

*Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”  
Facultad de Ciencias Técnicas*



# **Propuesta de diseño de mezcla para la elaboración del hormigón en la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.**

**Trabajo de Diploma en Ingeniería Civil**

**Autor:** Lázaro Osmany Torres Mojena.

**Tutor:** Ing. Liset León Consuegra.

Ing. Alberto Delgado Torres.

*Matanzas, 2019*



## **Declaración de Autoridad**

Por medio de la presente declaro que yo, Lázaro O Torres Mojena, 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.

## *Dedicatoria.*

*Dedico esta Tesis, a mi madre, por guiarme y apoyarme siempre en todos los caminos, por aconsejarme siempre de manera inteligente en todas mis decisiones y sobre todo por estar siempre ahí cuando lo he necesitado.*

## *Agradecimientos:*

- ✓ *A mi padre y a mis hermanas, que siempre ha estado ahí en todos mis caprichos, para apoyarme en mis decisiones.*
- ✓ *A mi novia Leidys por haberme apoyado en estos cinco años de duro estudio.*
- ✓ *A todos los trabajadores de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón, y en especial a Alberto*
- ✓ *A la Empresa Constructora Militar #4, y en especial a Mirna.*
- ✓ *A mis tutores Ing. Liset León Consuegra y Ing. Alberto por su enseñanza y paciencia,*
- ✓ *A todos mis compañeros de universidad; a todos los profesores de la carrera por su enseñanza y dedicación,*
- ✓ *A Sandy, Gabriel y Marquito, mis amigos que siempre han estado ahí cuando lo he necesitado para ayudarme, apoyarme y compartir conmigo las cosas buenas y malas que nos ha tocado vivir en estos años de carrera.*

## RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales más utilizado por el hombre y uno de los sus componentes principales es el cemento. Los altos consumos de cemento es un problema mundial debido a la contaminación ambiental que genera su producción. La Unidad Básica de Servicios de Hormigón presenta altos índices de consumo de cemento que presenta es un ejemplo del creciente consumo de cemento en nuestro país, lo llevó a establecer la vía experimental como solución a este problema. La empresa presentó un rendimiento aceptable en los últimos meses, pero con el propósito de obtener menores índices de consumo de cemento y cumplir con los rendimientos de cemento establecidos por el ministerio de la construcción en la entidad, por lo que se decidió proponer un diseño de mezcla para la elaboración de hormigón en la entidad. En la obtención del hormigón se utilizó cemento de Cementos Cienfuegos S.A, arena de la cantera Arimao y Antonio Maceo, árido grueso de la cantera Antonio Maceo y el aditivo Sikaplas 9100, los cuales se realizó una caracterización utilizando métodos experimentales. Al hormigón elaborado se le midieron propiedades en estado fresco y estado endurecido. Se elaboraron 9 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 propone una dosificación 2 con un menor contenido de cemento evaluando en ella la resistencia a compresión lográndose un aumento del rendimiento de cemento.

**Palabras claves:** cemento; diseño de mezcla; resistencia; porosidad; sorptividad; rendimiento.

## **ABSTRACT**

Concrete is one of the materials of the most used materials by man and one of its main components is cement. The high consumption of cement is a global problem due to the environmental pollution generated by its production. The Basic Concrete Services Unit has high rates of cement consumption that is an example of an increase in consumption in our country, led him to establish the experimental path as a solution to this problem. The company presented an acceptable performance in recent months, but with the purpose of obtaining lower consumption rates of cement and comply with the cement yields established by the Ministry of construction in the entity, so it was decided to propose a design of mixture for the manufacture of concrete in the entity. Cement cement Cienfuegos S.A, sand from the Arimao and Antonio Maceo quarries, coarse aggregate from the Antonio Maceo quarry and Sikaplas 9100 additive were used to obtain the concrete, which was characterized using experimental methods. The properties of the processed concrete were measured in the fresh state and hardened state. 9 test tubes of dosage 1 were elaborated, which were measured by settlement, compression resistance, effective porosity and sorptivity, obtaining results that complied with that established in the NC 120: 2018, for which a dosage 2 with a lower cement content is proposed evaluating compressive strength in it achieving an increase in cement performance.

**Keywords:** cement; mix design; resistance; porosity; sorptivity; performance.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción</b> .....	10
<b>Capítulo I:</b> Fundamentación acerca de los materiales y propiedades componentes del hormigón, los diseños de mezcla y el rendimiento de cemento.....	14
<b>1.1</b> El hormigón como material .....	14
<b>1.2</b> Materiales componentes del hormigón .....	15
1.2.1 Agua.....	15
1.2.2 Cemento (Aglomerante).....	16
1.2.3 Áridos.....	18
1.2.4 Aditivo .....	22
<b>1.3</b> Propiedades del Hormigón.....	25
<b>1.4</b> Factores que influyen en la resistencia del hormigón.....	25
<b>1.5</b> Factores que influyen en la porosidad del hormigón.....	26
<b>1.6</b> Factores que influyen en la sorptividad del hormigón.....	26
<b>1.7</b> Factores de los cuales dependen las propiedades del hormigón .....	26
1.7.1 Diseño de la mezcla de hormigón .....	¡Error! Marcador no definido.7
<b>1.8</b> Métodos para realizar los diseños de mezcla.....	30
1.8.1 Método de Fuller-Thompson .....	31
1.8.2 Método de Bolomey.....	32
1.8.3 Método de Faury .....	32
1.8.4 Métodos de la ACI.....	33
1.8.5 Método de O'Reilly .....	34
<b>1.9</b> Rendimiento del cemento .....	35
<b>1.10</b> Conclusiones parciales.....	37
<b>Capítulo 2:</b> Materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas .....	38
<b>2.1</b> Diseño de experimento .....	38
<b>2.2</b> Caracterización de los materiales.....	40
2.2.1 Agua.....	40
2.2.2 Cemento.....	40
2.2.3 Árido grueso.....	41



2.2.3.1	Propiedades geométricas del árido.....	42
2.2.3.2	Propiedades físicas del árido.....	44
2.2.3.3	Propiedades químicas de los áridos.....	47
2.2.3.4	Propiedades mecánicas del árido.....	48
2.2.4	Aditivo.....	51
<b>2.3</b>	<b>Hormigón.....</b>	<b>51</b>
2.3.1	Ensayo por el cono de Abrams.....	51
2.3.2	Ensayo de resistencia a compresión del hormigón.....	55
2.3.3	Ensayo para la determinación de la absorción de agua por capilaridad.....	57
2.3.4	Ensayo para la determinación de la velocidad de absorción de agua.....	58
<b>2.4</b>	<b>Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.....</b>	<b>62</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusiones parciales.....</b>	<b>70</b>
<b>Capítulo 3:</b>	<b>Discusión de los resultados obtenidos de los diseños de mezcla.....</b>	<b>72</b>
<b>3.1</b>	<b>Agua.....</b>	<b>72</b>
<b>3.2</b>	<b>Cemento.....</b>	<b>72</b>
3.1.1	Ensayos físicos del cemento.....	72
3.1.2	Ensayos mecánicos del cemento.....	74
<b>3.3</b>	<b>Áridos.....</b>	<b>75</b>
3.3.1	Propiedades geométricas.....	75
3.3.2	Propiedades físicas del árido.....	78
3.3.3	Propiedades químicas de los áridos.....	80
3.3.4	Propiedades mecánicas del árido.....	81
<b>3.4</b>	<b>Aditivo.....</b>	<b>83</b>
<b>3.5</b>	<b>Hormigón.....</b>	<b>83</b>
3.5.1	Determinación de la consistencia por el cono.....	83
3.5.2	Determinación de la resistencia del hormigón del diseño de mezcla 1.....	84
3.5.3	Determinación de la absorción de agua por capilaridad del diseño de mezcla1..	88
3.5.4	Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad) del diseño de mezcla 1.....	91
<b>3.6</b>	<b>Resultados del diseño de mezcla 2.....</b>	<b>93</b>
3.6.1	Determinación de la resistencia del hormigón del diseño de mezcla 2.....	93

<b>3.7 Conclusiones parciales.....</b>	<b>95</b>
Conclusiones generales.....	96
Recomendaciones.....	97
Referencias Bibliográficas.....	98

## **Introducción.**

El hormigón constituye una herramienta fundamental de la historia de la construcción. Cuando el hombre se decidió por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos elementos para poder conformar estructuras estables. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen fácilmente.

El patrimonio construido por el hombre está constituido en un 90% de hormigón, cuyo componente principal es el cemento. El hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante. El conglomerante puede ser cualquiera, pero cuando se refiere a hormigón o mortero, generalmente es un cemento artificial y entre estos últimos, el más importante y habitual es el cemento Portland. Según Villanueva (2008), los áridos no solo limitan la resistencia del hormigón, sino que sus propiedades afectan de manera fundamental a la durabilidad, a la estructura del hormigón y su estabilidad dimensional. Tanto la producción como el consumo del cemento y el hormigón, se asocian con el nivel de desarrollo de un país. La tendencia al aumento de la producción de cemento mundialmente y con ello, las emisiones que provoca el calentamiento global y el cambio climático, ha incentivado transformaciones en el proceso de producción del cemento, lo que ha motivado disminuir la temperatura de combustión, aumentar la reactividad del cemento, variar su composición de fases y disminuir los contenidos de clínquer en el cemento.

La industria del hormigón, conjuntamente a la del cemento Portland, ha introducido mejoras, se destacan el desarrollo industrial de la producción y colocación de hormigón, la aplicación de aditivos químicos combinado con adiciones de materiales cementicios suplementarios tales como: cenizas volantes, escorias siderúrgicas, micro sílice, puzolanas naturales y artificiales que mejoran las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, con el incremento de la durabilidad y la resistencia mecánica. Estas acciones contribuyen a la disminución del uso de clínquer y cemento.

En Cuba, los consumos de clínquer por tonelada de cemento son altos. La producción de cementos mezclados, introducida en la década de los 80, con los yacimientos de

mordenita- clinoptilolita, de Palmarito de Cauto, en Santiago de Cuba y Las Carolinas, en Cienfuegos, está hoy deprimida. Sólo el 15 % de la producción nacional corresponde a cementos con adiciones: PP-350, PP-250 y el cemento para albañilería CA-160. En particular en la provincia de Matanzas actualmente consta con uno de los planes de construcción de mayor importancia económica para el país, especialmente los servicios del polo turístico de Varadero son los máximos consumidores de hormigón, anualmente el volumen sobrepasa los 48 000 m<sup>3</sup>.

Aunque el empleo de los aditivos químicos ha sido generalizado en el país, los rendimientos del cemento, en su generalidad son inferiores debido a que no son aprovechadas todas sus potencialidades de reducir las relaciones agua-cemento, ni su capacidad de dispersar las partículas de cemento. Sólo en algunas producciones experimentales se han utilizado puzolanas, importando micro sílices (Rodríguez 2013).

Por lo que se define la **situación problemática** como: La Unidad de Servicios Básicos Hormigón perteneciente a la Constructora Hicacos de Varadero es la encargada de la producción de hormigón y mortero para las obras de polo turístico para lo cual utiliza áridos procedentes de la cantera Antonio Maceo y cemento P-35 procedente de Cienfuegos. Los hormigones que se producen varían su resistencia, pero los mayores volúmenes a producir alcanzan como resistencia mínima 350 kg/cm<sup>2</sup> cumpliendo con lo establecido en la NC 120: 2018. En la actualidad la entidad presenta una evaluación aceptable en cuanto al rendimiento de cemento e índices de consumo y lo establecido por el Ministerio de la Construcción, lo cual puede depender de los aditivos plastificantes utilizados, diseño de mezcla y la tecnología de producción según la bibliografía científica relacionada con el tema. Por lo que se hace necesario al no contar con resultados científicos avalados efectuar un análisis de las dosificaciones empleadas teniendo en cuenta las características de los áridos utilizados con el objetivo de lograr un cumplimiento del rendimiento de cemento lo que implicaría un ahorro en cuanto los contenidos de cemento, eficiencia de utilización y calidad del hormigón obtenido.

La **actualidad** de la investigación está dada por la necesidad de dar respuesta a los rendimientos de cemento, sobre todo en países en vía de desarrollo, como Cuba, mediante una alternativa de comprobación de los diseños de mezcla de hormigón.

Por lo que se define como **problema científico**: ¿se comprobará que cumplen los rendimientos de cemento en la elaboración de hormigón a partir de una propuesta de diseño de mezcla?

Queda como **objeto de investigación**: resistencia, porosidad, sorptividad.

El **campo de acción**: los diseños de mezcla empleados para la elaboración de hormigón.

**Hipótesis**: Si se propone un diseño de mezcla para la elaboración de hormigón podría comprobarse que exista un aumento del rendimiento de cemento.

Se consideran las siguientes **variables**:

Variable dependiente: resistencia, porosidad, sorptividad.

Variables independientes: diseños de mezcla de hormigón.

**Objetivo general**: Proponer un diseño de mezcla para la elaboración de hormigón en la Unidad de Servicios Básicos Hormigón.

De dicho objetivo general se derivan los siguientes **objetivos específicos**:

- ✓ Fundamentar acerca de los materiales y propiedades componentes del hormigón, los factores que influyen en la resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón, los diseños de mezcla y el rendimiento de cemento.
- ✓ Describir los materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas.
- ✓ Discusión de los resultados obtenidos en los diferentes diseños de mezcla.

**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 determinar 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 las dosificaciones empleadas 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.

Con el cumplimiento de los objetivos conduce a que se espere **el siguiente resultado:** propuesta de diseño de mezcla empleada en la elaboración de hormigón en la Unidad de Servicios Básicos Hormigón.

El trabajo **encierra valor** desde el punto de vista **práctico** porque permitirá una propuesta de diseños de mezcla empleada en la elaboración de hormigón en la Unidad de Servicios Básicos Hormigón.

Desde el punto de **vista social el valor** se manifiesta pues contribuirá a lograr un mayor número y mejoramiento de la calidad de construcciones turísticas y de obras sociales.

El **valor económico** está determinado según los resultados alcanzados pues la propuesta de diseño de mezcla empleada en la elaboración de hormigón en la Unidad de Servicios Básicos Hormigón permitirán un aumento de los rendimientos de cemento, contribuyendo así a una menor contaminación del medio ambiente.

El trabajo de diploma está estructurado de la siguiente manera: resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas, bibliografía consultada y anexos.

En el **Capítulo I** se fundamentará acerca de los materiales y propiedades componentes del hormigón, los factores que influyen en la resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón, los diseños de mezcla y el rendimiento de cemento.

En el **Capítulo II**, abordará la descripción los materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas.

En el **Capítulo III**, se discuten de los resultados obtenidos en los diferentes diseños de mezcla.

## **Capítulo I.**

# **Fundamentación acerca de los materiales y propiedades componentes del hormigón, los diseños de mezcla y el rendimiento de cemento.**

## **Introducción**

Este capítulo tiene como objetivo fundamentar el estado del arte de los materiales y propiedades componentes del hormigón. Se aporta una panorámica general sobre los factores que influyen en la resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón. El estado de los rendimientos de cemento en el mundo y específicamente en Cuba y además de los diferentes métodos para para la realización de los diseños de mezcla.

### **1.1 El hormigón como material.**

El patrimonio construido por el hombre está constituido en un 90% de hormigón y el segundo material más utilizado después del agua. Debido a su gran utilización se han constituido varias definiciones a nivel mundial:

Según Toirac (2009) el hormigón, es un material artificial de origen pétreo que se obtiene de la mezcla cuidadosamente proporcionada de diferentes materiales en los que se incluyen, básicamente, áridos finos y gruesos (arena y grava de diferentes tamaños), un aglutinante hormigón obtenido a base de cemento Portland, agua, y en ocasiones algún aditivo o adición encargados de modificar favorablemente algunas de sus propiedades en estado fresco. El agua se añade a la mezcla con la finalidad de propiciar una reacción química con el cemento que proporcione una pasta que confiera el carácter aglutinante necesario como para unir las partículas de árido, tanto fino como grueso y, además, para garantizar una adecuada laborabilidad.

Según el artículo La Clase Construcción y Estructura Náutica-CCEN (2015); el hormigón es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante (en la mayoría de las ocasiones cemento generalmente cemento Portland) al que se añade partículas o fragmentos de un agregado (áridos, como grava, gravilla y arena) agua (hidratación) y aditivos específicos. La sola mezcla de cemento con arena y agua (sin la participación de un agregado) se denomina mortero.

La NC 120.2018 Hormigón hidráulico. Especificaciones plantea que el hormigón se entiende como: 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 al hidratarse con cemento.

## **1.2 Materiales componentes del hormigón.**

### **1.2.1 Agua.**

El agua interviene durante el amasado, fraguado y primer endurecimiento del hormigón para su uso durante cada una de estas etapas debe ser apto para cumplir su función. El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación se convertirá en un factor negativo en la durabilidad del hormigón de igual manera una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua. Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento. Las especificaciones del agua se encuentran en la NC 353:2004 “Agua para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones” (Díaz 2012).

### **Agua para morteros y hormigones.**

Salvo justificación especial demostrativa de que no alteran perjudicialmente las propiedades exigidas a la lechada, mortero u hormigón, se rechazarán las aguas que no cumplan todas y cada una de las condiciones siguientes:

- Acidez medida por el pH, igual o superior a cinco (5).
- Sustancias disueltas en cantidad igual o inferior a quince gramos por litro (15 gr/l) equivalente a quince mil partes por millón (15.000 p.p.m.).
- Contenido en sulfatos, expresados en SO<sub>4</sub>, igual o inferior a un gramo por litro (1 gr/l) equivalente a mil partes por millón (1.000 p.p.m.).
- Ion cloro en proporción igual o inferior a una décima de gramo por litro (0,1 gr/l) equivalente a cien partes por millón (100 p.p.m.) para los hormigones pretensados, a seis gramos por litro (6 gr/l) equivalentes a seis mil partes por millón (6.000 p.p.m.) para los



hormigones en masa y morteros que no hayan de estar en contacto con armaduras o elementos metálicos.

- Estar exentas de hidratos de carbono.

- Sustancias orgánicas solubles en éter en cantidad inferior a quince gramos por litro (15 gr/l) equivalente a quince mil partes por millón (15.000 p.p.m.).

Si el ambiente de las obras es muy seco, lo que favorece la presencia de fenómenos expansivos de cristalización, la limitación relativa a las sustancias disueltas podrá hacerse aún más severa, a juicio del Director de Obra, especialmente en los casos y zonas en que no sean admisibles las eflorescencias.

Cuando el hormigonado se realice en ambiente frío, con riesgo de heladas, podrá utilizarse para el amasado, sin necesidad de adoptar precaución especial alguna, agua calentada hasta una temperatura de cuarenta grados centígrados. Como excepcionalmente, se utilice agua calentada a temperatura superior a la antes indicada, se cuidará de que el cemento, durante el amasado, no entre en contacto con ella mientras su temperatura sea superior a cuarenta grados centígrados (Ingeplan 2014).

### **1.2.2 Cemento (Aglomerante).**

El cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Esta definición abarca una gran variedad de materiales de cementación. Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arena, ladrillos, bloques de construcción, etc. Uno de los principales componentes del cemento son la cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos: Los cementos que se utilizan en la fabricación de hormigón tienen la propiedad de fraguar y endurecer con el agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ella y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos. Los cementos hidráulicos están compuestos principalmente por silicatos y aluminatos de cal y pueden clasificarse, en general, como cementos naturales; cementos Portland y cementos aluminosos (Claudio & Giordani 2014).

Como se muestra en la figura 1.1 en la actualidad a nivel mundial el consumo de cemento alcanzó las 4,129Mt 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.

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.

