicen en las carreteras), resistencia a la fragmentación, resistencia al pulimento, densidad, porosidad y contenido en agua.
- Propiedades térmicas y de alteración: resistencia a los ciclos de hielo y deshielo.
- Propiedades químicas: contenido en azufre, cloruros, materia orgánica, contaminantes ligeros y reactividad potencial.

Los áridos se clasifican según su origen en:

- Áridos naturales: Árido de origen mineral que únicamente ha sido sometido a procesos mecánicos. A menudo se utiliza este término para designar áridos producidos sin intervención de proceso de trituración, simplemente mediante cernido o lavado.
- Áridos artificiales: Árido de origen mineral resultante de un proceso industrial que suponga modificación térmica u otra.
- Áridos reciclados: Árido resultante del tratamiento de material inorgánico previamente utilizado 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.

1.2.3 Agua

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado.

Agua de mezclado: es la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico. La pasta de cemento, inmediatamente se mezclan los materiales, es una mezcla plástica de cemento y agua que va adquiriendo nueva estructura conforme se produce la hidratación del cemento, Esta nueva estructura es la formación del llamado gel de cemento y la redistribución del agua dentro de la pasta.(Guzmán, 2019)

1.2.4 Aditivos

En primer lugar, debemos comenzar por definir que son los aditivos. Se trata de las sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo, o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento. De esta manera, los aditivos son componentes auxiliares del hormigón, aunque en algunas condiciones y en determinadas obras se trate de un elemento indispensable para contrarrestar problemas específicos.(promateriales, 2007)

Este componente para la mezcla del hormigón dota al mismo de propiedades favorables para su preparación y posterior colocación, sin embargo, es opcional su utilización, cabe destacar que según la finalidad a la que será destinada la mezcla se le añadirá un aditivo específico, contemplando las propiedades que se desean obtener en la masa de hormigón.

La norma ASTM C 494 “*Chemical Admixtures for Concrete*”, distingue siete tipos:

- 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.

Por su parte el código de buena práctica “Aditivos, Clasificación, Requisitos y Ensayos”, elaborado por el Centro Tecnológico del Hormigón (CTH), establece la siguiente clasificación:

- 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.

En Cuba los aditivos se clasifican según la NC 228-1:2005

- Aditivos plastificantes/reductor de agua.
- Aditivos superplastificantes/reductores de agua de alto rango.
- Aditivo acelerador del fraguado.
- Aditivo acelerador del endurecimiento.
- Aditivo retardador del fraguado.
- Aditivo introductor de aire.
- Aditivo retenedor de agua.
- Aditivo hidrófugo de masa.
- Aditivo anticorrosivo.
- Aditivo multifuncional.

1.3 Propiedades del hormigón

El hormigón presenta dos estados fundamentales desde el punto de vista práctico. El estado fresco o plástico en el que admite ser manipulado para su adaptación a los encofrados

previstos y el estado endurecido en el que ha adquirido una rigidez tal que impide su manipulación sin producir fracturas visibles o no irreversibles.(2007)

1.3.1 Propiedades del hormigón en estado fresco

Según Jové (2018) el hormigón posee ciertas propiedades en estado fresco dentro de las cuales podemos encontrar:

1- Consistencia: mayor o menor facilidad del hormigón fresco para deformarse, depende de:

- La cantidad de agua de amasado.
- El tamaño máximo de los áridos.
- La proporción de los tamaños del árido.
- La forma de los áridos.

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

- El ensayo de Asentamiento de acuerdo con la NC -ISO 1920-2
- El ensayo por el Consistómetro VeBe de acuerdo con la NC-ISO 1920-2

2- Docilidad (trabajabilidad): es la aptitud que presenta el hormigón para su puesta en obra. Depende de:

- La cantidad de agua de amasado: a más agua mayor docilidad.
- La granulometría de los áridos: más dóciles con mayor cantidad de arena.
- La forma de los áridos: mayor docilidad con áridos redondeados.
- El contenido de cemento: la docilidad aumenta con la cantidad de cemento y su finura.
- El empleo de aditivos plastificantes.

3- Homogeneidad: es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos por toda su masa.

- Se consigue por: Estar bien amasado, cuidadosamente transportado y adecuadamente colocado en obra.
- Puede perderse por: segregación de los áridos finos de los gruesos y decantación de los gruesos al fondo, que puede ocurrir por: excesivo contenido en agua, el tamaño máximo del árido, vibraciones o sacudidas en el transporte y sacudidas en la puesta en obra en caída libre.

4- Comportamiento a temperaturas extremas:

- No debe hormigonarse $T < 5^{\circ}\text{C}$ El hormigón no adquiere la resistencia adecuada cuando su fraguado se produce con temperaturas bajas (heladas). Peor cuanto más agua lleve el hormigón.
- No debe hormigonarse $T > 35^{\circ}\text{C}$ En tiempo muy caluroso debe evitarse la excesiva evaporación del agua de amasado que provocaría pérdida de resistencia, fisuras y retracción. Conviene regar continuamente durante diez días.

1.3.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido

Jové (2018) menciona algunas propiedades que se debe tener presente del hormigón en estado endurecido, como son:

1. Deformabilidad: se mide según curvas de tensión-deformación, deformación-tiempo (a compresión) que dependen de:

- La edad del hormigón.
- La duración de la carga.
- La forma y tipo de la sección.
- La naturaleza de la sollicitación.

El módulo elástico o de deformación, expresa el valor de la tensión necesaria para producir un acortamiento unitario.

2. Permeabilidad: por la presencia de micro poros debidos a la pérdida del agua de amasado. Se determina por presión (a través de las coqueras) o por succión (penetración a través de los poros capilares).

La permeabilidad del hormigón permite la difusión de agentes agresivos (agua, dióxido de carbono, oxígeno, etc.) a través del hormigón.

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.
4. Adherencia: es necesaria para su uso en combinación con el acero, con otros hormigones, materiales cerámicos y metálicos. Depende de la superficie de contacto, textura de los materiales, calidad del hormigón, forma de su puesta en obra, etc.
5. Durabilidad: puede definirse como el conjunto de propiedades necesarias para conseguir que el material conserve, durante su vida de servicio prevista y hasta el final de la misma, un coeficiente de seguridad de valor aceptable.
6. 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.
7. 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.

8. 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.

Además de las anteriores propiedades es importante tener en cuenta las que menciona la NC 120:2018 aparecen:

1. Absorción de agua por capilaridad.
2. Velocidad de absorción de agua (sorptividad): depende no sólo del porcentaje de porosidad efectiva (o sea, la porosidad que tiene acceso al exterior del elemento de hormigón), sino de la tortuosidad, de los cambios de sección y de la interconectividad de los poros capilares.

Según Muciño (2017) lograr que la mezcla de hormigón posea las propiedades antes mencionadas es importante el diseño de mezcla; donde debe analizarse correctamente parámetros como: la relación máxima de agua/cemento, el contenido mínimo de cemento, la resistencia mínima, la manejabilidad mínima, el tamaño máximo del agregado y el contenido de aire dentro de los límites especificados. Todo esto debe ser secundado por un correcto cálculo de las cantidades de materiales a emplear y que estos a su vez cumplan con las especificaciones requeridas.

1.4 Diseños de mezclas de hormigón

Alrededor de 1892, el francés Feret establece los primeros principios modernos para el proporcionamiento de mezclas de mortero o concreto. Desarrolla interrelaciones entre las cantidades de cemento, aire y agua, y define inicialmente el papel de los poros en la mezcla de concreto. Sin embargo, no llega a establecer claramente las interrelaciones en la mezcla de concreto como un todo, tal como ellas han sido aplicadas en años posteriores. (Rivva, 1992)

El trabajo de Feret fue continuado por Abrams, Fuller, Weymouth, Thaulow, Walker, Goldbek, Gray, Talbot, entre otros, quienes cimentaron las bases para la moderna tecnología del hormigón, fue con el paso de los años que los estudiosos se interesaron por

el tema del diseño de mezcla y tras años de investigación fueron desarrollándose los métodos empleados en la actualidad.

La selección de las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto, conocida usualmente como diseño de la mezcla, puede ser definida como el proceso de selección de los ingredientes más adecuados y de la combinación más conveniente y económica de los mismos, con la finalidad de obtener un producto que en el estado no endurecido tenga la trabajabilidad y consistencia adecuadas y que endurecido cumpla con los requisitos establecidos por el diseñador o indicados en los planos y/o las especificaciones de obra.(Rivva, 1992)

Aunque se han realizado gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas, en buena parte permanece como un procedimiento empírico. Y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño, están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad especificada, así como una trabajabilidad apropiada. Además, es asumido que si se logran estas dos propiedades las otras propiedades del concreto también serán satisfactorias (excepto la resistencia al congelamiento y deshielo u otros problemas de durabilidad tales como resistencia al ataque químico).(Huanca, 2006)

Información requerida para el diseño de mezclas:

- Análisis granulométrico de los agregados.
- Peso unitario compactado de los agregados (fino y grueso).
- Peso específico de los agregados (fino y grueso).
- Contenido de humedad y porcentaje de absorción de los agregados (fino y grueso)
- Perfil y textura de los agregados.
- Tipo y marca del cemento.
- Peso específico del cemento.

- Relaciones entre resistencia y la relación agua/cemento, para combinaciones posibles de cemento y agregados.

Orden a seguir en la dosificación de un hormigón (Mancha, 2014):

- 1- Fijar la resistencia del hormigón de acuerdo con las condiciones previstas para la ejecución de la obra.
- 2- Elegir el tipo de cemento, en función de la clase de obra, la agresividad del medio y las condiciones climáticas.
- 3- Determinar la relación agua/cemento que corresponde a la resistencia media del hormigón, según el tipo de cemento y áridos empleados.
- 4- Determinar el tamaño máximo del árido, en función de los distintos elementos de la obra.
- 5- Estudiar la consistencia más conveniente del hormigón, según la forma de compactación en obra y, como consecuencia, fijar la cantidad aproximada de agua y determinar la cantidad de cemento correspondiente.
- 6- Establecer la proporción en que han de mezclarse los áridos disponibles, para que la curva granulométrica del árido total sea la más conveniente al hormigón en estudio.
- 7- Calcular las cantidades de agua, cemento y áridos necesarias para obtener un metro cúbico del hormigón.
- 8- Efectuar unas masas de prueba para comprobar si el hormigón obtenido tiene las características deseadas y, en caso contrario, hacer las correcciones necesarias.

1.4.1 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

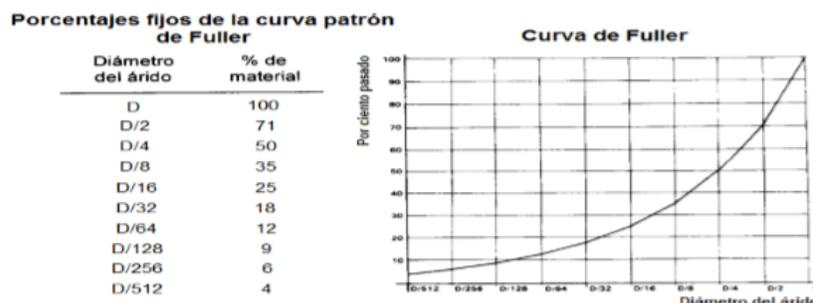
1.4.1.1 Método de Fuller-Thompson

El método de Fuller fue empleado en Cuba desde los años 50 de la pasada centuria en el diseño de mezclas de hormigón para elementos no muy armados, elaborados con áridos redondeados, con un tamaño máximo considerable, de 70 mm, y una masa mínima de cemento de 300 kg/m³. Fue un método eficiente en el diseño de mezclas para hormigones masivos, en el cual la dosificación de los áridos viene determinada por una curva de referencia, de granulometría continua, lo que contribuye a una buena laborabilidad y densidad del conjunto. La curva patrón de por cientos pasados sigue una relación igual a la raíz cuadrada del tamiz en cuestión entre el tamaño máximo del árido.(Puig et al., 2018)

Metodología de Fuller-Thompson

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

Gráfico 1.3 Curva granulométrica de Fuller.



Fuente: Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón

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

$$Y = 100 * (d / D) * 0,5 \quad (1.1)$$

donde:

D es el tamaño máximo del agregado total.

Y el porcentaje en peso de agregados que pasan a través del tamiz d.

1.4.1.2 Método de Bolomey

Bolomey, ya en la década de los años 60 del pasado siglo, propone un método también utilizado en nuestro país, que constituye un perfeccionamiento de la ley de Fuller ya que, aunque los datos para operar sean los mismos, se trata de obtener un hormigón económico en cemento en base a sus resistencias, consistencia de la masa y forma de los áridos, ya sean redondeados o triturados. El propio Bolomey señala que el proceder está indicado para hormigones en masa, grandes macizos, presas, etc., debiendo tantearse con mucho cuidado la curva granulométrica y los porcentajes de finos, pues aquí interviene, también, el cemento utilizado. (Puig et al., 2018)

$$\text{Por ciento pasado por un tamiz: } a + (100 - a) * \sqrt{d / D} \ ; \ \% \quad (1.2)$$

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.

Metodología de Bolomey:

- 1- Condiciones de colocación (Asentamientos)
- 2- Requisitos de resistencia (f'c)

- 3- Experiencia en el diseño de mezclas
- 4- Características del ambiente y dimensiones de la estructura
- 5- Características de los materiales (Cemento)

1.4.1.3 Método de Faury

En los años 70 del pasado siglo surge el método de Faury. Este método parte del estudio de la composición del hormigón realizado por Caquot, en base al cual Faury propone una nueva ley granulométrica de tipo continuo que depende de la raíz quinta del tamaño del agregado, incluyendo el cemento en el análisis. Forma parte del análisis la tecnología de compactación y las dimensiones de los encofrados. El autor reconoce la eficiencia del proceder en elementos con áreas de sección transversal grandes, no así en losas, columnas o muros estrechos. (Puig et al., 2018)

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 $D/2$.

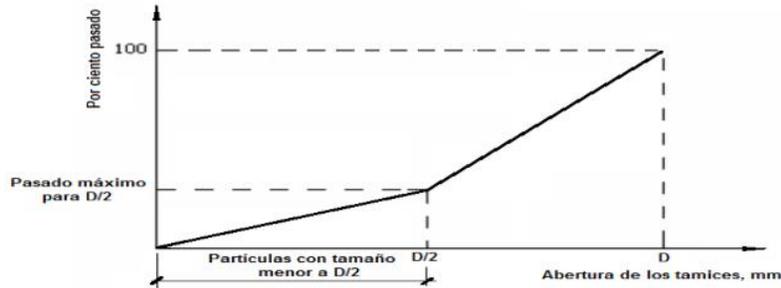
$$P = a + 17\sqrt[5]{D} * \frac{B}{0,75 * \frac{R}{D}} \quad (1.3)$$

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 el diseño de mezclas de hormigón