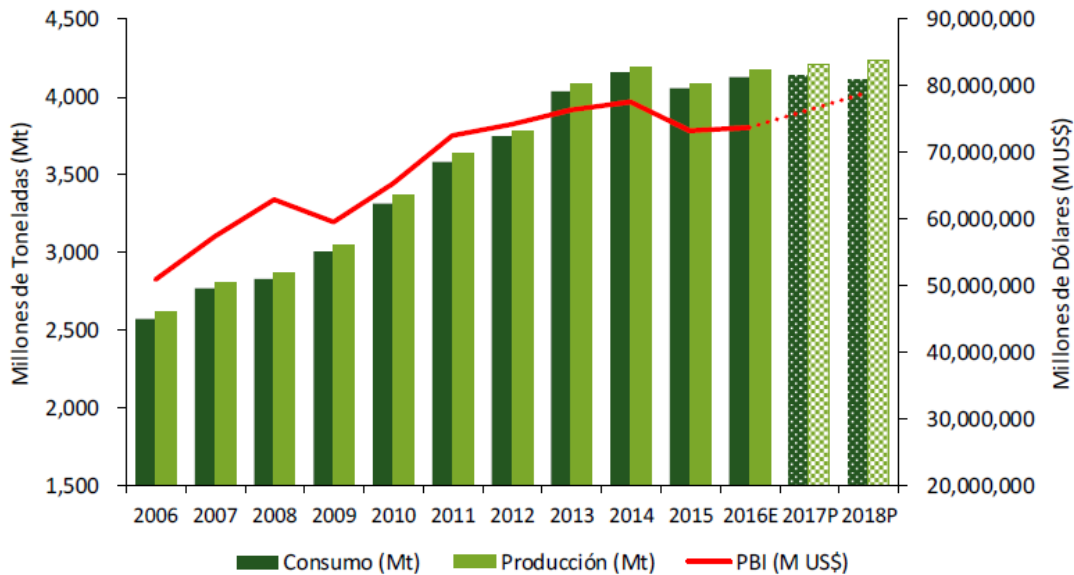


Figura 1.1: Consumo y Producción de Cemento, y PBI del Mundo (2006-2018P).

En el 2015, Qatar alcanzó el consumo per-cápita más alto (2,952Kg), China es el tercer con 1,705Kg y Burundi, en África, alcanzó el consumo per-cápita más bajo (19Kg)

La producción de cemento mundial alcanzó el 4,174 Mt1 en el 2016, obteniendo un crecimiento de 2.3% con respecto al 2015. China mantiene el liderazgo con el 57.6% de la producción mundial, seguida de India con el 6.9%.

El grado de asociación entre el consumo de cemento mundial y el PBI mundial se ubica en 95.8%. Excluyendo a China, se ubica en 79.5% (ASOCEM 2015).

En Cuba el consumo de cemento está asociado principalmente a la fase constructiva dentro de las inversiones y la edificación de viviendas. El consumo asociado a inversiones es el de mayor demanda y en su ejecución participan solamente empresas estatales. La construcción de viviendas es realizada en Cuba por dos modalidades:

financiación estatal y financiación privada o esfuerzo propio, es decir que, el consumo asociado a la edificación de viviendas involucra tanto a personas jurídicas como naturales, el esfuerzo propio crece cada año, en el 2013 representa el 47.7% y el sector estatal y cooperativo el 52.3% del total de viviendas terminadas y ya para el 2014 el esfuerzo propio representa un 51% y el sector estatal y cooperativo en un 49.3%(ONEI, Marzo, 2014). La figura 1.2 muestra la variación porcentual del consumo del cemento del año 2014 con respecto al año 2013( Ramíres 2015).

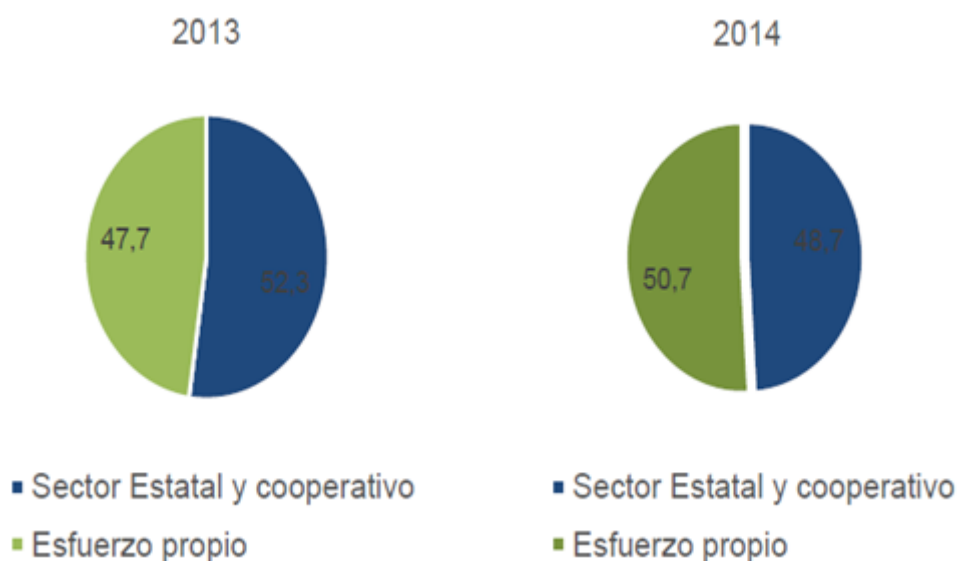


Figura 1.2: “Consumo de Cemento para Cuba (Años 2013-2014)”.

En países subdesarrollados como Cuba, es de vital importancia lograr un equilibrio entre las inversiones programadas y la construcción de viviendas. La primera es transcendental para lograr el desarrollo económico del país a través del fomento de las fuerzas productivas. La segunda, influye directamente en el bienestar de la población y constituye también un índice importante del desarrollo del país.

El total producido por empresas cubanas dedicada a la industria del cemento denota una brecha no totalmente cubierta de las potenciales demandas que se reflejan en la actividad productiva y la esfera social.

### 1.2.2 Áridos.

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

los materiales procedentes del mundo animal y vegetal y excluyendo las aplicaciones que utilizan como materia prima los minerales metálicos, industriales y las rocas ornamentales, prácticamente todo lo que podemos observar a nuestro alrededor procede de una cantera de áridos o de una gravera. Se trata por tanto de materiales indispensables para el desarrollo de nuestra sociedad. Presentan la particularidad de que son bastante abundantes en la corteza terrestre. Ello condiciona su bajo precio y la necesidad de ubicar las explotaciones cerca de los puntos de consumo con el fin de minimizar los costes de transporte (Villanueva 2008).

Los áridos constituyen una parte importante en el hormigón, no sólo en el orden cuantitativo, al representar más del 75% de su volumen; sino también en el comportamiento cualitativo. En ocasiones se le suele dar a los áridos una función puramente económica, presentándose simplemente como un material de relleno, sin embargo, los mismos tienen también una importante función técnica. Los áridos tienen una gran repercusión en las propiedades de los hormigones, tanto en su estado fresco como en el endurecido. La disminución de la fisuración y de las variaciones volumétricas en general, así como las propias resistencias mecánicas que se logran, se debe en gran medida a la presencia de los áridos en el aglomerado.

Los áridos deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60  $\mu\text{m}$ ; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm hasta 125 mm. Los áridos que se emplean en hormigones se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños para alcanzar una granulometría óptima. Tres factores intervienen en una granulometría adecuada: el tamaño máximo del árido, la compactación y el contenido de granos finos. El tamaño máximo viene limitado por las dimensiones mínimas del elemento a construir o por la separación entre armaduras. En una mezcla de áridos una compactación elevada es aquella que deja pocos huecos en la mezcla. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más laborable. Las propiedades más apreciadas en los áridos se relacionan con su aspecto físico-mecánico y con su comportamiento químico. En general se requiere un material pétreo que sea

químicamente inerte, resistente a los esfuerzos mecánicos, de buena adherencia y que su distribución granulométrica satisfaga las exigencias establecidas para el conjunto (Díaz 2012).

Las especificaciones para los áridos se encuentran en la NC 251:2018 “Áridos para hormigones. Especificaciones”.

### **Los áridos y su influencia en el hormigón.**

Conocemos como árido o agregado pétreo a aquel material granulado empleado como refuerzo en el hormigón. En la elección de los mismos será fundamental tener en cuenta propiedades como la estructura de las partículas, la porosidad, la densidad, la resistencia, etc. Serán determinantes en el futuro comportamiento del hormigón en el inicial estado plástico y su posterior endurecido. Entre los agregados pétreos utilizados tenemos rocas de las tres clases conocidas (Magmáticas, Metamórficas y Sedimentarias) por lo que no resulta factible enunciar las propiedades correspondientes a cada una. Tendremos en cuenta de manera general la influencia de los agregados pétreos en las propiedades del hormigón endurecido y del hormigón fresco (Bernal 2012).

### **Influencia de los agregados pétreos en el hormigón fresco.**

Las propiedades más significativas alteradas tras la adición del refuerzo son las relacionadas con la manejabilidad de la mezcla. La absorción, el tamaño y la graduación (a mayor superficie de agregado, mayor mortero necesario y menor fluidez) son algunas de las propiedades de la misma. La adición de cemento puede conllevar una adición de agua para mantener la proporción mortero – agua necesaria; y estructuras cristalinas como la tubular pueden reducir sensiblemente la trabajabilidad de la mezcla. El grosor de los granos añadidos debe también ser tenida en cuenta y se regula mediante el módulo de finura (MF) que se encuentra normalizado. Para evaluar la mezcla obtenida debemos analizar las siguientes propiedades (Bernal 2012).

- Consistencia: Capacidad de deformación.
- Ductilidad: Capacidad de deformación sin rotura.
- Homogeneidad: La masa específica nos informa sobre la uniformidad del material, y por consiguiente de sus propiedades.

- Masa específica: Relación entre la masa de hormigón y volumen ocupado. Es una medida de la eficacia del método de compactación empleado.
- Tiempo abierto: Periodo que transcurre entre el amasado y el inicio del fraguado. Define el tiempo en el que podemos modelar el hormigón sin que sus propiedades se vean reducidas.

### **Influencia de los agregados pétreos en el hormigón endurecido.**

Las propiedades a estudio, tras el endurecimiento del material están fundamentalmente referidas a la resistencia del material obtenido. Las propiedades fundamentales en el análisis del hormigón obtenido y que nos permiten definir sus características son:

- Resistencia: Capacidad de soportar esfuerzos de compresión, tracción y desgaste. La resistencia a compresión se perfila como la más notoria de las propiedades del hormigón.
- Densidad: Relación entre la masa del hormigón y el volumen ocupado (generalmente a mayor densidad mayor resistencia).
- Compacidad: Capacidad de obtener la máxima densidad que los materiales empleados permiten. A mayor compacidad menor número de huecos y poros. Esto se traduce en una mayor resistencia debido a que estos puntos suelen ser la fuente de la mayoría de las grietas.
- Permeabilidad: Directamente proporcional de la relación cemento – agua; mide el grado de accesos de los fluidos al hormigón. Una mayor permeabilidad implicara una mayor exposición del hormigón ante potenciales agentes agresores.
- Dureza: Resistencia a la deformación ante esfuerzos superficiales.
- Retracción: Reducción del volumen debido a la evaporación del agua del cemento.
- Por último, debemos tener en cuenta la influencia de los agregados pétreos en la interface, es decir en la superficie de contacto matriz - refuerzo y que son fundamentalmente dependientes de propiedades estructurales de los áridos. También en el módulo elástico (mide la capacidad de un material de recuperar su forma inicial tras la aplicación de un esfuerzo) que también depende de las morfología de las partículas del material empleado.

Distintas mezclas permitirán obtener una gran variedad de hormigones con propiedades adecuadas al uso que se les pretende dar (Bernal 2012).

#### **1.2.4 Aditivos.**

Los aditivos son aquellos productos que introducidos en el hormigón permiten modificar sus propiedades en una forma susceptible de ser prevista y controlada. Productos que, agregados en pequeña proporción en pastas, morteros y hormigones en el momento de su fabricación, mejoran o modifican una o varias de sus propiedades (Fernández 2014). Aun cuando los aditivos son un componente eventual del hormigón, existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables. De esta manera su uso estará condicionado por:

- a) Que se obtenga el resultado deseado sin tener que variar sustancialmente la dosificación básica.
- b) Que el producto no tenga efectos negativos en otras propiedades del hormigón.
- c) Que un análisis de costo justifique su empleo.

Algunas de las razones para el uso de aditivos en el hormigón pueden ser:

- Reducir sus costos de producción.
- Ser el único medio factible para alcanzar las características deseadas en la mezcla.
- Beneficiar las características y propiedades del hormigón endurecido.
- Mejorar entre otras propiedades la trabajabilidad y el manejo de la mezcla.

#### **Principales aditivos, propiedades y campo de aplicación.**

En la tabla 1 se señalan los principales aditivos, sus dosis, las propiedades que confieren al hormigón, las aplicaciones recomendadas (Fernández 2014).

Tabla 1.1: Principales aditivos.

<i>Aditivo y dosis usual</i>	<i>Propiedad que confiere al hormigón</i>	<i>Aplicaciones recomendadas</i>
<p><u><i>Incorporador de Aire</i></u>  <i>0.03% a 0.05% del peso del cemento</i></p>	<p><i>Incorpora microporos al hormigón produciendo:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>– Resistencia al hielo-deshielo.</i></li> <li><i>– Mayor docilidad</i></li> <li><i>– Menor permeabilidad</i></li> <li><i>– Eventual exudación</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>– Protección al hielo-deshielo.</i></li> <li><i>– Pavimentos.</i></li> <li><i>– Protección contra agentes químicos.</i></li> </ul>
<p><u><i>Plastificantes o reductores de agua</i></u>  <i>0.1% a 0.4% del peso del cemento</i></p>	<p><i>Mejorar la lubricación entre partículas, obteniéndose:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><i>– Mayor docilidad con agua constante.</i></li> <li><i>– Menor cantidad de agua para docilidad constante.</i></li> <li><i>– Mayor facilidad de colocación y compactación.</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>– Hormigones bombeados y premezclado.</i></li> <li><i>– Hormigonado de elementos estrechos o prefabricados.</i></li> <li><i>– Hormigones de alta resistencia.</i></li> </ul>



<p><u>Fluidificantes</u></p> <p>Para aumentar docilidad 0.5% a 1.0% del peso del cemento.</p> <p>Para reducir agua a 1.0% A 3.0% del peso del cemento.</p>	<p>Aumentan fuertemente la docilidad, permitiendo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Reducir el agua de amasado para docilidad constante, con alto incremento de resistencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hormigonado de piezas estrechas y difícilmente accesibles.</li> <li>– Hormigonado en tiempo caluroso.</li> <li>– Hormigones bombeados.</li> <li>– Hormigones de alta resistencia.</li> <li>– Hormigones para prefabricados.</li> <li>– Reparaciones.</li> </ul>
<p><u>Superplastificante</u></p> <p>Las dosis dependiendo del fabricante fluctúan desde 0.5% a 2% del peso del cemento.</p> <p>Aumentan las resistencias como reductores de agua, y como fluidificantes, aumentan la docilidad.</p>	<p>En general, actúan como reductores de agua o fluidificantes otorgando:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Consistencia fluida sin disminución de resistencias.</li> <li>– Calidad homogénea, mínima segregación y exudación.</li> <li>– Disminución de retracciones y fisuración.</li> <li>– Facilidad de colocación y mayor rendimiento de la faena de hormigonado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Hormigón bombeado.</li> <li>– Hormigón pretensado.</li> <li>– Hormigón alta resistencia.</li> <li>– Hormigón de buena terminación.</li> <li>– Hormigón bajo agua.</li> <li>– Morteros y lechadas de inyección.</li> <li>– Hormigón para elementos esbeltos, con alta densidad de armaduras.</li> </ul>

Fuente: Tomado de “Los Aditivos” de Manuel Fernández Canovas.

### **1.3 Propiedades del Hormigón.**

Las propiedades del hormigón son sus características o cualidades básicas. Las cuatro propiedades principales del hormigón son: trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad. (ASOCEM 2015).

Las características del hormigón pueden variar en un grado considerable, mediante el control de sus ingredientes. Por tanto, para una estructura específica, resulta económico utilizar un hormigón que tenga las características exactas necesarias, aunque esté débil en otras.

- **Trabajabilidad.** Es una propiedad importante para muchas aplicaciones del hormigón. En esencia, es la facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.
- **Durabilidad.** El hormigón debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en el servicio.
- **Impermeabilidad.** Es una importante propiedad del hormigón que puede mejorarse, con frecuencia, reduciendo la cantidad de agua en la mezcla.
- **Resistencia.** Es una propiedad del hormigón que, casi siempre, es motivo de preocupación. Por lo general se determina por la resistencia final de una probeta en compresión. Como el hormigón suele aumentar su resistencia en un período largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad (CCEN 2015).

### **1.4 Factores que influyen en la resistencia del hormigón.**

Dentro de los principales factores están (Sepulveda, 2013).

La relación agua-cemento

- Las características de los áridos
- Cantidad y tipo de cemento
- El curado
- El tipo de aditivos
- La velocidad del viento
- La temperatura
- La radiación solar

- La tecnología con que se cuenta
- La forma de aplicación de la carga

### **1.5 Factores que influyen en la porosidad del hormigón.**

Dentro de los principales factores que influyen en la absorción capilar del hormigón están Howland (2013).

- Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón
- Tipo y contenido de cemento utilizado
- Relación agua cemento (a/c)
- Régimen de curado del hormigón
- Edad y resistencia del hormigón
- Compactación
- Agresiones

### **1.6 Factores que influyen en la sorptividad del hormigón.**

Dentro de los factores que influyen en la capacidad de absorción o sorptividad del hormigón están: la estructura de poros del hormigón y su estado de humedad. La estructura de poros del hormigón depende de una variedad de factores tales como el diseño de mezcla del hormigón (relación a/c, contenido de cemento, tipos de agregado y su granulometría), el régimen de curado, la uniformidad y la compactación. La humedad del hormigón depende de las condiciones del entorno y la estructura de poros (Nasco 2016).

### **1.7 Factores de los cuales dependen las propiedades del hormigón.**

Las propiedades mencionadas anteriormente en el epígrafe (1.2) dependen de las materias primas y de la tecnología asociada al trabajo con el hormigón. Además de cumplir con estas, el hormigón debe garantizar que este cumpla con los rendimientos de cemento establecidos por el Ministerio de la Construcción. Para obtener dichos rendimientos se hace necesario el análisis de tres factores que influyen directamente sobre los consumos de cemento y por tanto varían considerablemente los rendimientos; estos factores son:

1. La tecnología con que se cuenta para elaborar el hormigón.

2. Diseño de la mezcla de hormigón.
3. El tipo de aditivo que se utiliza en la mezcla.

### **1.7.1 Diseño de la mezcla de hormigón.**

El proceso de dosificación consiste en definir el contenido de los componentes, para la posterior fabricación de un hormigón, con el objetivo de que la mezcla sea manejable (dócil), durante la puesta en obra, y el producto resultante sea resistente y compacto.

En la fase inicial se analizan los componentes para determinar su idoneidad y se obtienen los parámetros identificativos de tamaño y granulometría de los áridos a utilizar (Imbaquingo 2012).

Datos de partida – Dosificación-Objetivo- Hormigón resistente y compacto

#### **Tipos de diseños de mezcla.**

Cuando se acomete el proceso de dosificación de un hormigón, se puede optar por un procedimiento genérico, rápido y poco preciso, que llamamos aproximada, o bien, por otro más elaborado y ajustado a las características específicas de los componentes y la obra, que es la dosificación técnica (Imbaquingo 2012).