1.4.1.4 Método de la ACI 211.1

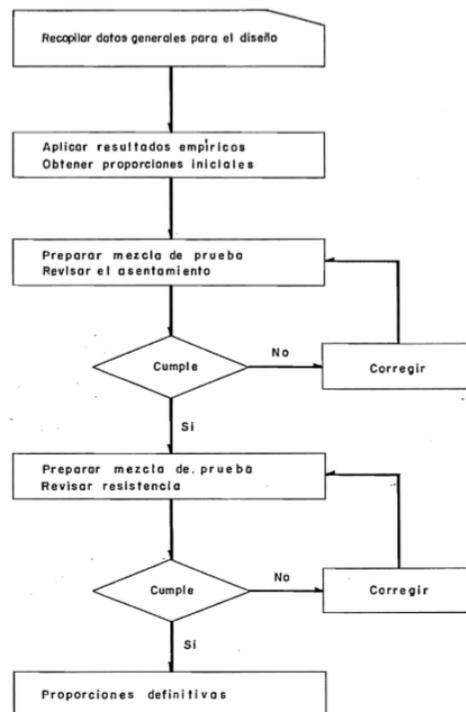
En el año 1991, el *American Concrete Institute*, ACI por sus siglas en inglés, sacó al mercado el ACI 211.1, “*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*”. Este proceder, posteriormente fue revisado y actualizado en el año 2002. El método del ACI se ha convertido en la actualidad en el mayoritariamente utilizado en Cuba, toda América y buena parte del mundo debido a la versatilidad de opciones que brinda y a la efectividad de los resultados en múltiples prestaciones. Sin embargo, el método del ACI no puede emplearse a ciegas. Contiene dos procedimientos que no siempre son aplicables en nuestro país. Primero, los niveles de agresividad ambiental que considera al valorar la relación agua/cemento no se corresponden exactamente con las normativas cubanas en este sentido, o sea, lo que señala la norma cubana NC 120:2018. En segundo lugar, la forma en que esta metodología propone definir la forma en que se combinan el árido grueso con el árido fino parte de un módulo de finura de las arenas utilizadas entre 2,4 y 3,0, lo que no siempre se cumple en Cuba. Además, el método del ACI sólo concibe el empleo de dos áridos, uno grueso y otro fino, lo que muchas veces es necesario incrementar en Cuba. (Puig et al., 2018)

Secuencia del Método de la ACI 211.1

- 1- Estimación de los asentamientos de la mezcla de hormigón.
- 2- Elección del tamaño máximo del árido.
- 3- Estimado de la cantidad de agua de mezclado y del contenido de aire en la mezcla.
- 4- Selección de la relación agua/cemento o la relación agua/materiales aglomerantes.

- 5- Cálculo del contenido de cemento en la mezcla de hormigón.
- 6- Estimación del contenido de árido grueso.
- 7- Estimación del contenido de árido fino.
- 8- Ajustes a las cantidades de áridos debido a la humedad.
- 9- Ajuste de la mezcla de prueba.

Gráfico 1.5 Fundamentos del Método de la ACI 211.1



Fuente: Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón

1.4.1.5 Método de Vitervo O'reilly

Las condiciones tecnológicas de muchos países ocasionan, en la producción de los concretos, un consumo excesivo de cemento lo que se manifiesta no sólo en la economía de la producción sino también en la afectación de sus propiedades mecánicas más importantes. De esta problemática no se han ocupado muchos autores, y sus trabajos resultan contradictorios en gran medida, a la vez que no posibilitan formular conclusiones unívocas. Desde el punto de vista de la composición óptima de los agregados no se le da

toda la atención a la influencia de la forma de la partícula y se parte sólo de su composición granulométrica.(O'Reilly, 2007)

A partir de investigaciones científicas existentes y experimentos es que O'Reilly (2007) crea un método que no prefija condiciones, sino que para cada caso específico se determinará la característica de los agregados disponibles, y de acuerdo a la tecnología de producción, calidad del cemento, transporte y colocación del concreto que se posea, diseñar la mezcla del concreto exigido.

Investigaciones efectuadas tanto en Cuba como en Europa en áridos con granulometría inadecuada arrojaron resultados favorables en cuanto al porcentaje de vacío de la mezcla y la consistencia de la misma, otorgándole un mejoramiento de sus propiedades en estado plástico y endurecido. De esta forma la aplicación de este método aporta un ahorro de los consumos de cemento, se obtiene un hormigón compacto y menos poroso, de ahí que sea considerado un método ideal para la elaboración de hormigones de altos desempeños.

Pasos a seguir:

- 1- Se determina el PEC y el PUC de la arena y la grava que se han secado en la estufa.
- 2- Determinar el Peso Unitario Compactado de las mezclas secas de arena y grava en las proporciones: 35:65,40:60,45:55,60:40.
- 3- Se calcula el peso Específico Corriente de cada mezcla anterior.
- 4- Se calcula el % de vacío de cada mezcla anterior
- 5- 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 del cemento usado, a los 28 días.
- 6- Con los datos anteriormente obtenidos se calcula la característica "A" de la grava usada

- 7- Con la característica "A" del agregado grueso, se determina la cantidad de cemento necesaria para un hormigón de una consistencia y resistencia
- 8- Determinado el valor de $V=a/c$ podemos determinar la cantidad de cemento realmente necesaria: $C=a/v$
- 9- Donde "a" es el agua usada en la investigación para obtener un As necesario
- 10- 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 m^3 de hormigón con un 2 o 3 % de aire atrapado.

1.5 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.(García, 2019)

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

Donde:

f_{cm} : Resistencia media a la compresión, kg/cm^2 .

f_{ck} : Resistencia característica a la compresión, kg/cm^2 .

C: Consumo de cemento, kg/m^3 .

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.

1.5.1 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

1.6 Conclusiones parciales

- 1- Los diferentes métodos para el diseño de mezclas son distintos en sus procedimientos sin embargo se asemejan en aspectos como: Toman como criterio general de diseño la resistencia media del lote de hormigón, Tienen en cuenta el tamaño máximo del árido a emplear, Se basan en una relación agua/cemento mínimo y consideran por lo general una granulometría ideal dirigida a hacer mezclas más laborables, resistentes y duraderas.

- 2- Los diferentes métodos para el diseño de mezclas constituyen vías para calcular en que proporción deben ser mezclados los elementos componentes del hormigón para lograr una mezcla laborable, económica y finalmente durable. Según el fin al que está destinado el hormigón y las condiciones a la que estará sometido se seleccionará el idóneo.
- 3- El rendimiento de cemento proporcionará que resistencia obtuvo la mezcla de hormigón por cada kilogramo de cemento agregado.

CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LOS MATERIALES Y MÉTODOS EMPLEADOS.

Este capítulo tiene como objetivo describir los materiales y métodos a emplear en el diseño de mezclas de hormigón, como parte de los métodos particulares empíricos de investigación científica se empleó la medición y experimentación.

2.1 Caracterización de los materiales

La Empresa Constructora Militar No.4 necesita hormigones correctamente dosificados y a su vez que se logre disminuir el contenido de cemento sin que esto afecte las propiedades finales del mismo. A partir de las dosificaciones elaboradas por la ENIA, se diseñó una mezcla de hormigón, empleando el cemento de una forma más económica y racional.

Se elaboró un hormigón de resistencia 30 MPa, utilizando los áridos procedentes del centro de producción Planta Libertad, el aditivo empleado fue Dynamon SP 500. El material elaborado será empleado en las viviendas prefabricadas tipo FORSA de Gelpi (Matanzas).

El objetivo de los experimentos es determinar el contenido de cemento ideal para lograr hormigones durables, determinando la resistencia a compresión del hormigón, porosidad efectiva, la sorptividad y asentamiento del hormigón según el diseño de mezcla elaborado siguiendo la metodología de la ACI, para evaluar posteriormente los valores de rendimientos de cementos obtenidos.

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.

2.1.1 Áridos

Los áridos empleados en el experimento son procedentes de la cantera Planta libertad

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.

2.1.1.1 Propiedades geométricas de los áridos

Áridos. Análisis granulométrico. NC 178:2002.

Fundamentos del método:

El procedimiento se basó en la determinación de las fracciones granulométricas de los áridos, por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz, acompañado de una acción de sacudida de manera que la muestra se mueva continuamente sobre la superficie de los tamices.

Preparación de la muestra:

- La muestra se determinó por el sistema de cuarteo de una muestra representativa del material a ensayar.
- El peso de la muestra una vez secado en la estufa a peso constante y a una temperatura de 105 a 110 °C fue de 500.

Procedimiento para determinar la granulometría.