1. Dosificación aproximada: Es la que se obtiene a partir de tablas y ábacos establecidos para obtener una resistencia determinada, en función del tipo de árido, del tipo de cemento y del tamaño máximo de árido. Se trata de una dosificación poco precisa, al no analizar los áridos a utilizar.
2. Dosificación técnica: En esta, se calculan las proporciones de los componentes de una manera más precisa, analizando las características de los áridos, las condiciones de ejecución, el ambiente de exposición y la geometría de elementos de proyecto.

Los datos de partida para estudiar la dosificación son:

- \*Resistencia característica *fck*, que requiere el proyecto y se debe garantizar.
- \*Consistencia del hormigón: la especificada para el tipo de obra.
- \*Condiciones de ejecución, que dependen de los medios de puesta en obra.
- \*Tipo de cemento (Resistencia), según el tipo P-35.
- \*Tipos de áridos y origen: (silíceo ó calizo, machacado o rodado).
- \*Granulometría de los áridos: (curva granulométrica, Módulo granulométrico).
- \*Tamaño máximo del árido: valor de D para la grava (tamiz que pasa el 90%).

## **Diseño de mezclas de hormigón de peso normal.**

El proporcionamiento de mezclas de hormigón, más comúnmente llamado diseño de mezclas es un proceso que consiste de pasos dependientes entre sí:

- a) Selección de los ingredientes convenientes (cemento, agregados, agua y aditivos).
- b) Determinación de sus cantidades relativas “proporcionamiento” para producir, tan económico como sea posible, un hormigón de trabajabilidad, resistencia a compresión y durabilidad apropiada.

Estas proporciones dependerán de cada ingrediente en particular los cuales a su vez dependerán de la aplicación particular del hormigón. También podrían ser considerados otros criterios, tales como minimizar la contracción y el asentamiento o ambientes químicos especiales.

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 hormigón, 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 hormigón también serán satisfactorias (excepto la resistencia al congelamiento y deshielo u otros problemas de durabilidad tales como resistencia al ataque químico). Sin embargo será de mucha utilidad revisar, en más detalle, las consideraciones básicas de diseño (Huanca 2006).

### **Consideraciones básicas.**

Según Huanca (2006) hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones en los diseños de mezcla:

#### **➤ Economía.**

El costo del hormigón es la suma del costo de los materiales, de la mano de obra empleada y el equipamiento. Sin embargo excepto para algunos hormigones especiales, el costo de la mano de obra y el equipamiento son muy independientes del tipo y calidad del hormigón producido. Por lo tanto los costos de los materiales son los más importantes y los que se deben tomar en cuenta para comparar mezclas diferentes. Debido a que el cemento es más costoso que los agregados, es claro que minimizar el contenido del

cemento en el hormigón es el factor más importante para reducir el costo del hormigón. En general, esto puede ser echo del siguiente modo:

- Utilizando el menor slump que permita una adecuada colocación.
- Utilizando el mayor tamaño máximo del agregado.
- Utilizando una relación óptima del agregado grueso al agregado fino.
- Y cuando sea necesario utilizando un aditivo conveniente.

Es necesario además señalar que en adición al costo, hay otros beneficios relacionados con un bajo contenido de cemento. En general, las contracciones serán reducidas y habrá menor calor de hidratación. Por otra parte un muy bajo contenido de cemento, disminuirá la resistencia temprana del hormigón y la uniformidad del hormigón será una consideración crítica. La economía de un diseño de mezcla en particular también debería tener en cuenta el grado de control de calidad que se espera en obra. Debido a la variabilidad inherente del hormigón, la resistencia promedio del hormigón producido debe ser más alta que la resistencia a compresión mínima especificada. Al menos en pequeñas obras, podría ser más barato “sobrediseñar” el hormigón que implementar el extenso control de calidad que requeriría un hormigón con una mejor relación costo – eficiencia.

#### ➤ **Trabajabilidad.**

Claramente un hormigón apropiadamente diseñado debe permitir ser colocado y compactado apropiadamente con el equipamiento disponible. El acabado que permite el hormigón debe ser el requerido y la segregación y sangrado deben ser minimizados. Como regla general el hormigón debe ser suministrado con la trabajabilidad mínima que permita una adecuada colocación. La cantidad de agua requerida por trabajabilidad dependerá principalmente de las características de los agregados en lugar de las características del cemento. Cuando la trabajabilidad debe ser mejorada, el rediseño de la mezcla debe consistir en incrementar la cantidad de mortero en lugar de incrementar simplemente el agua y los finos (cemento). Debido a esto es esencial una cooperación entre el diseñador y el constructor para asegurar una buena mezcla de hormigón. En algunos casos una menos mezcla económica podría ser la mejor solución. Y se deben prestar oídos sordos al frecuente pedido, en obra, de “más agua”.

### ➤ Resistencia y durabilidad

En general las especificaciones del hormigón requerirán una resistencia mínima a compresión. Estas especificaciones también podrían imponer limitaciones en la máxima relación agua/cemento ( $a/c$ ) y el contenido mínimo de cemento. Es importante asegurar que estos requisitos no sean mutuamente incompatibles.

No necesariamente la resistencia a compresión a 28 días será la más importante, debido a esto la resistencia a otras edades podría controlar el diseño.

Las especificaciones también podrían requerir que el hormigón cumpla ciertos requisitos de durabilidad, tales como resistencia al congelamiento y deshielo o ataque químico. Estas consideraciones podrían establecer limitaciones adicionales en la relación agua cemento ( $a/c$ ), el contenido de cemento y en adición podría requerir el uso de aditivos.

Entonces, el proceso de diseño de mezcla, envuelve cumplir con todos los requisitos antes vistos. Asimismo debido a que no todos los requerimientos pueden ser optimizados simultáneamente, es necesario compensar unos con otros; (por ejemplo puede ser mejor emplear una dosificación que para determinada cantidad de cemento no tiene la mayor resistencia a compresión pero que tiene una mayor trabajabilidad).

Finalmente debe ser recordado que incluso la mezcla perfecta no producirá un hormigón apropiado si no se lleva a cabo procedimientos apropiados de colocación, acabado y curado.

#### **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.

#### **1.8 Métodos para realizar los diseños de mezcla.**

Los principales métodos analíticos son:

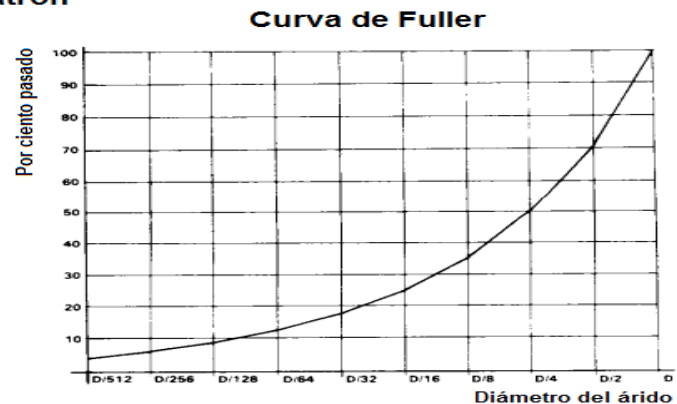
1. Fuller Thompson
2. Weymouth
3. Bolomey
4. Faury
5. Joisel
6. Vallete
7. Dreux

### 1.8.1 Método de Fuller-Thompson.

El método que se presentan en este numeral corresponde a las investigaciones de William B; Fuller Thompson, quienes seleccionaron una curva granulométrica continua para la composición óptima de los agregados en el hormigón. La dosificación por el método de Fuller está indicada para elementos no muy armadas, áridos redondeados, con un tamaño máximo de 70 mm y una masa mínima de cemento de  $300 \text{ kg/m}^3$ . La curva es de la forma  $Y=100(d/D)^{0.5}$ ; donde: D es el tamaño máximo del agregado total, y el porcentaje en peso de agregados que pasan a través del tamiz d (Giraldo & Bolívar 1987).

**Porcentajes fijos de la curva patrón de Fuller**

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



*Figura 1.3: Curva granulométrica de Fuller.*

#### Pasos según 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).



### 1.8.2 Método de Bolomey.

Este método gráfico, empleado para combinación de áridos gruesos y finos, parte de la determinación de una granulometría ideal de los áridos a mezclar y del ensayo granulométrico de éstos (Bolívar 1987). Según Bolomey, el por ciento ideal de material de una combinación que debe pasar por un determinado tamiz se calcula por:

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

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

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

D: Tamaño máximo del árido grueso, mm.

El método propuesto por Bolomey 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 sea redondeados o triturados.

El método está indicado para hormigones en masa, grandes macizos, presas, etc., debiéndose tantear con mucho cuidado la curva granulométrica y los porcentajes de finos, pues aquí interviene, también, el cemento utilizado.

### 1.8.3 Método de Faury.

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

La curva granulométrica ideal que conduce a la compacidad máxima del agregado (mínimo de huecos) es prácticamente un diagrama bilineal, distinguiéndose en el hormigón dos clases de agregados: los finos y medios cuyos tamaños son menores que la mitad del tamaño máximo de todos los agregados (menor que D/2), y los gruesos con tamaños mayores a D/2.

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

Donde:

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

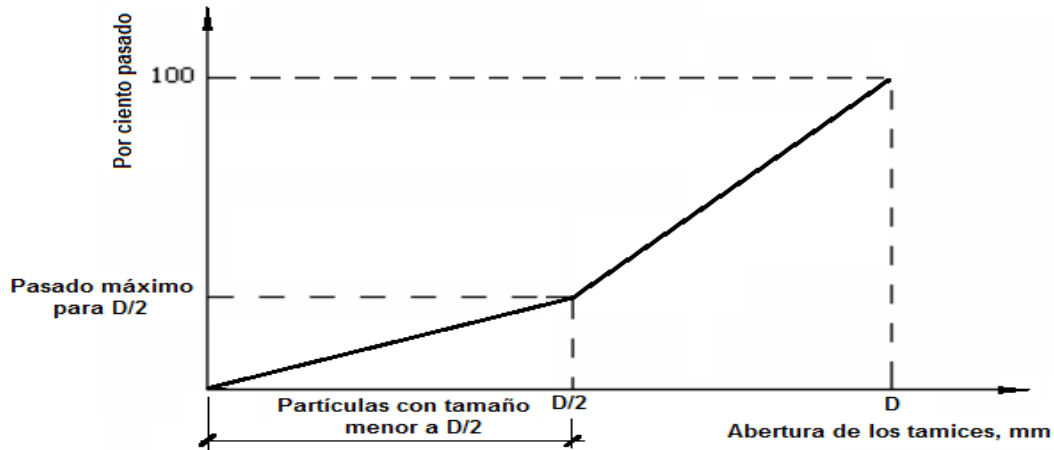


Figura 1.4: Curva granulométrica de referencia según Faury.

#### 1.8.4 Métodos de la ACI.

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.

#### Método de la ACI 211.1.

En el año 1991, el Instituto Americano del Hormigón (ACI) presentó, un método con resultados aceptables para hormigones con dos áridos, de masa unitaria entre los 2000 y 2500 kg/m<sup>2</sup> y con requisitos de resistencia menores a 42 MPa Este método práctico y experimental fue precisado posteriormente en el año 2002 y en la actualidad es el método de diseño de mezclas de hormigón referencia en el continente americano y en buena parte del mundo, conocido como ACI 211.1 “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete”.

El método A.C.I. es un método de dosificación para el diseño de mezclas de hormigón; se basa en medir los materiales (cemento, agua, grava y arena) en peso y volumen, y se diseña tanto para una mezcla en estado fresco como endurecido.

Pasos para realizar el diseño:

1. Elección del asentamiento.
2. Elección del tamaño máximo nominal (TMN).
3. Estimación del contenido de aire.
4. Estimación de la cantidad de agua.
5. Estimación de la relación agua cemento (a/c).
6. Cálculo del contenido de cemento.
7. Verificación granulométrica.

### **1.8.5 Método de O'Reilly.**

Tras un análisis profundo de los diferentes métodos de dosificación de concretos habitualmente utilizados (Bolomey, Fuller, Feret, ACI, etc.), el Doctor en Ciencias Técnicas Vitervo O'Reilly, observa un denominador común en todos ellos: la atención preferencial que prestan a la composición granulométrica de las partículas de agregados y la escasa consideración que merece la relativa a la forma de dichas partículas. Este planteamiento implica el cuestionamiento de los referidos métodos de dosificación, especialmente para producción de agregado con elevada proporción de fracciones geoméricamente inadecuada, en los que resulta decisivo el factor de, forma del material y no es de aplicación el modelo de referencia de la "curva granulométrica ideal". (Díaz 2007)

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

El Dr. O'Reilly incorporó nuevos conceptos y factores que los antiguos investigadores no tuvieron en cuenta, como son: determinación de características de áridos gruesos, la influencia de la consistencia de la masa del concreto en estado fresco y la determinación de una forma más exacta de la cantidad de agua de la mezcla.

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  $R_e$  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<sup>3</sup> de hormigón con un 2 o 3 % de aire atrapado.

## **1.9 Rendimiento del cemento.**

El consumo de cemento en la mezcla se determina a partir del rendimiento del cemento del lote. El 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.

Se define como el cociente de la resistencia a compresión del hormigón a la edad especificada, expresada en  $\text{kg/cm}^2$ , entre el consumo de cemento utilizado en su producción, expresado en  $\text{kg/m}^3$ .

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

Dónde:

- $f_{\text{cm}}$  : Resistencia media a la compresión,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .
- $f_{\text{ck}}$  : Resistencia característica a la compresión,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .
- $C$  : Consumo de cemento,  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

Para el diseño de mezcla en el laboratorio, la resistencia a la compresión del hormigón a utilizar es la media ( $f_{\text{cm}}$ ), 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 ( $f_{\text{ck}}$ ), que es la resistencia especificada en los proyectos.

El valor del rendimiento del cemento dependerá de la utilización de aditivos químicos reductores del agua de amasado en los hormigones (aditivos plastificantes).

### Indicadores de rendimiento del cemento.

*Tabla 1.2: Rendimiento del cemento a escala de laboratorio.*

<b>Tipo de hormigón</b>	<b>Rendimiento del cemento</b>	
	<b>Buena</b>	<b>Aceptable</b>
<i>Hormigones sin aditivos</i>	<i>0,75 o más</i>	<i>0,70 a 0,74</i>
<i>Hormigones con aditivos plastificantes (Hasta un 15 % de reducción del agua de amasado)</i>	<i>0,85 o más</i>	<i>0,80 a 0,84</i>
<i>Hormigones con aditivos superplastificantes (Hasta un 30 % de reducción del agua de</i>	<i>1,0 o más</i>	<i>0,90 a 0,99</i>

<i>amasado)</i>		
-----------------	--	--

*Tabla 1.3: Rendimiento del cemento en condiciones de explotación en el campo.*

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

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

## **1.10 Conclusiones parciales.**

1. El hormigón es el material compuesto por cemento, agregados y agua los cuales pueden variar sus propiedades dentro de las cuales se encuentran en estado fresco la consistencia, homogeneidad y en estado endurecido la resistencia, porosidad y sorptividad.
2. las propiedades que presentan los agregado van a influir en los resultados finales que tendrán los diseños de mezcla.
3. El rendimiento del cemento significa que por cada kilogramo de cemento utilizado que valor de resistencia se alcanzó y a su vez dependerá de los aditivos, los diseños de mezcla y la tecnología con que se cuenta.

## **Capítulo II:**

### **Materiales y métodos utilizados en los diseños de mezclas.**

Este capítulo tiene como objetivo describir los materiales y métodos utilizados en los diseños de mezcla para elaborar hormigón. Además se aplicó el método experimental, como parte de los métodos particulares empíricos de investigación científica para la descripción de los materiales.

#### **2.1 Diseño de experimento.**

La Unidad Básica de Servicios de Hormigón necesita disminuir el rendimiento de cemento, para ello se elaboró una propuesta de diseño de mezcla para la obtención de una resistencia del hormigón de 35 MPa y que cumpla con los requisitos de porosidad y sorptividad.

Con este objetivo se elaboraron dos hormigones hidráulicos con una resistencia característica de 35 MPa con áridos de la cantera A. Maceo en Matanzas y de la cantera de Arimao en Cienfuegos, cemento a granel P-350 procedente de la planta Carlos Marx de la provincia de Cienfuegos y agua. Se decidió resolver esta investigación por medio de la vía experimental debido a que se puede planificar de la forma más racional posible, de manera que los datos obtenidos puedan ser procesados adecuadamente y que mediante un análisis objetivo conduzcan a deducciones aceptables del problema planteado, que es precisamente lo que se desea.

Indudablemente que los métodos experimentales son más rápidos, económicos, simples, precisos y posibles (Vargas 2017).

El objetivo del experimento es determinar si se puede obtener un diseño de mezcla que optimice los rendimientos, además de describir los materiales que serán utilizados en los diseños para obtener un hormigón que cumpla con los requisitos de durabilidad planteados en la NC 120:2018.

Las variables de investigación son las siguientes:

- I. Resistencia característica del hormigón a los 7 y 28 días
- II. La porosidad
- III. La sorptividad

Como rendimiento se define los diseños de mezcla utilizados, para ello se diseñaron dos mezclas cuyas proporciones se encuentra a continuación en las tabla 2.1.

La resistencia para la que se ha diseñado es de 35 MPa, se cuenta con un agregado grueso de tamaño de 10-20 mm, un módulo de finura de la arena de 2,93 y se utilizó con una relación agua-cemento de 0,40. El diseño de mezcla por el método A.C.I. 211.1 para hormigón normal, para 1 m<sup>3</sup> de hormigón en una zona de agresividad muy alta, arrojó como resultado:

*Tabla 2.1: Materiales secos.*

<i><b>Materiales secos</b></i>	<i><b>Peso inicial de los materiales de la empresa (Kg)</b></i>	<i><b>Peso de los materiales utilizados en el diseño uno</b></i>
<i>Agua</i>	176	176
<i>Cemento Portland (P-35)</i>	450	440
<i>Arena (Cantera Arimao)</i>	940	286
<i>Arena (Cantera A. Maceo)</i>	0	736
<i>Gravilla 25-10mm (Cantera A. Maceo)</i>	670	654
<i>Granito 10-5mm (Cantera A. Maceo)</i>	280	280
<i>Aditivo Sikaplas 9100, cu</i>	3,2	3,1
<i>Total</i>	2519,2	2575,1

*Fuente: Elaborada por el autor.*



Los tres factores que se van a analizar van a ser la resistencia a compresión, la porosidad y la sorptividad. La resistencia se dará en MPa, La porosidad en por ciento y la sorptividad en  $m/s^{1/2}$ .

Para escoger el diseño de mezcla más indicado para el experimento se compararán los valores de resistencia, porosidad y sorptividad con la NC 120:20018 y se escogerá de los dos diseños el de menor contenido de cemento.

## **2.2 Caracterización de los materiales.**

### **2.2.1 Agua.**

El agua que se utilizó en la elaboración de la mezcla, se verificó que fuese potable, libre de cualquier materia o sustancias que pudiesen afectar el hormigón. Sus funciones principales fueron la de hidratar el cemento y para mejorar la laborabilidad de la mezcla. Se agregó durante la elaboración de la mezcla en pequeñas cantidades cuidando que no se viese afectada la relación agua-cemento. Para la obtención del valor del agua se utilizó valores aproximados de diseños anteriores.

### **2.2.2 Cemento.**

En la caracterización del cemento se empleó la NC 95:2017 “Cemento Portland. Especificaciones”. El cemento utilizado es Portland P-35 procedente de la planta Carlos Marx de la provincia de Cienfuegos.

## **Determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado por aguja Vicat.**

### **Fundamentos del método.**

El método de ensayo consiste en la determinación de la consistencia normal y el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante la aguja Vicat. Con este método se determinó la cantidad de agua requerida para preparar la pasta de cemento hidráulico a ensayar. La norma que se utilizó para el procedimiento fue NC 524: 2015.

### **Preparación de la muestra.**

El procedimiento consistió en:

- ✚ Se colocó en la amasadora la paleta y el recipiente, bien secos en la posición como para mezclar.
- ✚ Se puso toda el agua destilada de la mezcla en el recipiente.
- ✚ Se le añadieron 650 g de cemento al agua y se dejó que absorbiera esta durante 30s.
- ✚ Luego se mezcló en velocidad lenta (140 rpm) por 30 s.
- ✚ Se detuvo la amasadora después de este tiempo por 15 s, y durante este tiempo se raspó con la espátula, de modo que cualquier cantidad de pasta que quedó en las paredes del recipiente se pudo incorporar a la mezcla.
- ✚ Se mezcló de nuevo a velocidad rápida (285 rpm) por 1 min.
- ✚ Rápidamente se formó una bola de la pasta de cemento con las manos enguantadas, se lanzó 6 veces de una mano a la otra hasta que se produjo una masa esférica que pudo ser introducida fácilmente en el anillo Vicat, por la parte más ancha sin demasiada manipulación. Luego se colocó el anillo por su base mayor y se enrasó la pasta sin presionar la misma.

#### **Procedimiento para determinar la consistencia.**

Rápidamente después se centró la pasta confinada en el anillo, que descansa en el plato, bajo la barra. El extremo sumergible se puso en contacto con la superficie de la pasta y se apretó el tornillo de fijación, se fijó el indicador movable en una lectura inicial y se liberó rápidamente la barra.

#### **Procedimiento para determinar el tiempo de fraguado.**

Se mantuvo la muestra en la cámara o local húmedo durante 30 min después del moldeo sin perturbarla, luego se determinó la penetración de la aguja de 1 mm en ese momento y cada 15 min posteriores hasta que se obtuvo una penetración de 25 mm o menos (este es el tiempo de fraguado inicial). El tiempo de fraguado final se determinó cuando la aguja no se hundió visiblemente dentro de la pasta.

### **2.2.3 Árido grueso.**

Los áridos influyen enormemente en las propiedades del hormigón. Estos provinieron de las canteras Antonio Maceo en Matanzas para el árido grueso y para el fino de la cantera de Arimao en Cienfuegos; cuyas características principales se muestran a continuación:

### **2.2.3.1 Propiedades geométricas del árido.**

#### **Determinación de la granulometría.**

##### **Fundamentos del método.**

El procedimiento consiste en la determinación de las fracciones granulométricas de la arena de las canteras Arimao y Antonio Maceo por medio de un tamizado mecánico garantizando la continuidad del movimiento de la muestra sobre la superficie del tamiz, como indica la norma NC 178: 2002.

##### **Preparación de la muestra.**

La muestra se determinó por el sistema de cuarteo de una muestra representativa del material a ensayar, en este caso arena de las canteras Arimao y Antonio Maceo.

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 g como lo indica el análisis granulométrico en la Tabla 2 de la norma NC 178: 2002.

##### **Procedimiento para determinar la granulometría.**

Seguido de sacar la muestra de la estufa se dejó enfriar a temperatura ambiente. La arena, definida como las partículas de dimensión 4,76 hasta 0,074 mm, se le realizó un proceso de tamizado, en el cual se utilizó una serie de tamices de igual apertura que su granulometría. Los tamices que se usaron fueron los de malla cuadrada de la serie ASTM que van desde el N°4 – 4.76 mm hasta el N°200 – 0,074 mm, siendo la apertura de cada tamiz el doble de la siguiente y mitad del anterior.

El tamizado se realizó en una tamizadora manual la cual sometió a las partículas del material ensayado a un movimiento lateral y vertical del tamiz, este movimiento también incluye la acción de sacudida. La muestra se movió continuamente sobre la superficie del tamiz.

Una vez tamizada la muestra se procedió a pesar el material retenido en cada tamiz por medio de la balanza, cada cantidad de material retenido en los tamices cumplió las especificaciones granulométricas de la norma NC 657: 2008 y NC 251: 2018.

## **Determinación del material más fino que el tamiz (No. 200).**

### **Fundamentos del método.**

El ensayo consistió en lavar el material a ensayar en reiteradas ocasiones hasta que el agua quede limpia y tamizar al mismo tiempo las partículas finas que pasan por el tamiz N°200 - 0,074 mm existentes en los áridos, como lo indica NC 181: 2002.

### **Preparación de la muestra.**

La muestra se tomó con suficiente humedad para evitar la segregación y pérdida de las partículas finas del agregado pétreo. Se secó en la estufa a peso constante por 24 horas a una temperatura constante entre los 105 °C y 110 °C.

Se le realizó el sistema de cuarteo de una muestra representativa del material a ensayar, en este caso, arena de la cantera Arimao. El peso de la muestra seca en la estufa a peso constante a una temperatura de 105 a 110 °C fue de 500 g como lo indica la Tabla 1 de la norma NC 181: 2002 determinación del material más fino que el tamiz de N°.200- 0,074 mm.

### **Procedimiento.**

La muestra después de enfriarse a temperatura ambiente se colocó en un recipiente con agua potable hasta cubrirla totalmente para proceder a mezclarla y agitarla con cuidado de que no se produzcan pérdidas del árido ni de agua.

Una vez que se agitó la solución, las partículas finas se suspenden en la superficie del recipiente, acto seguido se vertió el contenido en el tamiz N°200 desechando cualquier partícula del material menor que 0,074 mm.

El procedimiento de lavado se repitió varias veces hasta que el agua en el recipiente estuvo totalmente limpia y transparente. Después de lavado el material retenido en el tamiz N°200 se secó en la estufa a peso constante durante 24 horas a temperatura entre los 105 y 110 °C.

### **Expresión de los resultados.**

La muestra inicial secada fue de 500 g, cuando se le realizó el proceso de lavado y tamizado se volvió a pesar, se determinó la diferencia de peso entre las dos fases de la muestra, se dividió entre el total y se multiplicó por cien. Se obtuvo el porcentaje de fino en la muestra cómo se expresa en la fórmula siguiente:

$$Pf = \left( \frac{a - b}{a} \right) \times 100 \quad (2.1)$$

**Leyenda:**

- Pf: Porcentaje de material que pasa por el tamiz de 0,074 mm (N°200).
- a: Peso de la muestra original seca.
- b: Peso de la muestra seca después de lavada.

**2.2.3.2 Propiedades físicas del árido.****Pesos específicos y absorción de agua.****Fundamentación del método.**

Se obtienen los pesos específicos y la absorción de agua por medio del pesaje de la arena en estado seco y saturado en agua como indica la norma NC 186: 2002.

**Preparación de la muestra.**

Se obtuvo mediante el sistema de cuarteo una muestra representativa de 1 000 g. Se secó en la estufa a una temperatura mantenida de 105 a 110 °C hasta peso constante durante 24 horas, se sumergió en agua y se dejó por un período de otras 24 horas.

Se extendió la muestra en una superficie plana con el objetivo de disecar la superficie de la partícula por medio de una plancha metálica caliente moderadamente, mientras se zarandeó para que la disecación sea uniforme.

Esta disecación de la arena se le realizó hasta que las partículas fluyeron libremente sin adherirse unas con otras. Para garantizar que no se adhirieran las partículas, se llenó el molde cónico, ligeramente se apisonó 25 veces con la varilla de compactación y se levantó el molde verticalmente. Se comprobó que la primera vez las partículas se adhirieron entre sí, manteniendo el cono su forma original. Se le siguió realizando el proceso de secado hasta que se volvió a ejecutar la prueba y las partículas se desmoronaron suavemente, dando señal de que se secó superficialmente.

**Procedimiento.**

Se vertió la muestra preparada en un frasco de 500 mL y se le añadió agua destilada hasta la marca de enrase. Para que se expulsaran todas las burbujas de aire en el interior del grano se sometió la muestra a un baño de María y se mantuvo en ebullición por 2 horas aproximadamente.

Seguidamente se enfrió la muestra a temperatura ambiente en agua por 1 hora aproximadamente, transcurrido el tiempo se le añadió agua destilada hasta alcanzar la marca de enrase y se determinó el peso total en la balanza.

La muestra se sacó del recipiente y se secó a peso constante en la estufa a una temperatura mantenida de 105 a 110°C, luego se dejó enfriar a temperatura ambiente y se pesó en la balanza.

**Expresión de los resultados.**

$$PEC = \frac{A}{C + B + C_1} \quad (2.2)$$

**Leyenda:**

- PEC: Peso específico corriente. El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen los poros accesibles al agua y los no accesibles.
- 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.

$$PES = \frac{B}{C + B - C_1} \quad (2.3)$$

**Leyenda:**

- PES: 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.
- C: Peso en gramos del frasco lleno con agua.
- B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca.

$$PEA = \frac{A}{C + A + C_1} \quad (2.4)$$

**Leyenda:**

- PEA: Peso específico aparente. El peso específico de las partículas desecadas incluyendo en el volumen sólo los poros inaccesibles al agua.
- 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.

$$\%ABS = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (2.5)$$

**Leyenda:**

- %ABS: Porcentaje de absorción de agua.
- A: Peso en gramos de la muestra secada en la estufa.
- B: Peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca.

**Determinación de los pesos volumétricos y porcentaje de vacío.**

**Fundamentación del método.**

La determinación del peso volumétrico se realizó mediante pesadas del material con un recipiente calibrado de volumen conocido, según la norma NC 181: 2002.

**Preparación de la muestra de arena.**

La muestra se secó en la estufa hasta peso constante a una temperatura mantenida de 105-110 °C por 24 horas.

**Procedimiento para determinar los pesos volumétrico, compactado y suelto.**

✓ **Determinación del peso compactado.**

El recipiente se llenó en tres capas a una altura no mayor de 50 mm para evitar la segregación de las partículas y en cada una se golpeó 25 veces con la varilla de compactación.

Los golpes fueron esparcidos uniformemente en el interior de la superficie del recipiente y la compactación en las capas solo fueron del espesor de la misma en cada una de las capas correspondientes. Después se enrasó la superficie con la misma varilla de compactación en un solo movimiento acelerado.

✓ **Determinación del peso suelto.**

Se llenó el recipiente hasta el colmo utilizando una cuchara a una altura no mayor de 50 mm para evitar la segregación de las partículas. Luego se enrasó la superficie con la varilla de compactación sin que se hiciera girar la misma.

**Expresión de los resultados.**

Se obtuvo mediante el pesado: el PMS (peso del material suelto) y el PMC (peso del material compacto). Para obtener el peso volumétrico (suelto y compacto) se le sustrae a

los PMS y PMC la tara del recipiente que es de 2583 g y se divide por el volumen conocido del recipiente calibrado que es de 2900 mL a 23.5 °C.

### **Determinación del porcentaje de vacíos según NC 177: 2002.**

$$\%PV = \frac{PEC - PUC}{PEC} \times 100 (2.6)$$

#### **Leyenda:**

- PV= Porcentaje de vacíos
- PEC= Peso específico corriente
- PUC= Peso unitario compacto.

### **2.2.3.3 Propiedades químicas de los áridos.**

#### **Determinación del porcentaje de partículas de arcilla.**

##### **Fundamentos del método.**

El ensayo consistió en determinar las propiedades de absorción de las arcillas y su consiguiente efecto de colorante sobre las soluciones acuosas de Azul de Metileno; es decir se evalúa de forma cuantitativa la presencia de arcilla en los áridos finos de la fracción de 0–0,2 mm.

##### **Preparación de la muestra.**

La muestra que se tomó fue superior a 200 g de acuerdo con la norma NC 885: 2012, la cual se mantuvo húmeda durante su almacenamiento para así evitar la segregación del agregado fino que se desea evaluar.

Antes de ser ensayada fue secada en estufa una sub muestra de 200 g de la fracción granulométrica de 0–2 mm, hasta peso constante a una temperatura de 105 a 110 °C.

Una vez que estuvo seca la sub muestra se tamizó a través del tamiz de 2 mm, rechazando lo que quede por encima.

Posteriormente se pesó la muestra y se anotó su masa, conservándola en el secador.

##### **Procedimiento de ensayo**

- Se preparó la solución indicadora de Azul de Metileno.
- Se clasificó la muestra de árido fino pasado por el tamiz 200 (75 μ) y se secó en estufa.



- Se pesó 200 g de la muestra y se secó nuevamente en estufa. Se mezcló, la muestra seca de 200 g con 500 mL de agua, en un beaker hasta lograr su homogeneidad durante 5 minutos.
- Se conectó a la mezcladora una bureta con 100 mL de la solución normal de Azul de Metileno, introduciendo dentro del beaker, con la muestra de árido fino pasado por el tamiz 200.
- Se añadió el Azul de Metileno de 5 en 5 mL goteando progresivamente las variaciones sobre un papel de filtro para determinar la saturación de la muestra y valorar el resultado del ensayo.

### **Expresión de los resultados.**

El valor de Azul de Metileno es expresado en gramos de colorante por 1 000 gramos de la fracción granulométrica analizada 0–2 mm y se calculó con la siguiente expresión:

$$MB = \frac{V}{M} \times 10(2.8)$$

MB: Valor de Azul de Metileno, expresado en g/1000 g de muestra

V: Volumen total de la solución de Azul de Metileno añadido, mL.

M: Masa de la muestra, g.

Nota: El valor 10 de la fórmula es la concentración de Azul de Metileno y tiene dimensión (g/L).

### **2.2.3.4 Propiedades mecánicas del árido.**

#### **Áridos gruesos. Determinación del índice de triturabilidad.**

El índice de Triturabilidad se rige por la NC 190:2002.

#### **Fundamentos 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 0 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 muestreo se realizará según se establece en la NC 54- 029.

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 será secada en la estufa durante un tiempo no mayor de 24 horas y a un intervalo de temperatura de 105- 110 °c. Concluido el secado, la muestra se enfriará a la temperatura ambiente del laboratorio.

**Procedimiento**

Preparación de la porción de ensayo.

De la muestra de árido grueso a ensayar que se tamizó, secó y enfrió se toma una porción no menor de 6 kg, ésta 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, se dejó caer el material desde una altura de 50 mm, compactando uniformemente la superficie de cada capa con la varilla de compactación. Esta acción se hizo dejando deslizar la varilla entre los dedos de la mano, la cual cayó por su propio peso. Posteriormente se niveló la superficie de manera tal que la misma quede a 15 mm del borde superior del cilindro. De no cumplirse esto, se procede a añadir o quitar partículas de la porción de árido grueso a ensayar hasta alcanzar la altura requerida.

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 sostiene, 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 caigan sobre la bandeja. El resto de las partículas y el polvo adherido al fondo del pistón y a las paredes interiores del cilindro serán desprendidos 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. El tamizado fue interrumpido cuando durante un tiempo aproximado de un minuto, no pase más del 1 % de la masa del árido grueso triturado.

### **Expresión de los resultados**

Método de cálculo:

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

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

Donde:

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

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

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

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

Donde:

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

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

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

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

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

$$ITM = \frac{SITF_n * M_n}{100} \quad (2.11)$$

Dónde:

SITFn – Índice de triturabilidad de cada una de las fracciones de árido grueso que componen la mezcla.

Mn – Porcentaje de cada una de las fracciones de árido grueso que componen la mezcla.

### **Aproximación de los resultados**

Los resultados se aproximarán hasta las centésimas.

## **2.2.4 Aditivo**

En el hormigón elaborado en Unidad Básica de Servicios de Hormigón de Varadero se utilizó el aditivo denominado Sikaplas 9100, Superfluidificante, reductor de base acrílica modificada para hormigones. Este aditivo se aplica en la elaboración de hormigones hidráulicos para la obtención de una alta laborabilidad sin exceso de agua, para aumentar las resistencias mecánicas y producir estos efectos simultáneamente.

Aunque en la entidad no se cuenta con las condiciones necesarias para la realización de los ensayos de los aditivos, si se tiene la ficha técnica y se trabaja con los valores establecidos por la NC: 228-1.2005 Aditivos para hormigones, morteros y pastas.

Para la obtención de los valores del aditivo del diseño de mezcla se tomó un valor de 0,7% del peso total del cemento, obteniéndose así 3,1 kg de aditivo Sikaplas 9100.

## **2.3 Hormigón.**

### **2.3.1 Ensayo por el cono de Abrams.**

#### **Procedimiento**

El hormigón fresco se compactó en el molde en forma de cono truncado y se usó la NC 120:2018 . Cuando el cono se levanta, la distancia que el hormigón cayó verticalmente da

La medida de la consistencia de este. La prueba del asentamiento es aplicable a un rango de consistencia de hormigón que corresponde entre 10 mm y 210 mm. Fuera de este rango, la medida del asentamiento por este método no es el apropiado, en ese caso deben ser aplicados otros métodos para esta medición. No es posible, ni conveniente realizar el ensayo si el asentamiento continúa variando después de un minuto de retirado el cono.

### **Aparatos**

-Molde: Es el adecuado para conformar la muestra para el ensayo, será hecho de un metal que no reaccione con la pasta de cemento y con un espesor de chapa menor de 1.5 mm.

El molde puede hacerse sin o con una costura, pero su interior será liso y libre de protuberancias y dientes.

El molde tendrá forma del cono truncado hueco y tendrá las dimensiones internas siguientes:

-Diámetro de la base:  $200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

-Diámetro del extremo superior:  $100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

-Altura:  $300 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

La base y el extremo superior estarán abiertos, paralelos entre sí y formarán ángulos rectos con el eje del cono. El molde estará provisto en la superficie exterior y superior, de dos asas simétricas situadas a las dos terceras partes de la altura, para asir el molde, y en el fondo dos pedazos de aletas también simétricas una a cada lado para apoyar los pies. El molde se sujeta a la base para: que pueda ser llenado sin movimiento o sin causar interferencia en la caída del hormigón.

El molde se verificará visualmente cada vez que vaya a ser utilizado para asegurar que está limpio y no esté dañado, sucio o mellado. El cono se verificará anualmente para asegurar que sus dimensiones y condiciones permanecen dentro de sus tolerancias.

-Varilla de compactación: lisa, hecha de acero, de sección circular, con un diámetro de  $16 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ ,  $600 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$  de longitud, y con los extremos redondeados. La varilla puede ser extendida con un manipulador plástico, siempre que la longitud total no exceda los 1 000 mm. La varilla será verificada anualmente para asegurar que sus dimensiones y condiciones permanecen dentro de las tolerancias.

-Embudo: (optativo), hecho de un material no-absorbente y que no sea atacado por la pasta de cemento.

El embudo consistirá en dos conos truncados que tienen un diámetro común de 100 mm, y los extremos de diámetro mayor, un cono truncado para actuar como un embudo del relleno y el otro como un collar que permite su colocación en la superficie exterior del molde. El embudo se verificará para asegurar anualmente para asegurar que sus dimensiones y condiciones permanecen dentro de las tolerancias.

-Regla: graduada de 0 mm a 300 mm, con divisiones que no excedan de 5 mm y con el punto cero en un extremo de la regla.

-Placa o superficie base: placa u otra superficie lisa, rígida, plana, no absorbente en la cual se coloca el molde.

Cuchara de miniestra: de punta cuadrada.

-Bandeja de re-mezclado: de construcción rígida y hecha de un material no absorbente y que no sea atacado por la pasta de cemento. Tendrá las dimensiones apropiadas para que el hormigón pueda ser cuidadosamente re-mezclado con la cuchara de miniestra de punta cuadrada.

-Cucharán grande: con un ancho de aproximadamente 100 mm.

-Cronómetro u otro dispositivo similar medidor de tiempo que permita la medir hasta 1 s. El reloj estará adecuadamente calibrado en el momento del ensayo.