- La muestra se separó en una serie de tamaño usando para ello aquellos tamices que sean necesarios de acuerdo con las especificaciones para el uso del material que se ensaya.
- La operación de tamizado se llevó a cabo por medio de un movimiento lateral y vertical del tamiz, este movimiento estará acompañado de una acción de sacudida, de manera que la muestra se mueva continuamente sobre la superficie del tamiz.
- En el caso que una de las fracciones se retenga en exceso en un tamiz, de forma tal que impida un tamizado eficiente, se dividió el retenido de ese tamiz en tantas partes como sea necesario.
- En ningún caso se emplearon las manos para cambiar de posición o hacer pasar a través del tamiz partículas de áridos.

Esto es aplicable tanto para el tamizado manual como para el mecanizado.

- En aquellas porciones retenidas en el tamiz de 4,76 mm (No. 4), el procedimiento descrito para fijar la terminación del tamizado se realizó con una sola capa del material.
- Cuando se tamizó mecánicamente, la eficiencia del tamizado se comprobó usando el método manual arriba descrito.
- El peso de las cantidades retenidas en cada tamiz se determinó por medio de la balanza.

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

Fundamento del método:

El procedimiento se basó 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 homogeneizó con suficiente humedad para evitar la segregación del árido objeto del análisis.

- Se colocó en un recipiente y se desecó 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 tomó 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 38 mm	2,5
38 mm o mayor	5

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 determinó mediante la lectura directa cuando se utilizó 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 calculó 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

Material más fino que el tamiz de 75 μ (No. 200) de los áridos finos. NC 251:2018.

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.

$$MF = \frac{\text{Porcentaje retenidos acumulados en tamices normados}}{100} \quad (2.2)$$

2.1.1.2 Propiedades química de los áridos

Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo. NC 179:2002.

Fundamento del método:

Se obtuvieron las partículas de arcilla contenidas en los áridos por medio de una selección, y se determinó 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 1/2´´) - 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 mínimo de la muestra en gramo
Mayor 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

- 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
Mayor o igual a 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. 8)
Árido fino retenido en el tamiz de 1,19 mm (No. 16)	0,84 mm (no. 20)

Expresión de los resultados:

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

$$L = \frac{W - R}{W} \quad (2.3)$$

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)

2.1.1.3 Propiedades físicas de los áridos

Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo. NC 186:2002.

Fundamento del método:

Se obtuvieron 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 colocó el frasco volumétrico sobre una superficie plana, se inclina unos 30° y se hizo rodar expulsadas todas las burbujas.

c) 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.

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 calculó 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 calculó aplicando la formula siguiente:

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

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

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

Áridos. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo. NC 177:2002.

Fundamentos del método:

Se determinó 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.

Método de cálculo:

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

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

Donde:

PEC: Peso específico corriente del árido

PVC: Peso volumétrico compactado del árido

2.1.1.4 Propiedades mecánicas de los áridos

Áridos gruesos. Determinación del índice de triturabilidad. NC 190:2002.

Fundamento del método:

Se basó 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 pasó por tamices de abertura igual al tamaño máximo y mínimo de la fracción en cuestión. La muestra del árido grueso a ensayar fue 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 enfrió a la temperatura ambiente del laboratorio.

Procedimiento:

Preparación de la porción de ensayo:

- De la muestra de árido grueso a ensayar que fue 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

Método de cálculo:

- El índice de triturabilidad se calculó 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)

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

$$ITM = \frac{\sum_{n=1}^8 ITF_n * m_n}{100} \quad (2.11)$$

Donde:

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

2.1.2 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.

Ensayo de resistencia a la compresión, según la NC 506:2013: Cemento Hidráulico- Método de ensayo. Determinación de la resistencia Mecánica:

- Ensayar los semi - prismas a compresión sobre las caras laterales, con ayuda del equipo específico.
- Centrar cada semi – prismas lateralmente con relación a los platos de la maquina a $\pm 0,5$ mm y longitudinalmente, de forma que la base del prisma no sobresalga de los platos o placas auxiliares más de unos 10mm.
- Aumentar la carga uniformemente, a una velocidad de (2400 ± 200) N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.
- Cuando el incremento de carga se regula a mano, se debe reducir la velocidad en las proximidades de la carga de rotura.
- Calcular la resistencia a compresión R_c (en N/mm^2) (MPa) según la formula siguiente:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (2.12)$$

Donde:

R_c es la resistencia a compresión (MPa)

F_c es la carga máxima de rotura (N)

$1600=40*40 \text{ mm}^2$ es la superficie de los platos o placas auxiliares.

2.1.3 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 *Dynamón SP 500*, superfluidificante de base acrílica, modificada para hormigones prefabricados, caracterizados por una baja relación agua/cemento y resistencias mecánicas muy altas.

Dynamón SP 500 es un aditivo de base acrílica modificada, específico para el hormigón prefabricado, perteneciente al sistema MAPEI *Dynamón SP*. El sistema *Dynamón SP* está basado en la tecnología DPP (*Designed Performance Polymer*), una nueva química de proceso que permite, a través del completo diseño de los monómeros (investigación exclusiva de MAPEI), (es una molécula de pequeña masa molecular que está unida a otros monómeros, a veces cientos o miles, por medio de enlaces químicos, generalmente covalentes, formando macromoléculas llamadas polímeros), modular las características del aditivo con relación a las prestaciones específicas solicitadas por el hormigón.

Campo de aplicación:

Gracias a su elevada trabajabilidad (clase de consistencia A₄ o A₅ según la NC 120:2018), los hormigones confeccionados con *Dynamón SP 500* resultan de fácil colocación en obra en su estado fresco y de elevadas y de elevadas prestaciones mecánicas en su estado endurecido. *Dynamón SP 500* es un aditivo con prestaciones superiores a los superfluidificantes tradicionales con base naftalenosulfonato o melaminasulfonato, ya sea en términos de reducción de agua y de resistencias.

Dynamón SP 500 está indicado particularmente en los sectores del hormigón prefabricado y donde sea necesaria una fuerte reducción de agua, acompañada por una buena aceleración de las resistencias mecánicas a edades cortas en las diferentes clases de consistencia. La utilización de *Dynamón SP 500* resulta ventajosa para la confección de hormigones de calidad media-alta con dosificaciones de cemento superiores a 350kg/m^3 .

Sus prestaciones lo hacen particularmente idóneo también para la realización de hormigones autocompactantes, ya que *Dynamón SP 500* está en poder de garantizar una elevada fluidez y al mismo tiempo no produce disminuciones significativas del desarrollo de las resistencias mecánicas del hormigón a edades cortas.

Para los hormigones autocompactantes es necesario complementar el uso de *Dynamón SP 500*, con *Viscofluid SCC* (aditivo modificador de la viscosidad) para evitar los riesgos de segregación por falta de finos en los áridos y garantizar la homogeneidad de las mezclas con deformaciones (escurrimientos) muy elevado.

Los mayores campos de aplicación de *Dynamón SP 500* son la producción de hormigón prefabricado:

- de altas prestaciones mecánicas,
- desencofre a partir de 5 horas,
- de clase de resistencia $R_{ck} 25-50\text{N/mm}^2$,
- destinado a obras impermeables y duraderas en las clases de exposición previstas por la NC 120:2018,
- autocompactante, *Dynamón SP 500*, en combinación con el aditivo modificador de viscosidad (*Viscofluid SCC*), permite la obtención de hormigones autocompactantes que pueden ser colocados en obra sin ninguna vibración, con una elevada velocidad de colocación, gracias a las propiedades de fluidez y de resistencia a la segregación.

Características técnicas:

Dynamón SP 500 es una solución acuosa de polímeros acrílicos (sin formaldehidos) capaces de dispersar eficazmente los gránulos de cemento y de favorecer el desarrollo de cristalización del cemento de manera que la relación agua/cemento quede inalterada, así como el incremento de las resistencias respecto a los hormigones no aditivados.