-Paño húmedo

### **Procedimiento**

Se humedeció el molde y la base plana. Luego se removió el agua excesiva de las superficies, usando un paño absorbente. Posteriormente se colocó el molde en la placa o superficie base. Durante el llenado, el molde será sostenido firmemente por el operador parado sobre las dos piezas del cono para apoyar los pies.

Inmediatamente después de obtener la muestra, se llenó el molde en tres capas, cada una, aproximadamente a un tercio de la altura del molde después de compactada. Cuando se agregó el hormigón, se aseguró de que esté uniformemente distribuido alrededor del molde. Se compactó cada capa con veinticinco golpes cada una con la varilla de compactación. Uniformemente se distribuyeron los golpes encima de la sección transversal de cada capa. Para la capa del fondo, fue necesario inclinar la varilla ligeramente moviéndola en espiral y hacia el centro. Se compactó la segunda capa y la última capa, cada una a la profundidad establecida, de manera tal que los golpes de la

varilla penetren ligeramente dentro de la capa subyacente. Después de llenado el molde y compactado la última capa se apiló el hormigón sobrante. Al llenar y compactar la capa superior se dejó que el hormigón sobresalga ligeramente del molde, añadiéndose más hormigón si fuera necesario.

Se aseguró que el hormigón adicionado no requiera de compactación extra. Después que la capa superior se compactó, se enrasó con la varilla de compactación por medio de un movimiento en forma de sierra y rodando la varilla por el borde superior del molde y se limpia el posible derrame que se pueda originar alrededor del cono. Luego se eliminó el hormigón de la base y se extrajo el molde en  $5 \pm 2$  s con un alzamiento firme sin que se produzcan movimientos laterales o de torsión.

El procedimiento de llenado del molde, compactación y extracción del molde se realizó sin interrupción en aproximadamente 180 s. Inmediatamente después que se extrajo el molde, se determinó el asentamiento,  $h$ , midiendo la diferencia entre la altura del molde y el centro o la altura media del hormigón descendido. Por último se midió a los 5 mm más cercanos.

### **Resultado del ensayo**

El ensayo sólo es válido si se obtiene un asentamiento verdadero, uniforme y simétrico, como se muestra en la Figura 2a). Si un espécimen se desprende o corta, como el mostrado en la Figura 2b), tome otra muestra y repita el procedimiento.

Registre el asentamiento,  $h$ , cuando se obtenga un descenso como el mostrado en la Figura 1 lo más cercano a 10 mm. Si dos ensayos consecutivos sobre una muestra de hormigón presentan desprendimientos de sus masas, es probable que el hormigón carezca de plasticidad y la cohesión necesaria para aplicar el ensayo de asentamiento usando el cono.

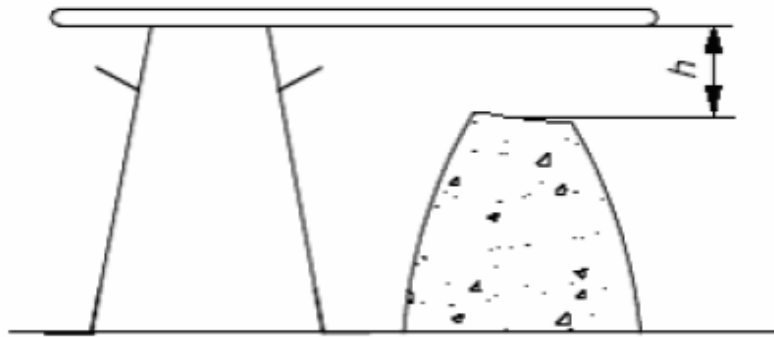


Figura 2.1: Medida del asentamiento.

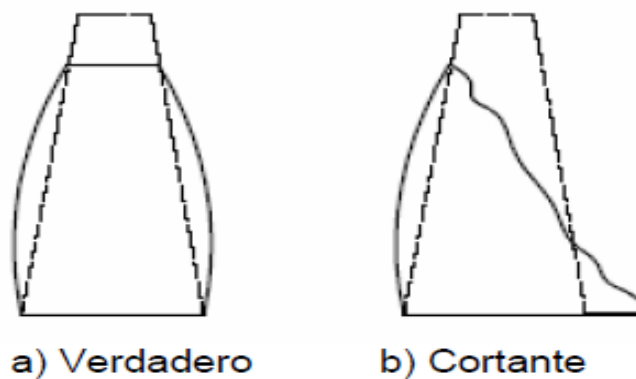


Figura 2.2: Formas de asentamiento.

Tabla 2.2: Tabla de asentamiento.

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

Fuente: Tomado de NC 174:2002.

### 2.3.2 Ensayo de resistencia a compresión del hormigón.

Se comenzó por realizar el ensayo de resistencia a compresión según plantea las normas NC 724: 2015 “Determinación de la resistencia a compresión”.

La probeta fijada por la norma cubana para la determinación de la resistencia a compresión es la cilíndrica de 150 X 300 mm.



## **Aparatos**

El ensayo se llevó a cabo empleando una prensa o máquina estándar de ensayo a compresión, la máquina estará calibrada y se verificará anualmente.

## **Procedimiento**

### **-Preparación y ubicación de las probetas**

Cuando las probetas sean curadas en agua, se les quitará la humedad en exceso de la superficie antes de colocarlas en la máquina de ensayo. El tiempo transcurrido entre la extracción de la probeta del cuarto o tanque de curado hasta que es ensayada será tan corto como sea posible y nunca más de 3 h. Durante el tiempo en que la probeta está fuera del cuarto o tanque de curado, se protegerá del secado, por ejemplo cubriéndola con un paño mojado.

Las superficies de los platos de la máquina de ensayo se limpiarán y se removerá cualquier material extraño sobre las mismas.

No utilice ningún tipo de relleno, al no ser las planchas auxiliares o bloques de espaciamiento entre la probeta y los platos de la máquina de ensayo.

La probeta se centrará en el plato inferior con una exactitud inferior al 1% del diámetro de las probetas cilíndricas.

Cuando se empleen medios físicos para asegurar el centrado de la probeta en los platos de la máquina de ensayo, estos medios estarán calibrados y tienen que cumplir los requisitos establecidos para la exactitud de centrado.

### **-Aplicación de la carga**

La carga se aplicará sin saltos bruscos y se incrementará continuamente a una velocidad constante hasta que no pueda ser sostenida una carga mayor. Seleccione una velocidad de aplicación de los esfuerzos no menor de 0,15 MPa/s y no mayor que 1,0 MPa/s. Cuando se emplean máquinas con control manual, cualquier tendencia a decrecer la velocidad de aplicación de la carga seleccionada en la medida en que la probeta se aproxima a la falla, se corregirá por el ajuste apropiado de los mandos. Cuando se emplea el control automatizado, la velocidad de aplicación de la carga en todo el tiempo que la probeta está ensayándose, se chequeará que se mantenga constante. La carga máxima indicada se registrará.

### **- Valoración de tipo de fallo**

Si la rotura es satisfactoria como se muestra en la figura 3, se registrará. Si la rotura es insatisfactoria, el tipo de rotura se registra usando el número del modelo o patrón que más se aproxime a la realidad según los indicados en la Figura 4.

Si las planchas auxiliares son utilizadas, la parte superior de la misma estará alineada con la parte superior de la muestra.

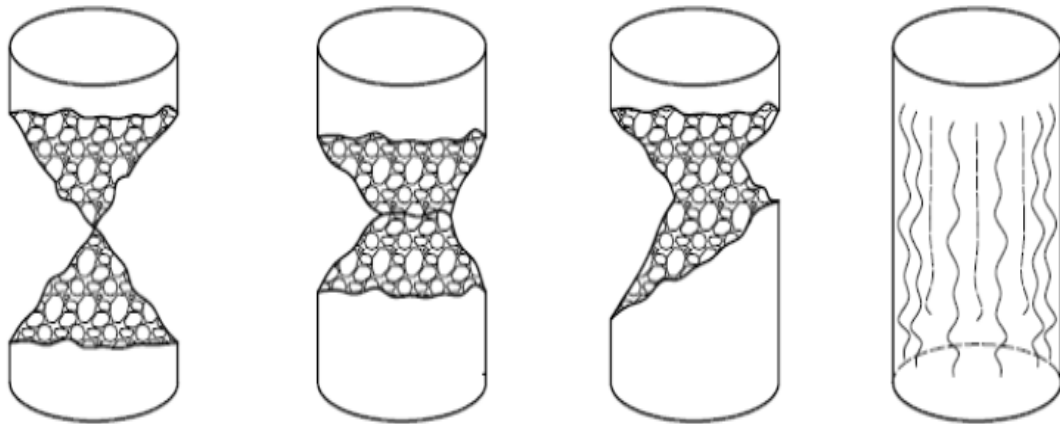


Figura 2.3: Rotura satisfactoria de las probetas cilíndricas.

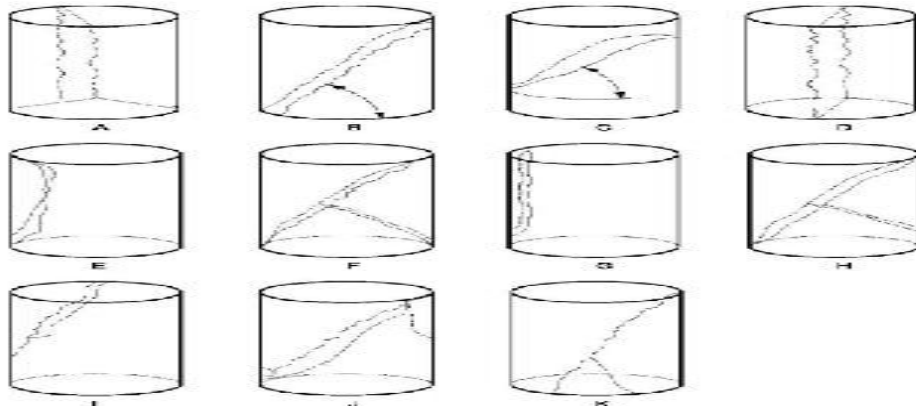


Figura 2.4: Roturas insatisfactorias de las probetas cilíndricas.

### Resultados del ensayo

La Resistencia a Compresión se da por la ecuación:

$$f'c = \frac{F}{A_c} \quad (2.13)$$

Donde:

$f'c$ : Resistencia a compresión expresada en (MPa)

F: Carga Máxima, expresada en (N)

Ac: Área de la sección transversal de la probeta sobre la cual actúa la fuerza a compresión, expresada en (mm<sup>2</sup>)

Si las dimensiones reales de la probeta de ensayo están dentro del  $\pm 0,5$  % del tamaño nominal, la resistencia puede calcularse en base al tamaño nominal. Si las dimensiones reales están fuera de esta tolerancia, el cálculo de la resistencia estará basado en las dimensiones reales de la probeta de ensayo.

La resistencia a compresión obtenida se expresará en el valor más cercano a 0,5 MPa.

### **2.3.3 Ensayo para la determinación de la absorción de agua por capilaridad.**

#### **Fundamentos del método.**

Este método es de utilidad para el establecimiento de requisitos de durabilidad y se realiza mediante la NC 345: 2011.

#### **Preparación de la muestra.**

Probeta de cilíndrica de 150 X 300 mm curada por 7 y 28 días; tomadas del mismo proceso de mezclado y con la misma dosificación que las probetas ensayadas a flexión y compresión.

#### **Procedimiento de ensayo**

Luego de ser secadas en la estufa fueron pesadas y colocadas sobre un lecho de arena fina de no más de 10 mm de espesor estanco, con una altura de agua por encima del lecho de arena de 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. Se utilizó agua potable. Estas se volvieron a pesar a las edades de 4; 8; 24; 72; 120 y 168 horas contadas desde el inicio del ensayo o su contacto con el agua.

### **2.3.4 Ensayo para la determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad).**

Este ensayo se realiza según lo establecido en la NC 967:2013.

#### **Principio.**

La velocidad de absorción de agua (sorptividad) del hormigón hidráulico se determina midiendo 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.

-Máquina extractora de testigos con sus aditamentos (de acuerdo con la norma NC 318:2015).

-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  $\pm 1$  s.

Cámara medioambiental, una cámara con circulación de aire capaz de mantener una temperatura ambiente de  $(50 \pm 2)$  °C y una humedad relativa de  $(80 \pm 3)$  %.

Alternativamente se puede emplear una estufa que garantice una temperatura de  $(50 \pm 2)$  °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.

### **Preparación y conservación de muestras para ensayos y probetas.**

-La probeta normalizada de ensayo es un disco de  $(100 \pm 6)$  mm de diámetro con un espesor de  $(50 \pm 3)$  mm. Las probetas se obtienen a partir de las probetas cilíndricas normalizadas, elaboradas de acuerdo a la NC-ISO 1920-3, ya sea mediante perforación o aserrado o a partir de testigos perforados de acuerdo a la NC 318, de su parte superior a la inferior. Cuando se toman testigos, deben ser marcados de manera que la superficie a ser ensayada, relativa a su ubicación original en la estructura, quede claramente indicada. Se garantizará que las probetas tengan en todos los casos paralelismo de las caras. La edad de las probetas a ensayar en todos los casos deberá tener como mínimo 28 días, a menos que específicamente se deseen obtener resultados a edades más tempranas, lo cual debe ser aclarado en el reporte de los ensayos.

-El promedio de los resultados de como mínimo dos probetas constituirá el resultado del ensayo. Las superficies ensayadas, deberán estar a la misma distancia de la superficie original expuesta del hormigón.

### **Procedimiento.**

-Se colocó las probetas de ensayo en la cámara medioambiental a temperatura de  $(50 \pm 2)$  °C y una humedad relativa de  $(80 \pm 3)$  % durante 3 días. Alternativamente, se colocó las probetas de ensayo en un desecador dentro de una estufa a temperatura de  $(50 \pm 2)$  °C por 3 días. Si se emplea el desecador, controle la humedad relativa en el desecador con agua, pero no permita que las probetas de ensayo contacten con el agua.

-Después de los 3 días, se colocó cada probeta dentro de una bolsa de polietileno para almacenaje sellable. Luego se utilizó una bolsa separada para cada probeta. Se tomaron precauciones para permitir el libre flujo de aire alrededor de cada probeta con vistas a asegurar un contacto mínimo de la probeta con las paredes de la bolsa.

-Se almacenó la bolsa sellada a  $(23 \pm 2)$  °C como mínimo durante 15 días antes de comenzar el procedimiento de la absorción.

-Se extrajo la probeta del recipiente de almacenaje y registre la masa de la probeta acondicionada al 0,01 g más cercano, antes de sellar sus superficies laterales.

-Se midió como mínimo 4 diámetros de la probeta en la superficie a que va a quedar expuesta al agua. Mida los diámetros al 0,1 mm más cercano y calcule el diámetro promedio al 0,1 mm más cercano.

-Se selló la superficie lateral de cada probeta con resina epóxica, parafina o un material de sellado apropiado. Selle el extremo de la probeta que no va a quedar expuesto al agua utilizando una liga o banda elástica u otro sistema equivalente.

### **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 g/mm<sup>3</sup>.

Las unidades de I son en mm.

$$I = \frac{M_t}{a * d} \quad (2.14)$$

Dónde:

I: Absorción (mm).

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

a: Área expuesta de la probeta, (mm<sup>2</sup>).

d: Densidad del agua, (0,001 g/mm<sup>3</sup>).

-La velocidad inicial de absorción de agua (mm/s<sup>1/2</sup>) se define como la pendiente de la línea que sea el mejor ajuste a I plotado contra la raíz cuadrada del tiempo (s<sup>1/2</sup>). Obtenga esta pendiente utilizando el análisis lineal de regresión por los mínimos cuadrados, el análisis de regresión lineal de plotear I contra el tiempo". Para el análisis de regresión lineal utilice todos los puntos desde 1 min hasta 6 horas, excluyendo los puntos para los tiempos después que el ploteo muestre un claro cambio de pendiente. Si los datos entre 1 min y 6 horas no siguen una relación lineal (un coeficiente de correlación menor de 0,98) y muestran una curvatura sistemática, la velocidad inicial de absorción no puede ser determinada.

-La velocidad secundaria de absorción de agua (mm/s<sup>1/2</sup>) se define como la pendiente de la línea que sea el mejor ajuste a I plotado contra la raíz cuadrada del tiempo (s<sup>1/2</sup>), 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 Interlaboratorios para desarrollar los valores de repetibilidad y reproducibilidad.

-Sesgo: El método de ensayo no tiene sesgo, porque la velocidad de absorción de agua determinada sólo puede ser definida en términos del método de ensayo.

### **Informe de ensayo.**

El informe de ensayo deberá contener los siguientes datos:

- Fecha en que el hormigón fue muestreado o colocado.
- Fuente de la muestra.
- Información relevante de los antecedentes de la muestra, como por ejemplo la dosificación de la mezcla, la historia del curado, el tipo de acabado y la edad si está disponible.
- Las dimensiones de la probeta antes de su sellado.
- La masa de la probeta antes y después del sellado.
- El ploteo de la absorción  $I$  en mm, contra la raíz cuadrada del tiempo en  $s^{1/2}$ .
- La velocidad promedio inicial de absorción de agua calculado hasta el  $0,1 \times 10 \text{ mm}/s^{1/2}$  más cercano y los velocidades iniciales de absorción individual de las dos o más probetas ensayadas.
- La velocidad promedio secundario de absorción de agua calculado a  $0,1 \times 10 \text{ mm}/s^{1/2}$  más cercano y los velocidades individuales de absorción de dos o más probetas ensayadas.

## **2.4 Cálculo de la resistencia característica real a la compresión.**

Para el cálculo de la resistencia característica se utilizó la NC 192:2012.

### **Preparación de las probetas.**

La probeta normalizada para los ensayos de resistencia a compresión es la probeta cilíndrica. Es importante tener en cuenta que la data para el análisis de la resistencia característica real a la compresión siempre tiene que estar constituida por resultados provenientes de un solo tipo de probetas.

### **Cantidad de probetas a elaborar**

Cada serie de probetas tendrá tres unidades y como mínimo dos solamente para el caso de los trabajos de laboratorio. A pie de obra por lo general es suficiente obtener de cada amasada dos series de probetas, una para ensayar a los 3 o 7 días y otra para ensayar a los 28 días, no obstante, para una amasada, es factible obtener tantas series de probetas como edades se deseen ensayar, siempre y cuando representen información de interés para un fin específico.

### **Cálculo de la resistencia característica real a la compresión del hormigón**

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

$$f_{ci} = \frac{F}{A} * 100 \quad (2.15)$$

Donde:

F: Carga de rotura (KN);

A: Área de la sección transversal de la probeta (cm<sup>2</sup>)

Es conveniente anotar los valores de  $f_{ci}$  obtenidos en orden descendente, o sea  $f_{c1} > f_{c2} > f_{c3}$

No se rechazarán indiscriminadamente aquellos valores de la resistencia individual de las probetas que parezcan estar dispersos. Cuando la probeta se reconozca como defectuosa (con presencia de oquedades, grietas, caras no paralelas, entre otros) se harán las anotaciones correspondientes en las observaciones del ensayo

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

$$f_{cs} = \frac{\sum_{i=1}^n f_{ci}}{n} \quad (2.16)$$

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:

$$R_i = f_{c1} - f_{c3} \quad (2.17)$$



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

$$f_{cm} = \frac{\sum_{i=1}^m f_{cs}}{m} \quad (2.18)$$

Donde:

m: número de series del lote.

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.19)$$

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

$$S_1 = \frac{1}{d_2} * R \quad (2.20)$$

Dónde:

1/d2: Constante que depende del número de probetas promediadas en una serie (Ver Tabla 2.3)

*Tabla 2.3: Valor de la constante 1/d2.*

<i>Cantidad de probetas</i>	<i>Cantidad de probetas valor de 1/d2</i>
2	20,8865
3	30,5967

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

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

$$V_1 = \frac{S_1}{f_{cm}} * 100 \quad (2.21)$$

Los valores límites de V1 para diferentes grados de control se muestran en la Tabla (2.4). 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.

Tabla 2.4: Valores de  $V_1$  para diferentes grados de control.

Tipo de operación	Valor de $V_1$ en % para diferentes grados de control				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Deficiente
Control de campo (a pie de obra o en planta)	Menor que 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	Mayor que 6
Mezclas de prueba en el laboratorio	Menor que 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	Mayor que 5

Fuente: tomado de NC 192:2012.

Los resultados evaluados como Aceptables y Deficientes requieren la toma de medidas inmediatas que impliquen la revisión de los procedimientos de preparación de las probetas, su curado y forma de transportación al laboratorio y de los métodos y procedimientos de ensayo de rotura a compresión.

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

$$S_n = \sqrt{\sum_{s=1}^m \frac{(f_{cm} - f_{cm})^2}{m-1}} \quad (2.22)$$

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, tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$S_{n^2} = S_{1^2} + S_{2^2} \quad (2.23)$$

Donde:

$S_2$ : desviación típica de amasada a amasada, sin incluir las variaciones internas del ensayo (Within Test)

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

$$V_n = \frac{S_n}{f_{cm}} * 100 \quad (2.24)$$

Evaluación de los valores anormales de la resistencia a la compresión, de los valores individuales y de las series de probetas.

La comprobación de la anormalidad en los valores de la resistencia a la compresión, se realizará para los valores extremos, o sea tanto para los muy bajos, como para los muy altos.

Los valores anormales de la  $f_{ci}$  se evalúan comparando el valor individual que resulte sospechoso con el valor promedio de la serie  $f_{cm}$  a que corresponde. Si el valor absoluto de la diferencia entre ambos valores es mayor que  $3 S_n$ , se recomienda rechazar dicho valor individual.

La anormalidad de los valores de resistencia a la compresión de las series, se analiza cuando existen deficiencias en la calidad de la probeta o si el valor sospechoso o muy desviado es provocado por factores ajenos, condiciones anormales o errores de ensayo y medición. En estos casos, a partir de los datos de resistencia media  $f_{cm}$  y la desviación típica del lote  $S_n$ , se halla el valor del estadígrafo  $t_n$ , mediante la siguiente fórmula:

$$t_n = \frac{(f_{ci} - f_{cm})}{S_n} \quad (2.24)$$

Donde:

$f_{ci}$ : Valor de la serie que se considera anormal (MPa).

El valor de  $t_n$  se compara con el valor límite “h” dado en la Tabla (2.4), en función de la población de series que se analizan, para un nivel de significación del 5%. Si se cumple que  $t_n > h$  el  $f_{ci}$  es anormal y debe ser excluido.

Tabla 2.5: Valores de h para un nivel de significación del 5%.

<i>Población de series</i>	<i>h</i>	<i>Población de series</i>	<i>h</i>	<i>Población de series</i>	<i>h</i>
3	1,15	12	2,29	25	2,87
4	1,46	13	2,33	30	2,93
5	1,67	14	2,37	40	3,02
6	1,82	15	2,41	50	3,08
7	1,94	16	2,44	100	3,28
8	2,03	17	2,48	250	3,53
9	2,11	18	2,50	500	3,70
10	2,18	19	2,53	-	-
11	2,23	20	2,57	-	-

*Para valores intermedios a los indicados se podrá interpolar*

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

Una vez eliminados los valores anormales (individuales y de series), es imprescindible recalcular la resistencia media a compresión del hormigón del lote por la fórmula (2.18) y la desviación típica del lote por la fórmula (2.22).

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

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,34 * S_n \quad (2.25)$$

Donde:

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

La expresión (11) 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:

$$f_{ck} = f_{cm} - t * S_n \quad (2.26)$$

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 2.6. Donde (v = n – 1), o sea, la población de series menos 1. Aunque los valores del percentil de Student permiten trabajar con una población de 2 series muestrales, la población muestral mínima para la determinación de la  $f_{ck}$  será de 6. Se obtendrán resultados más confiables con una población de 15 o más series muestrales.

*Tabla 2.6: Valores del percentil t de Student para un nivel de confianza del 90%.*

<i>Grados de libertad (V)</i>	<i>t</i>	<i>Grados de libertad (V)</i>	<i>t</i>	<i>Grados de libertad (V)</i>	<i>t</i>
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

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

### **Determinación de la fracción defectuosa real obtenida**

La fracción defectuosa real obtenida, o sea, el porcentaje de los valores de resistencia a compresión de las series, que son inferiores a la resistencia característica del hormigón especificada por el proyecto ( $f_{ck}$ ), se puede determinar directamente de un examen de la población de las series, o se puede calcular si se cuentan con más de 15 valores de series muestrales, mediante la fórmula siguiente:

$$Z = \frac{f_{cm} - f_{ck}}{S_n} \quad (2.27)$$

En la Tabla 2.3 se puede apreciar la fracción defectuosa obtenida en %, en dependencia del valor de Z calculado por la fórmula (2.25).

*Tabla 2.7: Valores de fracción defectuosa para diferentes valores de Z.*

<i>Z</i>	<i>Fracción defectuosa %</i>	<i>Z</i>	<i>Fracción defectuosa %</i>	<i>Z</i>	<i>Fracción defectuosa %</i>
0,1	46,0	1,10	13,6	2,10	1,8
0,2	42,1	1,20	11,5	2,20	1,4
0,3	38,2	1,30	9,7	2,30	1,1
0,4	34,5	1,40	8,1	2,40	0,8
0,5	30,9	1,50	6,7	2,50	0,6
0,6	27,4	1,60	5,5	2,60	0,45
0,7	24,2	1,70	4,5	2,70	0,35
0,8	21,2	1,80	3,6	2,80	0,25
0,9	18,4	1,90	2,9	2,90	0,19
1,0	15,9	2,00	2,3	3,00	0,13

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

## Evaluación de la uniformidad del hormigón

El grado de uniformidad o de control obtenido en la producción del hormigón de resistencia especificada  $fck \leq 34,5$  MPa, se evalúa a partir de la comparación de la desviación típica del lote ( $S_n$ ) y los valores indicados en la Tabla 2.4, que se empleará tanto para la producción del hormigón a pie de obra o en planta preparadora, así como durante la confección de mezclas de prueba en el laboratorio.

*Tabla 2.8: Valores de la  $S_n$  para diferentes grados de control en hormigones de  $fck \leq 34,5$  MPa.*

<i>Tipo de operación</i>	<i>Valor de <math>S_n</math> en MPa con diferentes grados de control</i>				
	<i>Excelente</i>	<i>Muy bueno</i>	<i>Bueno</i>	<i>Aceptable</i>	<i>Deficiente</i>
<i>Control de campo (a pie de obra o en planta)</i>	<i>Menor que 2,81</i>	<i>2,82 a 3,52</i>	<i>3,53 a 4,22</i>	<i>4,23 a 4,92</i>	<i>Mayor que 4,92</i>
<i>Mezclas de prueba en el laboratorio</i>	<i>Menor que 1,41</i>	<i>1,42 a 1,76</i>	<i>1,77 a 2,11</i>	<i>2,12 a 2,46</i>	<i>Mayor que 2,46</i>

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

El grado de uniformidad o de control obtenido en la producción del hormigón de resistencia especificada  $fck > 34,5$  MPa, se evalúa a partir de la comparación del coeficiente de variación del Lote ( $V_n$ ) y los valores indicados en la Tabla 2.9, que se empleará tanto para la producción del hormigón a pie de obra o en planta preparadora, así como durante la confección de mezclas de prueba en el laboratorio.

*Tabla 2.9: Valores de  $V_n$  para diferentes grados de control en hormigones de  $fck > 34,5$  MPa.*

<i>Tipo de operación</i>	<i>Valor de <math>V_n</math> en % con diferentes grados de control</i>				
	<i>Excelente</i>	<i>Muy bien</i>	<i>Bien</i>	<i>Regular</i>	<i>Pobre</i>
<i>Control de campo (a pie de obra o en planta)</i>	<i>Menor que 7,0</i>	<i>7 a 9</i>	<i>9 a 11</i>	<i>11 a 14</i>	<i>Mayor que 14</i>
<i>Mezclas de prueba en el laboratorio</i>	<i>Menor que 3,5</i>	<i>3,5 a 4,5</i>	<i>4,5 a 5,5</i>	<i>5,5 a 7,0</i>	<i>Mayor que 7</i>

*Fuente: tomado de NC 192:2012.*

La evaluación del grado de uniformidad del hormigón se puede medir como:

– “Excelente” para el control de campo, que debe garantizar la producción de hormigón en plantas de prefabricado y además en plantas centralizadas de hormigón premezclado con sistema de dosificación automático

– “Muy Bueno” para el control de campo que debe corresponder a plantas dosificadoras gravimétricas con sistema de control manual

– “Bueno” para el control de campo que debe caracterizar a la producción de hormigón a pie de obra en hormigoneras estacionarias con medición volumétrica de los materiales.

En cualquier caso los resultados evaluados como “Aceptables” o “Deficientes”, requieren la toma de medidas inmediatas para mejorar el grado de control en la producción del hormigón. Los criterios anteriormente analizados, conjuntamente con los valores de la desviación típica de la Tabla 6 y del Coeficiente de Variación  $V_n$  de la Tabla 2.9, permiten asumir un valor de  $S_n$  o de  $V_n$  para determinar la resistencia media de diseño de una dosificación de hormigón, siempre que no exista una estadística anterior que sea confiable, como es el caso de la producción inicial, y se calculará mediante las fórmulas siguientes, para los hormigones de  $f_{ck} \leq 34,5$  MPa:

$$f_{cm} = f_{ck} + 1,34 * S_n \quad (2.28)$$

En tanto que para los hormigones de  $f_{ck} > 34,5$  MPa:

$$f_{cm} = \frac{f_{ck}}{1 - 1,34 V_n} \quad (2.29)$$

### **Criterio de conformidad del lote de hormigón**

Los dos criterios de conformidad para la aceptación de un lote de hormigón por su resistencia a compresión, tanto para la producción inicial como continúa está indicado en la NC 120:2018. Si el lote de hormigón no cumple con el criterio de conformidad será rechazado y se procederá de acuerdo a lo establecido en la NC 207:2003.

## **2.5 Conclusiones parciales.**

1. Los materiales utilizados fueron árido grueso proveniente de la cantera Antonio Maceo, la arena de la cantera Arimao y Antonio Maceo y el cemento de la empresa Cementos Cienfuegos S.A los cuales fueron sometidos a un proceso de caracterización.

2. Los métodos experimentales sirvieron para la caracterización de los materiales empleados mediante las mediciones de las propiedades geométricas, físicas y mecánicas a los áridos así como la medición de propiedades en el hormigón en estado fresco y endurecido.



## **Capítulo III:**

### **Discusión de los resultados obtenidos de los diseños de mezcla.**

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales empleados en los diseños de mezclas teniendo en cuenta las normas correspondientes así como las mediciones de resistencia a compresión, sorptividad y porosidad efectiva considerando en ellos la influencia que tienen los resultados de las caracterizaciones de los materiales empleados.

#### **3.1 Agua.**

El agua utilizada no contenía sustancias en suspensión o disueltas que pudieron alterar el fraguado del cemento y con  $\text{pH} < 7$ . El agua fue incolora, inodora, fresca y no contenía materia orgánica por lo tanto se puede afirmar por el autor que un agua con estas características garantizó que no se produzcan o hayan producido en ocasiones eflorescencias, agrietamientos, corrosiones o perturbaciones en el fraguado y endurecimiento de las masas.

#### **3.2 Cemento.**

En la caracterización del cemento se empleó la NC 95:2017 “Cemento Portland. Especificaciones”. El cemento utilizado fue Portland P-35 procedente de la planta Cementos Cienfuegos S.A de la provincia de Cienfuegos y se comprobaron los resultados teniendo en cuenta el valor dado según lo que establece la NC 95:2017.

##### **3.2.1 Ensayos físicos del cemento.**

La NC 524:2015 en la obtención del tiempo de fraguado inicial y final plantea que la desviación estándar de un simple operador es de 12 min para el tiempo de fraguado inicial, sobre todo el rango completo de 49 min a 202 min, este ensayo arrojó como resultado de tiempo de fraguado inicial 60 min que se encuentra dentro del rango, por tanto es un valor aceptable para este ensayo. Además plantea como 20 min para el tiempo de fraguado final sobre todo el rango completo de 185 min a 312 min, y se obtuvo 2,5h de fraguado final que es un valor conforme para lo que exige la norma. Por tanto, los resultados de dos ensayos Vicat del tiempo de fraguado inicial debidamente realizados

por el mismo operador sobre pastas similares no deben diferir unos de otros, por más de 34 min y el tiempo de fraguado final no deberán diferir por más de 56 min.

*Tabla 3.1: Requisitos del cemento Portland. Ensayos físicos.*

<i>Ensayos</i>	<i>Método de ensayo</i>	<i>Resultados</i>	<i>Especificaciones</i> P-35		<i>Evaluación de la conformidad</i>
<i>Resistencia normal y tiempo de fraguado</i>	NC 524:2015	60	<i>Tiempo de fraguado inicial(min)</i>	<i>Mín. 45</i>	<i>Conforme</i>
		2,5	<i>Tiempo de fraguado final(h)</i>	<i>Máx10</i>	<i>Conforme</i>
		25	<i>Consistencia normal (%)</i>	-	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

Estos resultados son adecuados a lo establecido por la norma NC 524:2015 y según lo dicho por Díaz (2012), el autor llegó a la conclusión de que estos valores influyen en los procesos de colocación, compactación, curado y retracción de la mezcla de hormigón.

La mezcla de hormigón deberá ser colocada y compactada antes del comienzo de su fraguado inicial. No se permitirá la colocación de hormigón que muestre inicio del fraguado. El proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento (Díaz, 2012). Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente el autor llegó a la conclusión de que con el fraguado del hormigón alcanzará mayor resistencia cuanto más pase el tiempo. Por otra parte las elevadas temperaturas que se generan en los hormigones durante el fraguado traen consigo influencias negativas traducidas en rápidas evaporaciones del agua, obligando al

operador al uso de más agua, desestabilizando la relación agua-cemento y obteniendo un hormigón más poroso. La porosidad es uno de los parámetros en el hormigón endurecido de mayor influencia en los mecanismos de transporte de los agentes agresivos hacia el interior de su estructura, disminuyendo la resistencia y durabilidad del hormigón. La sorptividad es un factor que depende de manera directa de la facilidad con la que los agentes agresivos ingresan y se mueven en el interior de la estructura porosa del hormigón, por lo que si se obtiene un hormigón poroso debido a la afectación de las elevadas temperaturas durante el proceso de fraguado, esta se verá favorecida y afectará la densidad y durabilidad del hormigón.

Por otra parte, el agua es utilizada como un agente de curado del concreto después de fraguado, esto debido a que cuando ocurre este proceso se generan altas temperaturas que evaporan el agua incluida en la mezcla y lo que se hace en el curado es bajar las temperaturas ayudando así a que el concreto después de fraguado obtenga la resistencia deseada (Niño 2013). Tras el análisis de esta idea el autor llegó a la conclusión de que una correcta ejecución del curado teniendo en cuenta de manera conveniente el proceso de fraguado y endurecimiento de la pasta, se evita la aparición de microfisuras y nuevos poros que puedan afectar la resistencia y durabilidad del hormigón.

### **3.2.2 Ensayos mecánicos del cemento.**

*Tabla 3.2: Resultados del cemento Portland. Ensayos mecánicos.*

<i>Ensayos</i>	<i>Método de ensayo</i>	<i>Resultados</i>	<i>Especificaciones</i> P-35	<i>Evaluación de la conformidad</i>
<i>Resistencia a compresión</i>	NC 506-2013	37,8	<i>Mín. 35</i>	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

La NC 506:2013 exige como valor mínimo de resistencia del cemento 35 MPa y el ensayo arrojó para una resistencia promedio medida a los 28 días, 37,8 MPa, que es un valor conforme a lo exigido. Este valor de cemento Portland es apto para ser utilizado en todo tipo de construcciones sometidas a diferentes zonas de agresividad, producto de la alta resistencia que este le puede aportar al hormigón.

### 3.3 Áridos.

#### 3.3.1 Propiedades geométricas.

##### Determinación de la Granulometría.

El comportamiento de la granulometría se analizó mediante la NC 251:2018.

*Tabla 3.3: Análisis Granulométrico del árido fino No.4 (4.75mm)-No.100 (0.15).*

<i>Análisis Granulométrico del árido fino No.4(4.75mm)-No.100(0.15)</i>							
<i>Tamices(mm)</i>	9,52	4,75	2,36	1,18	0,6	0,3	0,15
<i>% Pasado</i>	100	96	86	66	39	15	5
<i>Especificación</i>	100	100	100	80	60	30	10
	100	90	70	45	25	10	2
<i>Conformidad</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

*Tabla 3.4: Análisis Granulométrico del árido grueso.*

<i>Análisis Granulométrico del árido grueso (10-20mm)</i>					
<i>Tamices (mm)</i>	25	19	12,5	9,5	4,75
<i>% Pasado</i>	100	97	55	20	6
<i>Especificación</i>	100	90	20	0	0
	100	100	55	15	5
<i>Conformidad</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>Conf.</i>	<i>No conf.</i>	<i>No conf.</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

Como se ha planteado anteriormente en la investigación en lo referido al estado del arte relacionado con las propiedades de los áridos la granulometría es determinante en el futuro comportamiento del hormigón en el estado plástico y su posterior endurecido.

Como se puede apreciar en la tabla 3.3 la arena no presenta problemas y cumple con las especificaciones establecidas por la norma, por otra parte el árido grueso no cumple con las especificaciones de los tamices 9,5 y 4,75 lo cual indica que el árido presenta más cantidad de fino de lo que exige la norma. Esta cantidad de fino mejoraría la densidad y compactación del hormigón al cubrir mejor todos los espacios, pero a la vez incrementaría la cantidad de cemento a agregar a la mezcla debido a que tendría que cubrir o aglomerar mayor superficie específica del hormigón.

De acuerdo a lo propuesto anteriormente de acuerdo con Bernal (2012) acerca de los áridos se puede plantear que en estado fresco el tamaño de los áridos influye de manera que a mayor superficie de agregado, mayor mortero necesario y menor fluidez. Por tanto al incrementarse el contenido de cemento se afectaría la relación agua-cemento, obligando al uso de mayor cantidad de agua para mantener propiedades como la consistencia y favorecer el proceso de hidratación de cemento. Una vez que el hormigón está endurecido se obtendría un nivel alto de porosidad, favoreciendo la entrada de agentes agresivos al interior del hormigón aumentando así la velocidad de absorción capilar.

#### **Determinación del módulo de finura.**

*Tabla 3.5: Módulo de finura.*

<i>Arena "Arimao"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Módulo de finura</i>	2,93	2,2-3,58	-	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

El rango del módulo de finura para los áridos finos de acuerdo con la NC 251:2018 es de 2,2 a 3,58 y el valor de esta arena es de 2,93, por lo que es una arena con condiciones buenas para ser utilizada en el hormigón. A criterio del autor tras consultar lo expuesto por Villanueva (2008) una arena con estas características constituye un ahorro en cuanto

cemento, porque esta ayuda al cemento a cubrir la superficie de agregado, aportando menos porosidad y por tanto menos velocidad de absorción capilar en el hormigón.