En tal caso se obtienen beneficios técnicos para la menor retracción higrotérmica, la menor deformación viscosa, el más bajo desarrollo del calor de hidratación. Esta última característica es importante sobre todo para hormigones con una elevada dosificación de cemento (>400 kg/m³).

La acción defloculante de *Dynamón* SP 500 puede ser ventajosa utilizada de tres modos:

- Para reducir el agua respecto al hormigón no aditivado a semejanza de la trabajabilidad. Como consecuencia se obtienen aumentos de la resistencia mecánica, reducción de la permeabilidad e incrementos de la durabilidad
- Para incrementar la trabajabilidad respecto al hormigón no aditivado a semejanza de la relación agua/cemento.
- Para reducir ya sea el agua y el cemento de trabajabilidad y del desarrollo de las resistencias mecánicas de hormigones confeccionados con cemento puzolánico a una temperatura de +25°C.

Modo de utilización:

Antes de su uso, el producto *Dynamón* SP 500, debe removerse hasta su total homogeneidad. *Dynamón* SP 500 desarrolla la máxima acción dispersante del hormigón cuando es añadido después de los otros componentes de la mezcla (cemento, áridos y agua) y antes del agente de viscosidad. La acción defloculante de *Dynamón* SP 500 puede ser ventajosa si los componentes del hormigón no se encuentran en absorción.

Dosificación:

De 0,5% a 1,5% por peso de cemento para hormigones tradicionales.

El óptimo por experiencia a emplear es 0,8% por peso de cemento.

De 0,5 a 1,0 litros por cada 100kg de finos (>0,1 mm)

Presentación:

Dynamón SP 500 se suministra en cisternas de 1000 litros.

Almacenamiento:

Conservar por 12 meses en los recipientes cerrados, protegidos de la exposición a los rayos solares.

2.1.4 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros— especificaciones. NC 353:2003.

- 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 tengan 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 estará entre 5 y 11.
- 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.

2.2 Diseño de mezcla

Para obtener el contenido ideal de cemento fue necesario disminuir cantidades del mismo en la dosificación existente en la Empresa Constructora Militar No.4, para el autor empleo el método de la ACI 211.1 para recalcular las nuevas proporciones de los componentes de la mezcla. Se partió por la disminución de 15 kg de cemento a la dosificación vigente en la planta para el prefabricado.

Procedimiento:

- Se disminuyó 15 kg de cemento al contenido existente en la dosificación actual.
- La nueva cantidad de cemento se empleó para hallar la nueva cantidad de agua a través de la fórmula:

$$C = \frac{A}{a/c} \quad (2.13)$$

donde:

C: cantidad de cemento

A: cantidad de agua

a/c: relación agua-cemento

- Se colocó el peso de los áridos en función de uno de ellos. Sumando la cantidad que hay de cada uno de ellos en la mezcla y calculando el porcentaje que representan de ese total.
- Con los pesos específicos conocidos de cada uno de los materiales y con los datos de las cantidades de agua y cemento para la dosificación 1 se empleó la fórmula siguiente para determinar las cantidades de arena y gravilla:

$$\frac{P_{agua}}{\gamma_{agua}} + \frac{P_{cemento}}{\gamma_{cemento}} + \frac{P_{gravilla}}{\gamma_{gravilla}} + \frac{P_{arena}}{\gamma_{arena}} + 10\alpha = 1000dm^3 \quad (2.14)$$

donde:

P_{agua} : peso del agua

$P_{cemento}$: peso del cemento

$P_{gravilla}$: peso de la gravilla

P_{arena} : peso de la arena

γ_{agua} : peso específico del agua

$\gamma_{cemento}$: peso específico del cemento

$\gamma_{gravilla}$: peso específico de la gravilla

γ_{arena} : peso específico de la arena

α : aire ocluido

De esta forma se obtuvo la dosificación 1 que se muestra en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5 Dosificación 1

Materiales	Dosificación actual (Kg/m ³)	Dosificación 1 (Kg/m ³)
Agua	158	166
Cemento	430	415
Arena	825	929
Gravilla	760	858
Aditivo(L/m ³)	-	3,0

- Después de obtener la dosificación 1 se realizaron los ajustes por humedad para ello se calculó la humedad total evaporable:

$$HT = \frac{W - D}{W} * 100 \quad (2.15)$$

donde:

W: Masa de la muestra original, g.

D: Masa de la muestra seca, g.

- Con el resultado anterior se obtuvo la humedad superficial a través de la fórmula:

$$HS = HT - Absorción \quad (2.16)$$

- Luego se calculó el peso ajustado por humedad de los áridos a través de la fórmula:

$$P_{\text{Árido húmedo}} = P_{\text{Árido seco}} \left(1 + \frac{HT}{100}\right) \quad (2.17)$$

- Finalmente se realizó un ajuste a la cantidad de agua final que se agregará a la mezcla según el agua que aportarán los áridos, según la fórmula:

$$A_{\text{ajustada}} = A_{\text{añadida}} - \left[\left(P_{\text{Piedra seca}} * \frac{HS_{\text{piedra}}}{100} \right) + \left(P_{\text{Arena seca}} * \frac{HS_{\text{arena}}}{100} \right) \right] \quad (2.18)$$

2.3 Ensayos al hormigón

2.3.1 Ensayos al hormigón — propiedades del hormigón fresco. NC-ISO 1920-2: 2010.

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.

- 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.

2.3.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión. NC 244: 2005.

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 2.1:

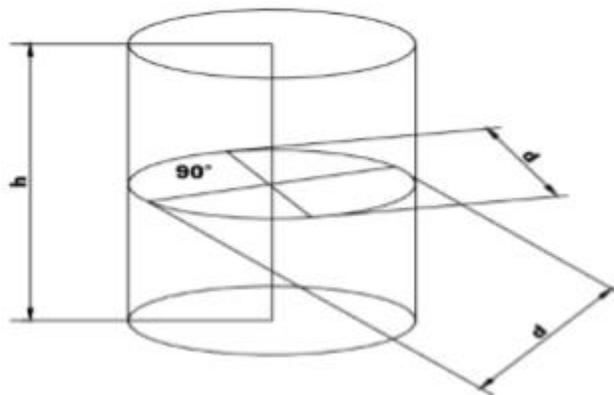


Figura 2.1 Máquina de ensayos de compresión

- 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 este 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 ± 2 Kgf/cm²/s ($0,5 \pm 0,2$ 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:

$$R'_{bi} = \frac{10F}{A} \quad (2.19)$$

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:

$$R'_{bs} = \frac{\sum R'_{B'}}{n} \quad (2.20)$$

Donde:

n: Número de probetas de una serie.

2.3.3 Hormigón endurecido. Determinación de la absorción de agua por capilaridad. NC 345:2005.

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 preconditionada 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:

$$m = \frac{t_n}{h^2} \quad (2.21)$$

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:

$$k = \frac{Q_n - Q_0}{\sqrt{t_n}} * \frac{1}{A} \quad (2.22)$$

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 m².

• Porosidad efectiva:

$$\xi = \frac{Q_n - Q_0}{A * h * 100} \quad (2.23)$$

Donde:

h: es la altura o espesor total del espécimen expresada en m².

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 m².

2.3.4 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad). NC 967: 2013.

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.

$$I = \frac{m_t}{a + d} \quad (2.24)$$

Donde

I : Absorción (mm)

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

a : Área expuesta de la probeta, (mm^2)

d : Densidad del agua, ($0,001 \text{ g/mm}^3$)

- La velocidad inicial de absorción de agua ($\text{mm/s}^{1/2}$) se define como la pendiente de la línea que sea el mejor ajuste a I plotado contra la raíz cuadrada del tiempo ($\text{s}^{1/2}$).

- 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. NC 192: 2012.

Método de cálculo:

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

$$f_{ci} = \frac{10F}{A} \quad (2.25)$$

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:

$$f_{cs} = \sum_{i=1}^n f_{ci} \quad (2.26)$$

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:

$$R = F_{c1} - F_{cn} \quad (2.27)$$

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

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{ci}}{m} \quad (2.28)$$

Donde

m: número de series del lote.