**Determinación material más fino que T-200 (%).**

*Tabla 3.6: Material más fino que T-200(%) de la arena.*

<i>Arena "Arimao"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Material más fino que T-200(%)</i>	1,8	<i>&lt;3 Para hormigones bajo abrasión</i>	±0.16	<i>Conforme</i>
		<i>&lt;5 Para los demás hormigones</i>		<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

*Tabla 3.7: Material más fino que pasa T-200(%) del árido grueso.*

<i>Gravilla "Antonio Maceo"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Material más fino que T-200(%)</i>	0.56	<1%	±0.16	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

La NC 251:2018 establece para material más fino que T-200(%) de áridos finos utilizados en hormigones un (%) <5. El resultado que se obtuvo fue de 1,8 %, mientras que para áridos gruesos establece un (%)<1 y se obtuvo como resultado 0,56, por tanto son valores de árido adecuados para ser utilizados en estos hormigones. La determinación del material más fino que pasa por el T-200(%) consiste en determinar la cantidad total de finos existentes en los áridos y que pasa el tamiz 0,074 mm (No 200). Cuando este material se encuentra en exceso en los áridos tiende a adherirse a las partículas de mayor tamaño, impidiendo una buena adherencia de este último con la pasta de cemento. Esto trae como resultado baja resistencia a los esfuerzos mecánicos de los hormigones que contienen dichos áridos (Lima & Hernández 2015). Para este caso en que se cumple con

el porcentaje de pasado exigido, el hormigón que se va a obtener tendrá una buena adherencia entre el mortero y el árido. Esta buena adherencia sellará mejor los espacios en el hormigón garantizando que cumpla con los requisitos establecidos de resistencia, porosidad y sorptividad.

### 3.3.2 Propiedades físicas del árido.

#### Pesos específicos y absorción de agua.

Se analizaron los pesos específicos y la absorción de agua por medio del pesaje del árido en estado seco y saturado en agua, y se compararon con los parámetros que indica la NC 251:2018.

*Tabla 3.8: Peso específico corriente y (%) de absorción de la arena.*

<i>Arena "Arimao"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>P.E Corriente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2,58	>2,5	±0.019	<i>Conforme</i>
<i>Absorción (%)</i>	2,04	<3	±0.017	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

*Tabla 3.9: Peso específico corriente y (%) de absorción del árido grueso.*

<i>Gravilla "Antonio Maceo"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Peso específico corriente (g/cm<sup>3</sup>)</i>	2,48	>2,5g/cm <sup>3</sup>	±0.009	<i>No conforme</i>
<i>Absorción (%)</i>	3,28	<3	±0.17	<i>No Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

Tras los ensayos de peso específico corriente y porcentaje de absorción podemos observar que la arena cumple con las especificaciones establecidas, cuestión que si presenta el

árido grueso no cumpliendo con el peso específico corriente y porcentaje de absorción. El valor del peso específico es menor que lo que exige la norma ( $>2,5\text{g/cm}^3$ ), por lo que no cumple con lo establecido con la norma. El porcentaje de absorción obtenido es de 3,28, valor muy superior al exigido por la norma ( $<3$ ). Si este valor no se tiene en cuenta, podría variar la relación agua-cemento de la mezcla conllevando a una adición de agua y cemento para mantener esta proporción, llegando a reducir sensiblemente la trabajabilidad de la mezcla, obteniendo así un hormigón más poroso, menos duradero y resistente.

### **Determinación de los pesos volumétricos.**

Para la determinación de los pesos volumétricos se analizó de acuerdo con lo establecido en la NC 251:2018.

*Tabla 3.10: Pesos volumétricos de la arena.*

<i>Arena "Arimao"</i>			
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>
<i>Peso volumétrico suelto(kg/m<sup>3</sup>)</i>	1532	-	$\pm 20.04$
<i>Peso volumétrico compactado (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1666	-	$\pm 18.53$

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

*Tabla 3.11: Pesos volumétricos del árido grueso.*

<i>Gravilla "Antonio Maceo"</i>			
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>
<i>Peso volumétrico suelto(kg/m<sup>3</sup>)</i>	1385	-	$\pm 14.62$
<i>Peso volumétrico compactado (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1538	-	$\pm 15.19$



*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

El volumen que ocupa un árido según su peso es un indicador de las características del mismo en cuanto a ligereza, porosidad y permeabilidad, propiedades que pueden afectar al hormigón en un mayor requerimiento de cemento para una resistencia específica y con esto una influencia directa sobre la economía de la mezcla (Gayoso & Herrera 2007). Para este caso los valores de pesos volumétricos van a tener relevante influencia en el resultado final del hormigón obteniéndose un hormigón pesado y sus valores de porosidad, permeabilidad y sorptividad dependerán de la uniformidad y de la forma y nivel de compactación que se aplique sobre este.

### **3.3.3 Propiedades químicas de los áridos.**

#### **Determinación del porcentaje de partículas de arcilla.**

*Tabla 3.12: Partículas de arcilla de la arena.*

<i>Arena "Arimao"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Partículas de arcilla (%)</i>	0	<1	±0.2	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

*Tabla 3.13: Terrones de arcilla del árido grueso.*

<i>Gravilla "Antonio Maceo"</i>				
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>	<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
<i>Terrones de arcilla (%)</i>	0	<0,25%	±0.2	<i>Conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

La NC 251:2018 establece para los áridos tener un porcentaje de partículas de arcilla <1 y la arena que proviene de la cantera Arimao tiene 0% de partículas de arcilla, lo que la hace un material adecuado para su uso en hormigones.

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

Con un árido libre de partículas de arcilla, el autor concluye tras el análisis de lo expuesto anteriormente, que la pasta alcanzará mejor adherencia con el árido, al este no estar cubierto por contenido de arcilla. Con el mejoramiento de la adherencia el hormigón, este experimentará una mejor uniformidad y compacidad, logrando una mejor distribución y funcionamiento de sus componentes, garantizando así el aumento de su resistencia. Otras propiedades que se ven favorecidas son la disminución de la porosidad y la velocidad de absorción capilar debido a que con la buena adherencia de los materiales quedan menos espacios vacíos dentro del hormigón favoreciendo la permeabilidad del mismo y la entrada en menor medida de agentes agresivos al interior.

Por otra parte el árido libre de arcilla evitará el aumento de agua y por consiguiente el aumento de cemento para no alterar la relación entre estos dos materiales, aumentando así la porosidad y sorptividad del hormigón.

### **3.3.4 Propiedades mecánicas del árido.**

#### **Determinación del índice de Triturabilidad.**

La NC 251:2018 establece según la determinación del índice de triturabilidad de la porción de árido grueso sometida a esfuerzo de compresión constante los tipos de hormigones para los cuales se puede utilizar este árido grueso. Como se puede apreciar en la Tabla 3.14 este ensayo dió como resultado que se puede utilizar para hormigones húmedos con resistencia  $f_{ck} > 35$  Mpa. No siendo así para hormigones con resistencia  $f_{ck} < 35$  Mpa.

Tabla 3.14: Índice de triturabilidad del árido grueso.

<i>Gravilla "Antonio Maceo"</i>						
<i>Ensayo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Especificación</i>			<i>Incertidumbre</i>	<i>Conformidad</i>
		<i>Tipo de hormigón</i>	<i>Seco</i>	<i>Húmedo</i>		<i>Conforme</i>
<i>Índice de triturabilidad</i>	17,33	<i>Pavimentos de hormigón para tráfico pesado. Resistencia fck &gt; 35 MPA</i>	<15	<25	±0.13	<i>Conforme para hormigones húmedos</i>
		<i>Pavimentos y pisos sometidos a desgaste. Hormigones arquitectónicos, expuestos a diferentes tipos de erosiones</i>	20-15	35-25	±0.13	<i>No conforme</i>
		<i>Otros tipos de hormigones. Resistencia fck &lt; 35 MPA</i>	35-20	50-35	±0.13	<i>No conforme</i>

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

Según la NC190:2002 el índice de triturabilidad indica la porción de árido grueso sometido a esfuerzo de compresión constante. De acuerdo con Howland (2013) los áridos constituyen entre el 75 y el 80% de la masa de los hormigones convencionales, por lo que este aporta la mayor resistencia al hormigón y el índice de triturabilidad es una medida clara de cuanto el árido puede aportar de resistencia, por lo que cuanto mayor sea su valor, mayor resistencia aportará al elemento constructivo que se esté realizando, sin embargo de acuerdo con Taus (2003) con el aumento de la porosidad y la sorptividad en el hormigón se verá disminuido el índice de triturabilidad. Para este caso el índice de triturabilidad es alto por la que se obtendrán valores bajos de porosidad y sorptividad del hormigón.

### 3.4 Aditivo.

Se utilizaron 3,1kg en la mezcla de aditivo Sikaplas 9100, un aditivo superfluidificante y superplastificante, reductor de base acrílica modificada para hormigones y aporta una alta laborabilidad sin exceso de agua. Este aditivo contribuye a minimizar los riesgos que ocasiona el no poder controlar ciertas características inherentes a la mezcla de hormigón original, como son los tiempos de fraguado, la estructura de vacíos, el calor de hidratación, etc. Según Coapaza (2018) la aplicación práctica de los aditivos superfluidificante se encuentra en la elaboración de hormigones con altas resistencias, con un porcentaje de cemento balanceado, sin problemas de contracción y fisuramiento de las mezclas que contienen cemento en exceso. El gran incremento de resistencia del hormigón cuando se usan superplastificantes es debido a la notable disminución de la porosidad de la pasta, producto de la reducción de agua de la mezcla. Con esta reducción de agua se ven beneficiadas otras características importantes para el hormigón, como es el aumento de la permeabilidad y con ella disminuye la entrada de agentes externos al interior del concreto, reduciendo así la velocidad de absorción capilar.

### 3.5 Hormigón.

#### 3.5.1 Determinación de la consistencia por el cono.

La NC 120:2018 establece como parámetros para la consistencia de la mezcla los valores que se muestran en la Tabla 3.15.

*Tabla 3.15: Tipo de asentamiento por el cono de Abrams.*

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

*Fuente: Tomado de NC 120:2018.*

De acuerdo con el ensayo realizado a la mezcla se obtuvo un valor de asentamiento de 240mm, por lo que es una mezcla muy fluida. Según la NC 174:2002 el asentamiento de 240mm es aproximado ya que el cono de Abrams no es recomendable para asentamientos mayores de 220mm. Este valor de asentamiento es producto del aditivo utilizado, el

Sikaplas 9100, un aditivo superfluidificante, reductor de base acrílica modificada para hormigones y aporta una alta laborabilidad sin exceso de agua, para aumentar las resistencias mecánicas, disminuir la porosidad y la absorción capilar.

### 3.5.2 Determinación de la resistencia del hormigón del diseño de mezcla 1.

En este epígrafe se analizaron los factores que influyen en la resistencia a compresión de este material.

*Tabla 3.16: Resultados de los valores del ensayo de resistencia a compresión.*

<i>Probetas</i>	<i>Resistencia característica a los 7 días (MPa)</i>	<i>Resistencia característica a los 28 días (MPa)</i>
<i>FC1</i>	32,3	40,1
<i>FC2</i>	31,2	39,7
<i>FC3</i>	30,1	39,1
<i>Resistencia característica total del lote (MPa)</i>	31,2	39,9

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

**Leyenda:**

FC1: Resistencia característica de la probeta de la primera serie.

FC2: Resistencia característica de la probeta de la segunda serie.

FC3: Resistencia característica de la probeta de la tercera serie.

El resultado de este ensayo a los 7 días es positivo porque aporta una resistencia a los 7 días de 31,2 MPa que todavía no supera los 35Mpa que exigía el proyecto. Payá (2017) plantea acerca de la evolución de la resistencia a compresión de las probetas a los 3,7 y 28 días, la cual se muestra a continuación.

*Tabla 3.17: Resistencia a compresión de las probetas.*

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

*Fuente: tomado de “Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura” de Valcuende Payá.*

Es decir, a los 3 días su resistencia será del orden del 40% de la que tendrá a los 28 días; a los 7 días, del 65%, etc. Estos resultados a los 7 días cumplen con el 65% de la resistencia que debe alcanzar a los 28 días de acuerdo a lo planteado anteriormente. Teniendo como resistencia característica a los 7 días de 31,2 MPa y un rendimiento de 0,70 la Unidad Básica de Servicios de Hormigón cumple con los requisitos necesarios para utilizar este hormigón en obra. Al no superar los 35 MPa de resistencia alcanza la categoría de buen rendimiento al superar los 0,75 exigidos por el Ministerio de la Construcción (como se muestra en la tabla 1.2).

Por otra parte a los 28 días arrojó una resistencia característica de 39,9 MPa cumpliendo con lo exigido en la Tabla 11 de la NC 120:2018, que establece para un hormigón armado y una zona de agresividad alta, una resistencia característica mínima de 35MPa. Con estos valores de resistencia se obtuvo un valor de rendimiento de cemento de 0,90, es decir, casi 100% y que por cada 1kg de cemento que se adiciona a la mezcla casi se alcanza 1kg/cm<sup>2</sup> de resistencia en el hormigón.

Los resultados de resistencia anteriores en la Tabla 3.16 fueron producto de diversos factores que influyen en la resistencia a la compresión dentro de los que encontramos la relación a/c, que para este diseño de mezcla se utilizó una relación agua/cemento igual a 0,40. La importancia del agua resulta de gran magnitud, ya que ella y su relación con el cemento están altamente ligados a una gran cantidad de propiedades del material final que se obtendrá, en donde usualmente conforme más agua se adicione, aumenta la fluidez de la mezcla y, por lo tanto, su trabajabilidad y plasticidad, lo cual presenta grandes beneficios para la mano de obra; no obstante, también comienza a disminuir la resistencia debido al mayor volumen de espacios creados por el agua libre (Guevara, 2011). Así, se puede afirmar que la resistencia del concreto depende altamente de la relación por peso entre el agua y el cemento.

Otro de los factores que influye enormemente en la resistencia final del hormigón son las características de los áridos. Como se planteó anteriormente se utilizaron en el diseño

286kg de arena de la cantera Arimao y 736kg de la cantera Antonio Maceo, además de 654kg de gravilla y 280kg de granito de la cantera Antonio Maceo, todas ellas cumpliendo los requisitos de conformidad establecidos, a excepción de la granulometría, el peso específico y el porcentaje de absorción del árido grueso. La influencia que tienen estos resultados de ensayo en la resistencia final ya se ha explicado cada caso particular anteriormente en el capítulo.

Para los áridos gruesos la ACI 211.1 señala que se ha demostrado que los agregados de tamaño máximo nominal más pequeño proporcionan mayor resistencia potencial en el concreto. 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. Esta superficie de contacto, por unidad de volumen del concreto, es tanto mayor mientras menor es el tamaño máximo de los agregados. De allí la conveniencia de usar agregados de tamaño máximo menor, mientras más alta sea la resistencia que se quiere alcanzar. Para los áridos fino la mezcla de arenas naturales de diferentes fuentes permite optimizar su granulometría y conseguir incrementos de resistencia (Sepulveda, 2013). Para optimizar la granulometría e incrementar la resistencia el autor usó las combinaciones de áridos que se planteaban anteriormente provenientes de las canteras Arimao y Antonio Maceo correspondientemente y garantizando un tamaño máximo de agregado de 20-25mm para reducir la superficie de contacto y evitar el aumento de agua innecesaria.

También la cantidad y tipo de cemento es un factor influyente, la cantidad de cemento P-35 que se utilizó da un aporte significativo a la resistencia que se quiere alcanzar, debido a que este cumple con los requisitos de calidad exigidos.

En la medida en que se quiera incrementar la resistencia del concreto, la selección de los cementos a usarse resistencia es mucho más rigurosa. Diferentes cementos Portland, que cumplan con todas las normas y sean esencialmente similares, pueden comportarse de una manera diferente, cuando las relaciones agua-cemento, de los hormigones en que se utilizan, son más bajas que lo usual (Sepulveda, 2013). El autor concluyó que la cantidad de cemento está condicionada por la relación agua-cemento, de ahí que su influencia en la resistencia dependa de esta relación.

El curado es un factor a analizar muy importante, ya que si este proceso se hace mal, se podría perder hasta el 30% de la resistencia esperada; por eso, lo recomendable sería hacerlo por 28 días (Olivares 2004). El curado se realizó después de las 16 horas de haber estado dentro de las probetas y luego se guardaron en agua sumergida a una temperatura de 20°C y humedad relativa de 95% para evitar la pérdida de resistencia en alrededor de un 30%.

El aditivo que se utilizó fue el Sikaplas 9100, un aditivo superfluidificante y superplastificante, que como se planteó anteriormente aporta una alta laborabilidad sin exceso de agua, para aumentar las resistencias mecánicas. El empleo de aditivos reductores de agua, simples o de alta actividad en el hormigón, producen efectos sobre las etapas de inducción y aceleración del proceso de hidratación del hormigón. Los efectos considerados de cada tipo de aditivo van a depender fundamentalmente de la composición química de cada aditivo. Así, podrán aumentar o disminuir dichas etapas en un tiempo considerado. Los aditivos plastificantes actúan reduciendo la cantidad del agua, asimismo evitan una elevada reacción exotérmica de hidratación durante el fraguado. Los aditivos plastificantes disminuyen la tensión en la interfase de contacto entre grano de cemento y agua, lo cual provocará el mojado de los granos (Cánoves, 2012). Con el mojado de los granos el aditivo evitará el incremento de agua mejorando la laborabilidad de la mezcla y aumentando la resistencia.

Otros factores que influyen en la resistencia a compresión del hormigón son los factores climatológicos, dentro de los que se encuentra la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento.

La temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso de hidratación es otro factor importante dentro de la cinética de hidratación del hormigón. Generalmente, una temperatura alta incrementa la velocidad de hidratación en edades tempranas; sin embargo, los grados de hidratación y desarrollo de resistencia a edades posteriores son frecuentemente reducidos. La temperatura acelera la hidratación, y como consecuencia, el desarrollo de la resistencia del hormigón. La radiación solar es uno de los factores climatológicos que muestra una gran influencia sobre la respuesta térmica de las estructuras de hormigón. La radiación solar sobre el hormigón produce un incremento de su temperatura, al mismo tiempo, supone problemas al hormigón en sus dos estados



(fresco y endurecido), debido a una excesiva evaporación de agua. La velocidad del viento mediante la evaporación del agua del hormigón produce una alteración de las propiedades del hormigón en estado fresco. Al mismo tiempo, la velocidad del viento influye sobre las propiedades del hormigón en estado endurecido, principalmente sobre la resistencia mecánica y la durabilidad, ya que la hidratación del cemento no es completa, lo que produce una disminución de las propiedades mecánicas e impermeabilidad del hormigón(Cánoves, 2012). La temperatura, los rayos solares y el viento son factores que influyen directamente sobre la evaporación del agua de la mezcla afectando la relación agua-cemento y dejando partículas de cemento sin hidratar, afectando el buen funcionamiento de los componentes del hormigón y reduciendo su resistencia.

### 3.5.3 Determinación de la absorción de agua por capilaridad del diseño de mezcla 1.

Tabla 3.18: Resultados del ensayo de porosidad.

Testigo	Diámetro	Altura	Peso	Peso	Porosidad	Porosidad	U(p)
No.	di (m)	(m)	Inicial Qo(kg)	Qn (kg)	(%)	Media (%)	(%)
1	0,15	0,025	1,035	1,055485	4,64	5,52	2,05
2	0,15	0,025	0,991	1,019248	6,39		

Fuente: Elaborada por el autor.