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

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.29)$$

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

$$S_1 = \frac{1}{d_2} * \bar{R} \quad (2.30)$$

Donde:

1/d₂: Constante que depende del número de probetas promediadas en una serie (Ver Tabla 2.6)

Tabla 2.6 Valor de la constante 1/d₂

Cantidad de probetas	Valor de 1/d ₂
2	0.8865
3	0.5967

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

$$V_1 = \frac{S_1}{F_{cm}} * 100 \quad (2.31)$$

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:

$$S_n = \sqrt{\sum_{s=1}^m \frac{(F_{cm} - F_{cs})^2}{m-1}} \quad (2.32)$$

La S_n 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 2.7 Valores de S_n para diferentes grados de control en hormigones de fck ≤ 34,5

Tipo de Operación	Valor de Sn (MPa) con diferentes grados de control				
	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Deficiente
Control de campo (A pie de obra o planta)	Menor que 2,81	2,82 a 3,52	3,53 a 4,22	4,23 a 4,92	Mayor que 4,92

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

$$V_n = \frac{S_n}{F_{cm}} * 100 \quad (2.33)$$

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

$$F_{ck} = F_{cm} - 1,34 * S_n \quad (2.34)$$

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:

$$F_{ck} = F_{cm} - t * S_n \quad (2.35)$$

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 2.8. Donde (v = n – 1), o sea, la población de series menos 1.

Tabla 2.8 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	40	1,303
10	1,372	21	1,323	60	1,296
11	1,363	22	1,321	120	1,289

2.3 Conclusiones Parciales

- 1- Los materiales empleados en el diseño de mezcla fueron árido grueso procedente de la cantera Planta Libertad, árido fino de la cantera Planta Libertad, el cemento de Cemento Cienfuegos S.A y aditivo *Dynamón* SP 500.
- 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 EN LOS DIFERENTES DISEÑOS DE MEZCLAS.

Este capítulo tiene como objetivo discutir los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión, porosidad efectiva y sorptividad realizados a la dosificación 1 y dosificación 2.

3.1 Áridos

Propiedades geométricas del árido

3.1.1 Áridos. Análisis granulométrico

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.

Tras ver los resultados de los ensayos granulométricos de los áridos, el autor considera que la resistencia final de la mezcla se puede ver afectada, en el caso de la arena que no cumple con las especificaciones en el tamiz No. 100 la mezcla no estará dotada de todo el material fino necesario 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 y esto afectaría propiedades como la compacidad, densidad, así como la trabajabilidad de la mezcla. Además, el árido grueso también incumple en alguno de sus tamices según las especificaciones, según Gámez et al. (2017) que no exista la cantidad reglamentada de este árido puede verse afectada la resistencia mecánica del hormigón; por lo que el autor recomienda realizar una combinación de áridos tanto grueso como fino, para lograr una mezcla lo más homogénea posible para lograr las resistencias y durabilidad deseadas.

Tabla 3.1 Análisis Granulométrico de Agregado Fino

Análisis Granulométrico de Agregado Fino No. 4 (4,75 Mm)- No. 100 (0,15 mm)												
Tamices	Pulgadas	1"	¾	½	3/8	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100	No 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	72	50	36	25	11	
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 Análisis Granulométrico del árido grueso

Análisis Granulométrico del árido grueso (10-5mm)						
Tamices (pulgadas)	1/2	3/8	No. 4	No. 8	No. 16	No conforme
Tamices (mm)	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	
Por Ciento Pasado (%)	100	98	36	14	8	
Especificaciones	100	100	35	10	5	
	100	85	15	0	0	

3.1.2 Módulo granulométrico o de finura de la arena

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.

Pues la cantidad de fino reduce la fricción entre las partículas sólidas y mejora la deformabilidad de la pasta, de esta manera se cubren los agujeros en la mezcla y posibilita que la mezcla sea más laborable.(León and Egue, 2010)

Si bien tamaños menores de agregados exigen contenidos de agua mayores, esta condición se ve compensada con amplitud, al aumentarse la superficie de contacto entre la zona de transición interfacial de la pasta y los agregados.(Sepúlveda, 2016)

Para ello se empleó la ecuación (2.2):

$$MF = \frac{3 + 28 + 50 + 64 + 75 + 89}{100} = 3,09 \quad (3.1)$$

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

El filler cumple con la capacidad de cubrir la granulometría que no disponga el árido, por lo que es capaz de crear una matriz más compacta, reduciendo así la porosidad y aumentando la resistencia del hormigón. (Guevara, 2019)

Árido fino

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = 3,1\% \quad (3.2)$$

Árido Grueso

$$\% \text{ de material que pasa por el tamiz de } 0,074 \text{ mm (No. 200)} = 2,04\% \quad (3.3)$$

Teniendo en cuenta la NC 251:2018: Áridos para hormigones hidráulicos- Requisitos, los resultados obtenidos del árido fino se encuentran dentro del rango permisible, menor del 5% para hormigones que no estén sometidos a la abrasión y a exposición al ambiente marino; el porcentaje permitido de material más fino que el tamiz de No. 200 en los áridos gruesos para cualquier hormigón es inferior o igual a 1 % entonces este es no conforme.

En Franco (2015) se dice que cuando hay presencia en exceso de este material tiende a adherirse a las partículas de mayor tamaño, generando problemas de adherencia con la pasta de cemento. Esto traería consigo problemas de resistencia mecánica, debido a que existirá posibles poros, que aumenta la velocidad de absorción capilar y la penetración de agentes nocivos.

3.1.4 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla

Los áridos deben estar constituidos por partículas duras, de forma y tamaño estables y deben estar limpios y libres de terrones, partículas blandas o laminadas, arcillas, impurezas

orgánicas, sales y otras sustancias que por su naturaleza o cantidad afecten la resistencia o la durabilidad de morteros y hormigones.(Uribe, 2011)

Árido fino

$$L = \frac{1000 - 1000}{1000} = 0 \quad (3.4)$$

Árido Grueso

$$L = \frac{1000 - 1000}{1000} = 0 \quad (3.5)$$

Basándose en la NC 251:2018 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% del peso total del árido.

Según los resultados obtenidos se puede afirmar que la mezcla no tendrá problemas de absorción capilar o porosidad ya que carece de impurezas y esto propicia una buena adherencia de los materiales generando una menor cantidad de espacios vacíos favoreciendo la permeabilidad de la mezcla y con ello la menor introducción de agentes agresivos. Según Paillán (2017) la presencia arcillas mezclada con el árido puede alterar la adherencia con los ligantes e impedir una correcta aplicación.

Propiedades físicas del árido

3.1.5 Pesos específicos y absorción de agua

Árido fino

$$\text{Peso específico corriente} = \frac{494}{640 + 500 - 953} = 2,64 \text{ g / cm}^3 \quad (3.6)$$

$$\text{Peso específico saturado} = \frac{500}{640 + 500 - 953} = 2,67 \text{ g / cm}^3 \quad (3.7)$$

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{494}{640 + 494 - 953} = 2,73 \text{ g / cm}^3 \quad (3.8)$$

$$\text{Absorción de agua} = \frac{500 - 494}{494} = 1,21\% \quad (3.9)$$

Árido Grueso

$$\text{Peso específico corriente} = 2,57 \text{ g / cm}^3 \quad (3.10)$$

$$\text{Peso específico saturado} = 2,61 \text{ g / cm}^3 \quad (3.11)$$

$$\text{Peso específico aparente} = 2,68 \text{ g / cm}^3 \quad (3.12)$$

$$\text{Absorción de agua} = 1,57\% \quad (3.13)$$

Según los resultados obtenidos de los pesos específicos el autor afirma que la arena cumple con las condiciones establecida en la norma NC 251: 2018: Áridos para hormigones Hidráulicos-Requisitos, pues los pesos específicos correspondiente a la misma 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, pues mientras más poroso sea el hormigón existe una mayor probabilidad de que penetren agentes tóxicos que atenten en contra de la durabilidad del mismo.

3.2 Cemento

3.2.1 Ensayos Mecánicos

Al realizar el ensayo de resistencia a la compresión, según la NC 506:2013: Cemento Hidráulico-Método de ensayo. Determinación de la resistencia Mecánica, como se muestra en la Tabla 3.3 los resultados son correctos de acuerdo a las especificaciones.

El cemento al encontrarse en condiciones óptimas para su empleo, posibilita que al integrarse con el resto de los elementos de la mezcla cumplirá correctamente con su función de aglomerante, dotándolos de la resistencia necesaria para lograr elementos durables que impidan el paso de agentes agresivos que atenten contra dicho elemento.

Tabla 3.3 Ensayos mecánicos

Ensayo	Método	Temp. (°C)	Hum. (%)	Resultados (MPa)	Especificaciones	Evaluación
Resistencia Compresión	NC 506-2013	25,1	34	35,6	Mín. 35	Conforme

3.3 Hormigón

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

Al realizar el ensayo, el resultado obtenido se compara con la Tabla 3.4, la cual muestra las clasificaciones de los diferentes asentamientos, según lo establecido por la NC 120:2018:

Tabla 3.4 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

El resultado obtenido fue de 20 cm clasificándose la mezcla como fluida, la cual se corresponde con lo que se deseaba según proyecto, resultado de ello fue el aditivo Dynamon SP 500 que dota a la mezcla de una buena trabajabilidad en su estado fresco y elevadas prestaciones mecánicas en su estado endurecido.

3.3.2 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión

Tabla 3.5 Resistencia a compresión del hormigón a los 7 días

Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/cm ³)	Carga de rotura (N)	Fci	Fcs
1	300	150	11,3	2131	455	25,7	25,1
2	300	150	11,4	2150	445	25,2	
3	300	150	11,4	2150	430	24,3	

Los componentes de cemento como el aluminato tricálcico o el silicato tricálcico tienen una aportación inicial a la resistencia bastante elevada y se comprueban a los 2 y 7 días. (Guevara, 2019)

Según los resultados que arrojan los ensayos de resistencia a la compresión, las probetas a los 7 días alcanzan resistencias próximas a las deseadas, lo que posibilita predecir el comportamiento de dicho hormigón en el futuro; sin embargo es importante esperar hasta los 28 días ya que Guevara (2019) dice que es en ese momento en el que se puede dar por finalizada la resistencia total del hormigón.

Según el autor los resultados a los 7 días son favorables pues el hormigón alcanzó el 73% de su resistencia final, esto es debido al aditivo Dynamon SP 500 que dota a la mezcla de altas resistencias a edades tempranas.

Tabla 3.6 Resistencia a compresión del hormigón a los 28 días

Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/cm ³)	Carga de rotura (N)	Fci	Fcs
1	300	150	11,4	2150	610	34,5	34,1
2	300	150	11,3	2131	600	34	
3	300	150	11,4	2150	595	33,7	

Los resultados de resistencia a los 28 días son favorables pues supera el valor de resistencia deseada, reportando gran resistencia y durabilidad.

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

Mediante la NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real, se obtuvieron los siguientes valores, mediante las ecuaciones (2.32) y (2.35), según los cálculos a través de 12 probetas ensayadas las cuales fueron tomadas como muestra para obtener el F_{cm} y F_{cs} para obtener la desviación típica de la planta y las 12 probetas representan el grado de libertad para seleccionar el percentil t de Student:

$$S_n = \sqrt{\sum_{s=1}^m \frac{(F_{cm} - F_{cs})^2}{m-1}} = 2,37 \quad (3.14)$$

$$F_{ck} = 34,1 - 1,36 * 2,37 = 30,87 MPa \quad (3.15)$$

La resistencia característica obtenida es correcta, según la NC 120:2018 para hormigones armados con un nivel de exposición alto es necesaria una resistencia mínima a la compresión de 30 MPa, para un mínimo de durabilidad de 50 años bajo condiciones de mantenimiento ligero y sistemático.

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

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

3.3.6 Cálculo del rendimiento de cemento

Según la ecuación (1.3) se procede a calcular el rendimiento del cemento:

$$R_{cemento} = \frac{308,7}{415} = 0,74 \quad (3.16)$$

Este resultado se ubica dentro de los parámetros de aceptable para un hormigón con aditivos plastificantes según la Tabla 1.1.

Los resultados al encontrarse correctos el autor decidió reducir 15 kg más de cemento en la mezcla para determinar si es posible seguir disminuyendo los contenidos de cemento y obtener un hormigón durable.

Tabla 3.7 Dosificación 2

Materiales	Dosificación 1 (Kg/m ³)	Dosificación 2 (Kg/m ³)
Agua	150	144
Cemento	415	400
Arena	951	965
Gravilla	878	891
Aditivo(L/m ³)	3,0	3,0

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

Al medir el asentamiento por el cono de Abrams según la NC ISO 1920-2: 2010 Ensayos al Hormigón — Parte 2: propiedades del hormigón fresco, se obtuvo un asentamiento de 23 cm clasificando la mezcla como muy fluida, por lo cual se analizó también la extensión

resultando de 42 cm, no llego a los 50 cm que es el tope máximo que indica la norma, así que es posible seguir trabajando con esta mezcla.

3.3.8 Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión

Tabla 3.8 Resistencia a compresión del hormigón a los 7 días

Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/cm ³)	Carga de rotura (N)	Fci	Fcs
1	300	150	11,6	2188	500	28,3	27,9
2	300	150	11,5	2169	490	27,7	
3	300	150	11,5	2169	490	27,7	

Tabla 3.9 Resistencia a compresión del hormigón a los 28 días

Muestra	Altura (mm)	Diámetro (mm)	Masa (Kg)	Densidad (Kg/cm ³)	Carga de rotura (N)	Fci	Fcs
1	300	150	11,6	2188	645	36,5	36,1
2	300	150	11,5	2169	640	36,2	
3	300	150	11,6	2188	630	35,7	

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

Mediante la NC 192: 2012: Cálculo de la resistencia característica real, se obtuvieron los siguientes valores, mediante las ecuaciones (2.32) y (2.35), según los cálculos a través de 12 probetas ensayadas las cuales fueron tomadas como muestra para obtener el F_{cm} y F_{cs} para obtener la desviación típica de la planta y las 12 probetas representan el grado de libertad para seleccionar el percentil t de Student:

$$S_n = \sqrt{\sum_{s=1}^m \frac{(F_{cm} - F_{cs})^2}{m-1}} = 2,37 \quad (3.17)$$

$$F_{ck} = 36,1 - 1,36 * 2,37 = 32,87 MPa \quad (3.18)$$

Los resultados de la segunda dosificación arrojan resistencias superiores a la dosificación 1 aun con menor cantidad de cemento, esto se debe al incremento de áridos gruesos que aportan resistencia y el árido fino suficiente para cubrir los espacios vacíos; todo esto unido al rendimiento del cemento alcanzado.

La resistencia característica obtenida es buena, según la NC 120:2018 para hormigones armados con un nivel de exposición alto es necesaria una resistencia mínima a la compresión de 30 MPa, para un mínimo de durabilidad de 50 años bajo condiciones de mantenimiento ligero y sistemático.

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

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

3.3.12 Cálculo del rendimiento de cemento

Según la ecuación (1.3) se procede a calcular el rendimiento del cemento:

$$R_{\text{cemento}} = \frac{328,7}{400} = 0,82 \quad (3.19)$$

Este resultado se ubica dentro de los parámetros de bueno para un hormigón con aditivos plastificantes según la Tabla 1.1.

En esta dosificación se alcanza un mayor rendimiento logrando por cada 1Kg de cemento 1Kg/cm² de resistencia a la compresión.

3.4 Conclusiones Parciales

- 1- De los ensayos realizados a los áridos según la NC 251:2018 ambos resultaron no conformes en cuanto a su granulometría, para ello el autor recomendó realizar combinación de áridos para obtener los tamaños de áridos pasado por cada tamiz según especifica la norma y de esta manera se obtendrá una granulometría continua que no interfiera en las propiedades de resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón.
- 2- Las dosificaciones 1 y 2 cumplieron con los parámetros de resistencias deseados.

CONCLUSIONES

- 1- El rendimiento del cemento está condicionado en gran medida del diseño de mezcla que se lleve a cabo, el cual influirá en propiedades finales del hormigón como la resistencia a la compresión.
- 2- La caracterización de los materiales y métodos a través de la medición y experimentación como parte de los métodos particulares empíricos de investigación científica permitieron la comparación los resultados obtenidos de los áridos, cemento y hormigón con los parámetros normados.
- 3- Las dosificaciones propuestas cumplen con el criterio de resistencia a la compresión planteado por la NC 120:2018, lográndose disminuir los contenidos de cemento y aumentar los rendimientos del mismo.

RECOMENDACIONES

- 1- Se recomienda a la Empresa Constructora Militar No.4 que continúen las investigaciones con un número mayor de probetas que garanticen una mayor confiabilidad en los resultados.
- 2- Se recomienda el uso de áridos procedentes de otras canteras y combinarlos entre ellos para garantizar una granulometría ideal.

BIBLIOGRAFÍA

- NC-ISO 1920-3 Ensayos al hormigón. Parte 3 elaboración y curado de probetas para ensayos.
- NC-ISO:1920-2 Ensayos al hormigón-parte 2: Propiedades del hormigón fresco.
- NC 95:2017 Cemento portland. Especificaciones.
- NC 120:2018 Hormigón hidráulico-Especificaciones.
- NC 177 Áridos. Determinación del porcentaje de huecos. Método de ensayo.
- NC 178:2002 Áridos. Análisis Granulométrico.
- NC 179:2002 Áridos. Determinación del contenido de partículas de arcilla. Método de ensayo.
- NC 182:2002 Áridos. Determinación del material más fino que el tamiz de 0.074 mm (no. 200).
Método de ensayo.
- NC 184:2002 Arena. Determinación de la humedad superficial. Método de ensayo.
- NC 186:2002 Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo.
- NC 187:2002 Árido grueso. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo.
- NC 190:2002 Áridos gruesos. Determinación del índice de triturabilidad.
- NC 192:2012 Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.
- NC 244:2005 Hormigón endurecido.
- NC 250:2005 Hormigón estructural. Requisitos de durabilidad.
- NC 250:2005 Hormigón estructural. Requisitos de durabilidad.
- NC 251:2018 Áridos para Hormigones Hidráulico — Requisito.
- NC 345:2011 Hormigón endurecido. Absorción de agua por capilaridad.
- NC 353:2004 Agua para el amasado y curado del hormigón y los morteros.
- NC 506:2013 Cemento hidráulico. Método de ensayo.
- NC 967:2013 Hormigón hidráulico. Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).
2007. *Materiales de la construcción II*.
2018. Cuba produce cemento ecológico menos costoso y más resistente. *Cubadebate*.
- ALCONZ, W. P. 2006. *Material de apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje de la asignatura materiales de construcción (guía de las prácticas de campo y normas de calidad)*. UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN SIMÓN
- BERISTAIN, G. D. C. & MENDIOLA, A. 2013. Análisis de la red mundial de comercio exterior del cemento en el 2013
- BUSTILLO, M. 2008. *Mineral Resources and Construction Materials*. Universidad Complutense.
- CAGIAO, J., GÓMEZ, B., DOMÉNECH, J. L., GUTIÉRREZ, S., GUTIÉRREZ, H., MARTÍNEZ, F. & GONZÁLEZ, M. B. 2010. *Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción* Universidade da Coruña
- FORESIGHTCUBA 2019. Industria del Cemento
- FRANCO, L. 2015. Folleto de prácticas de laboratorio. *Instituto superior pedagógico para la educación técnica y profesional*.
- GÁMEZ, D. C., SALDAÑA, H., GÓMEZ, J. M. & CORRAL, R. 2017. *Feasibility study and characterization of aggregates for structural concrete*.

- GARCÍA, J. 2011. *Análisis de viabilidad económico-financiera de una planta de cemento*. ICAI Universidad Pontificia de Comillas
- GARCÍA, S. 2019. *Propuesta de diseño de mezcla para la elaboración del hormigón en la Empresa Militar de Proyectos e Investigaciones FAR No-4* Universidad de Matanzas
- GEOLOGÍA, E. 2010. Estudio sobre áridos: geología, legislación, medio ambiente, normativa, explotación y tratamiento. .
- GONZÁLEZ, E. 2012. *Nuevo método de dosificación sostenible para hormigones con áridos reciclados*. Universitat Politècnica de Catalunya
- GUEVARA, P. J. 2019. *Estudio y desarrollo experimental de nuevas formulas para la fabricación de hormigón de altas prestaciones UHPC*. .
- GUZMÁN, J. 2019. Propiedades, características y funciones del agua en el concreto.
- HUANCA, S. L. 2006. *Diseño de Mezclas de Concreto* Universidad Nacional del Altiplano
- JOVÉ, F. 2018. *Construcción III*.
- KUMAR, P. & MONTEIRO, P. J. M. 2001. *Concrete Microstructure, Properties and Materials*. University of California.
- LAZO, L. & MACHADO, E. *Estructuras de Hormigón*.
- LEÓN, L. & EGUE, H. 2010. Diseño de Mezclas para Hormigón Autocompactante
- LUACES, C. 2007. El recorrido de los minerales. *Los áridos y el cemento*.
- MANCHA, U. D. C. L. 2014. www.ingenieriarural.com. [Accessed].
- MARTÍNEZ, A. R. 2014. *Estudio del sector cementero a nivel mundial y nacional, con particularización de una empresa cementera situada en la Comunidad Valenciana*
- MARTIRENA, F. 2018. Cuba produce cemento ecológico menos costoso y más resistente. *Cubadebate*.
- MILLER, S. A. 2016. Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20%. *Environ.Res.Lett.11(2016)*.
- MUCIÑO, A. 2017. Diseño de mezclas de concreto.
- NISTAL, Á. F., RETANA, M. J. & RUIZ, T. 2012. *El hormigón: historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia*. UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
- O'REILLY, V. A. 2007. Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño
- O'REILLY, V. A. & PÉREZ, E. J. 2008. Experiencias en el uso de hormigones de alto desempeño con áridos calizos, en estructuras sometidas a fuerte aerosol marino. *Exacta*.
- PAILLÁN, T. S. 2017. *Estrategias de mejora de productividad y competitividad de la empresa "Transportes Ricky" para su permanencia y crecimiento futuro*. UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO.
- PROMATERIALES 2007. Aditivos de hormigón y morteros.
- PUIG, R. A., LLANES, M. & FERNÁNDEZ, A. 2018. *Dosificación de hormigones para las obras de la Zona Especial de Desarrollo del Mariel* Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", CUJAE, CECAT.
- REPORT, G. C., REVIEW, I. C., MUNDIAL, B. & FMI 2016. Hydraulic Cement: World Production. *Country*.
- RIQUELME, B. D. L. P. 2000. Properties and use of self- compacting concrete.
- RIVVA, E. 1992. *Diseño de mezclas*.
- RUSJANTO, H. 2010. *How to make high performance and green structural concrete*.
- SARRIA, R., GAYOSO, R. A. & DÍAZ, E. J. 2014. Controles preventivos del cumplimiento de especificaciones. . *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, Vol.8
- SEPÚLVEDA, A. 2016. Factores determinantes de la resistencia a la compresión del concreto.

URIBE, P. A. 2011. *Explotación y venta de áridos en la comuna de Puerto Montt*. Universidad Austral de Chile

VILLARINO, A. 2011. Tema 6: El Hormigón

ANEXOS