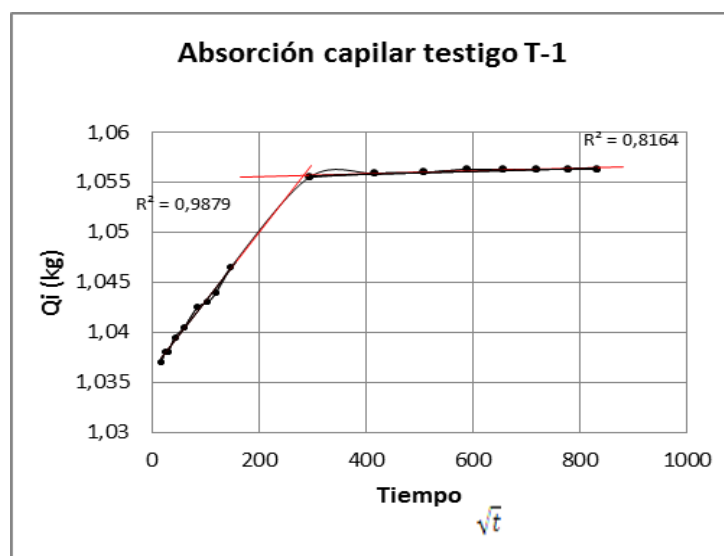


Figura 3.1: Absorción capilar del testigo 1.

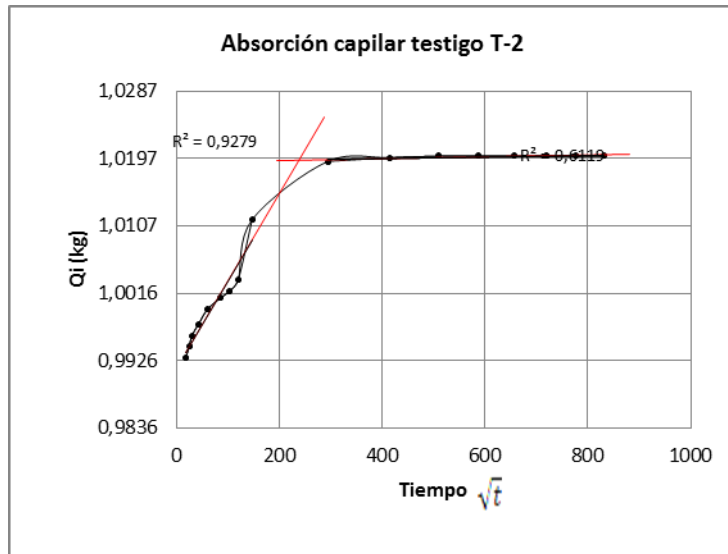


Figura 3.2: Absorción capilar del testigo 2.

En este epígrafe se analizan los factores que influyeron sobre la absorción capilar de agua. Como resultado del ensayo de porosidad a los 28 días se obtuvo un 5,52 %, valor que cumple con la NC 120:2018 que exige para un hormigón armado en una zona de agresividad alta no exceder el 10 % de porosidad efectiva. Con este valor de absorción capilar de agua se garantiza el aumento de la durabilidad del hormigón en zonas de agresividad alta.

Diversos fueron los factores que influyeron en este resultado dentro de los principales se encuentran Howland (2013).

- Diseño y proporcionamiento de las mezclas de hormigón
- Tipo y contenido de cemento utilizado
- Relación agua cemento (a/c)
- Régimen de curado del hormigón
- Compactación
- Edad y resistencia del hormigón

De acuerdo con Olivares (2004) el compuesto del hormigón, sus poros o huecos, dentro de un amplio intervalo de tamaños, pueden estar más o menos, llenos de agua o aire, sea en la masa de la pasta de cemento hidratada, en la propia aureola de transición o interface pasta-árido, e incluso en el interior de los granos de árido, por lo que en consecuencia no hay

hormigón sin poros y una correcta dosificación ayuda a disminuir la cantidad de estos. El autor opina que el buen diseño de mezcla ayuda al mejor proporcionamiento de los materiales componentes de la masa de hormigón, haciendo que funcionen como un todo llenando los espacios vacíos, mejorando la adherencia para disminuir la porosidad y aumentar la resistencia.

Para lograr un buen diseño de mezcla de hormigón que disminuya la porosidad se hace necesario el análisis del tipo y contenido de cemento, además de la relación agua-cemento (a/c) utilizada en el mismo. Díaz (2012) dijo que añadir un exceso de agua o cemento en el amasado para conseguir una masa homogénea y trabajable sin un ajuste de la relación a/c implica en cualquier caso un aumento de la porosidad. De esta forma el autor estima que en todas las dosificaciones con aumento de la relación a/c, corrobora un crecimiento en el contenido de agua o de cemento, implicando en cualquier caso un aumento de la porosidad capilar y la consiguiente disminución de la resistencia.

El régimen de curado es uno de los factores que más afecta existencia de un hormigón poroso. Ramírez (2014) planteó que el proceso de curado es un medio de prevención para una desecación acelerada o prematura, que produciría fisuras y retracciones en el hormigón, además de dificultar el proceso de hidratación. Por otro lado también dijo que un curado muy prolongado no es recomendable ya que el porcentaje de granos de cemento hidratados es de tal magnitud, que el hormigón tiende a expandirse y por ende agrietarse. Después de esta disertación, el autor decanta la importancia del estudio del curado del hormigón en edades tempranas, porque un correcto curado conducen a un hormigón denso, reduciendo la pérdida de agua y por tanto la cantidad de vasos capilares en el concreto.

El proceso de compactación se realizó con una varilla dando 25 golpes a cada capa de hormigón para garantizar que su buena realización no tuviera un impacto negativo en la absorción capilar del hormigón. La compactación tiene como objetivos fundamentales aumentar la compacidad de la masa, logrando un efecto cerrado de la misma mediante la expulsión del aire y el reacomodo de sus partículas, conducir el hormigón hasta todas las partes del molde, evitando que queden coqueas, así como una perfecta unión entre las capas, sin producir segregación (Vizcaíno 2014). Con la correcta ejecución de la compactación, el autor logró disminuir el número de poros en el hormigón liberando el

aire comprimido y ocupando los espacios vacíos con el reacomodo de todos los materiales.

Por último la edad del hormigón condiciona también el porcentaje de porosidad que este puede llegar a tener. Según Lichtner (1974) la proporción de agua enlazada molecularmente y químicamente varía al aumentar la edad y con la progresiva hidratación o progreso de madurez de la pasta de cemento aumenta la parte de los poros pequeños. En conclusión con el aumento de la edad del hormigón hasta ser ensayado a los 28 días aumenta y varía la cantidad de poros al hidratarse el cemento y evaporarse el agua contenida en la mezcla.

### **3.5.4 Determinación de la velocidad de absorción de agua (sorptividad) del diseño de mezcla 1.**

En este epígrafe se analizan los factores que influyeron sobre la velocidad de absorción capilar de este material. Como resultado de este ensayo a los 28 días se obtuvieron  $4,8 \times 10^{-5}$  m/s<sup>1/2</sup> y la NC 120:2018 establece para hormigones armados y una zona de agresividad alta una velocidad de absorción capilar no mayor de  $5 \times 10^{-5}$  m/s<sup>1/2</sup>, por tanto este hormigón cumple con los requisitos que establece esta norma. Con esta velocidad de absorción capilar, el autor entiende que el hormigón podrá ser utilizado en zonas de agresividad alta, algo que sin dudas es de gran importancia para nuestro país que tiene un clima húmedo tropical y además está sometido a intensos niveles de agresividad, especialmente debido a los iones cloruros y sulfatos por acción del aerosol marino en su costa norte durante todo el año. Este resultado de velocidad de absorción capilar fue producto de varios factores que actuaron sobre el hormigón, dentro de los principales están la estructura de poros y su estado de humedad. De acuerdo a la NC 967:2013 la velocidad inicial de absorción de agua del hormigón, que depende del diámetro de los poros del hormigón, su interconectividad y tortuosidad.

Según (Nasco 2016) para lograr una buena estructura de poros en el hormigón se debió analizar varios factores tales como el diseño de mezcla del hormigón (relación a/c, contenido de cemento, tipos de agregado y su granulometría), el régimen de curado y la compactación. La humedad del hormigón depende de las condiciones del entorno y la estructura de poros.

Taus (2003) aporta como puede influir la relación agua-cemento en la velocidad de absorción capilar resultados que se muestran en la tabla 3.19.

*Tabla 3.19: Velocidad de absorción capilar según la relación a/c.*

<i>Razón a/c</i>	<i>Velocidad de absorción capilar (g/cm<sup>2</sup>*h<sup>1/2</sup>)</i>
0,40	0,025
0,50	0,032
0,60	0,045

*Fuente: tomado de “Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados” de Valeria Taus.*

Tras el análisis de la Tabla 3.18 el autor observó que la velocidad de absorción capilar determinada en hormigones de diferentes niveles de resistencia y elaborados con el mismo conjunto de materiales, se incrementa a medida que aumenta la relación agua-cemento. Por otra parte la cantidad de cemento viene ligada a la relación a/c antes expuesta, con el aumento de este se vería obligado al uso de mayor cantidad de agua, por lo tanto incrementaría la relación y consigo la sorptividad.

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

Por otra parte se tiene que el tiempo de curado es un factor de suma importancia para garantizar un mejor sellado de los elementos (Castaño 2013). Como se ha dicho anteriormente el régimen de curado es un factor que influye en la sorptividad porque ayuda al mejor sellado del hormigón impidiendo la entrada de agua al mismo.

Por último la compactación se realizó como se ha planteado anteriormente cuidando que se realizara con la mejor calidad posible para evita que este factor tuviera incidencia en la velocidad de absorción capilar. Ello se debe según Howland (2013) a que cuando el hormigón se encuentra en estado plástico, el asentamiento de las partículas sólidas,

producto de la acción gravitatoria, fuerza al agua a dirigirse hacia las partes superiores, generando un gran número de poros interconectados entre sí que constituyen los capilares. Con la ayuda de la compactación, el autor concluyó, que se redistribuyen los componentes del hormigón y disminuyen las oquedades evitando que el agua provoque la creación de poros y aumente la velocidad de absorción capilar.

### **3.6 Resultados del diseño de mezcla 2.**

Teniendo como resultado 39,9 Mpa de resistencia y un rendimiento de 100% se tiene un margen de 4 Mpa para lograr un ahorro de cemento, por esta razón se decidió disminuir 10kg de cemento para un nuevo diseño de mezcla que significaría un ahorro de este material para la Unidad Básica de Servicios de Hormigón y por tanto a nuestro país, garantizando un diseño de mezcla más económico (Los valores del diseño de mezcla dos se encuentran en la tabla 2.1).

#### **3.6.1 Determinación de la resistencia del hormigón del diseño de mezcla 2.**

En este epígrafe se dan a conocer los valores del diseño dos y como en el epígrafe anterior se analizaron los factores que influyen en la resistencia a compresión de este nuevo material.

*Tabla 3.20: Peso de los materiales utilizados en el diseño 2.*

<i><b>Materiales secos</b></i>	<i><b>Peso de los materiales utilizados en el diseño 2</b></i>
<i>Agua</i>	172
<i>Cemento Portland (P-35)</i>	430
<i>Arena (Cantera Arimao)</i>	290
<i>Arena (Cantera A. Maceo)</i>	755
<i>Gravilla 25-10mm (Cantera A. Maceo)</i>	654

<i>Granito 10-5mm (Cantera A. Maceo)</i>	280
<i>Aditivo Sikaplas 9100, cu</i>	3,0
<i>Total</i>	2584

Para este nuevo diseño se obtuvieron los siguientes resultados.

*Tabla 3.21: Resultados de los valores del ensayo de resistencia a compresión a los 7 días.*

Probetas	Resistencia característica a los 7 días (MPa)
FC1	31,3
FC2	30,2
FC3	29,1
Resistencia característica total del lote (MPa)	30,2

*Fuente: Elaborada por el autor con datos de la Unidad Básica de Servicios de Hormigón.*

A los 7 días aporta 30,2 Mpa de resistencia características y un rendimiento de cemento de 0,79 (valor de rendimiento aceptable por el Ministerio de la Construcción).

Sin embargo de acuerdo con la tabla 3.17 se estima que alcance a los 28 días una resistencia de 42 MPa aproximadamente. A los 28 días si cumpliría con la NC 120:2018 y podría ser utilizado este hormigón en zonas de agresividad alta.

Diversos fueron los factores que influyeron en la resistencia a la compresion y como se había planteado anteriormente se disminuyó 10 kg de cemento al nuevo diseño algo que disminuyó la resistencia que se quería alcanzar porque según Kumar (2006) en la medida en que se quiera incrementar la resistencia del concreto, la cantidad de los cementos a utilizar debe ser mayor.

La relación a/c se mantuvo constante con respecto al diseño anterior, pero al disminuir el cemento se disminuyó también el agua porque según Guevara (2012) el agua y su relación con el cemento están altamente ligados a una gran cantidad de propiedades del material final que se obtendrá. El autor consideró que entre las propiedades que disminuyen está la resistencia a compresión.

Otro de los factores que influye enormemente en la resistencia final del hormigón son las características de los áridos. Como se planteó anteriormente se aumentó la cantidad de arena a utilizar y según Sepulveda (2013) la superficie de contacto, por unidad de volumen del concreto, es tanto mayor mientras menor es el tamaño máximo de los agregados. El autor concluye que el aumento de esta superficie de contacto conlleva al uso de más agua en la mezcla disminuyendo así los valores de resistencia.

El aditivo que se utilizó fue el mismo que en el diseño anterior pero con menor cantidad, el cual aporta una alta laborabilidad sin exceso de agua para aumentar las resistencias. El empleo de menor cantidad de aditivo pudo haber ocasionado una disminución de las resistencias con respecto al diseño anterior.

### **3.7 Conclusiones parciales.**

1. Las propiedades medidas en el árido grueso utilizado cumplieron con lo establecido en la NC 251:2018 a excepción de granulometría, pesos específicos y porcentos de absorción, mientras que en el árido fino solamente no cumplieron los pesos específicos y porcentos de absorción.
2. Las propiedades físicas y mecánicas medidas del cemento cumplieron con lo establecido en la NC 95:2017.
3. En el diseño de mezcla 1 la consistencia medida en estado fresco clasificó a la mezcla como muy fluida, mientras que en estado endurecido la resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón cumplieron con la NC 120:2018.
4. En el diseño de mezcla 2 la propiedad de resistencia a la compresión cumplió con la NC 120:2018.



## **Conclusiones generales.**

1. Para analizar si el rendimiento de cemento cumple con lo establecido el diseño de mezcla utilizado debe garantizar que el hormigón cumpla con las propiedades que definen durabilidad dentro de las que encontramos resistencia a la compresión porosidad y velocidad de absorción capilar.
2. La caracterización de los materiales utilizando los métodos experimentales permitieron obtener los resultados en árido y hormigón los cuales fueron comparados teniendo en cuenta los requerimientos.
3. Las propiedades de granulometría, pesos específicos y porcentos de absorción influyeron en las propiedades de resistencia, porosidad y sorptividad del hormigón.
4. El diseño de mezcla recomendado el cual tiene un menor contenido de cemento cumple con el criterio de resistencia planteado por la NC 120:2018 por lo tanto permite un aumento del rendimiento de cemento.

## **Recomendaciones.**

1. Se recomienda a la Unidad Básica de Servicios de Hormigón de Varadero que continúe esta investigación con un mayor número de probetas.
2. Se recomienda otras procedencias de materiales para los diseños de mezclas.
3. Aplicar métodos de algoritmos genéticos para obtener dosificaciones ideales para las condiciones.

## Referencias bibliográficas.

ASOCEM, (2015), "Panorama Mundial De La Industria Del Cemento", The Global Cement Report - International Cement Review, Banco Mundial y FMI.

Bolívar, O. G. (1987). "Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón".

Bernal, André, (2012), "Los áridos y su influencia en el concreto", Talleres Gráficos Soler, S.A., 2008, Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA).

Cánoves Valiente, Jacinto, (2012), Evolución de la resistencia del hormigón de obra métodos de predicción a partir de los ensayos de control de la conformidad del hormigón", Tesis Doctoral, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad Politécnica de Valencia.

Castaño Tabares, Jesús Orlando, (2013), "Caracterización mecánica y de durabilidad de concretos de alto desempeño", Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana.

Coapaza Aguilar, Hernan, (2018), "Influencia del aditivo superplastificante en las propiedades del concreto  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> como alternativa de mejora en los vaciados de techos de vivienda autoconstruidos en puno", Trabajo de diploma, Universidad Nacional del Altiplano, Escuela Profesional de Ingeniería Civil.

Clase Construcción y Estructura Náutica, (2015), "El Hormigón", Publicado online.

Díaz Gómez, Mercedes, (2012), "Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la retracción por secado", Trabajo De Diploma, Facultad De Construcciones Departamento De Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de las villas.

Díaz Gómez, Mercedes, (2012), "Evaluación de la fisuración de hormigones en zonas marinas, producto de cambios autógenos de volumen, específicamente debidos a la

- retracción por secado”, Trabajo de diploma, Facultad de Construcciones Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- Fernández Canovas, Manuel, (2014), “Los Aditivos”, Trabajo De Diploma, Escuela Ingeniería en Construcción – UCV.
- Gayoso Blanco, Regino & Herrera de la Rosa, Rosa, (2007), “Áridos para Hormigón. Especificaciones y Ensayos”, Curso Áridos para Hormigón. Especificaciones y Ensayo, CTDMC.
- Guevara Fallas, Génesis, (2011), “Efecto de la variación agua/cemento en el concreto”, Tecnología en Marcha, Vol. 25, Nº 2, Pág 80-86.
- Howland, Juan José, (2013), “Estudio de la absorción capilar y la sorptividad de hormigones con áridos calizos cubanos”, Publicado online.
- Ingeplan, (2014), “Aguas”, Pliego De Prescripciones Técnicas Particulares, capítulo II, art. 280.
- Imbaquingo Cachorro, Andrea Jacqueline, (2012), “Diseño de hormigón de alto desempeño”, Trabajo De Diploma, Escuela Politécnica del Ejército.
- Kumar Mehta, P y Monteiro, Paulo (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. (pp. 54 ) New York: McGraw-Hill.
- Lichtner, B. (1974), “Medidas de porosidad en mortero de cemento y en hormigón”, Materiales de Construcción, Vol. 24.
- Lima Franco, Orlando & Hernández Calzadilla, Aymara, (2015), “Materiales Y Productos para la Construcción”, Ciencia y Sociedad, vol. XXXXV.
- Laura Huanca, Samuel, (2006), “Diseño de Mezclas de Concreto”, Trabajo de diploma, Universidad Nacional del Altiplano.
- NC 178: 2002,”Áridos. Análisis Granulométrico”, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

- NC 181: 2002, "Áridos. Determinación del peso volumétrico. Método de ensayo", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 186: 2002, "Arena. Peso específico y absorción de agua. Método de ensayo", Método de ensayo", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 190:2002, "Árido grueso. Determinación del índice de triturabilidad", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 174:2002 "Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono" Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 207:2003, "Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC: 228-1.2005, "Aditivos para hormigones, morteros y pastas", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 657: 2008, "Áridos para morteros de albañilería. Especificaciones, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 345: 2011, "Hormigón endurecido. Absorción de agua por capilaridad. Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 885: 2012, "Áridos. Evaluación de finos. Ensayo del azul de metileno", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 192:2012 "Hormigón hidráulico. Cálculo de la resistencia característica real a la compresión", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 967:2013, "Hormigón hidráulico. Absorción del agua", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.
- NC 506:2013 "Cemento hidráulico. Resistencia mecánica", Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC 524: 2015,” Hormigón hidráulico. Método de ensayo. Determinación de la consistencia normal y tiempo de fraguado por aguja Vicat”, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC 724: 2015,”Ensayos de hormigón. Resistencia del hormigón en estado endurecido”, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC 95: 2017, “Cemento Portland. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC 120: 2018“Hormigón hidráulico. Especificaciones. Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC 251: 2018, “Áridos para hormigones hidráulicos. Requisitos”, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

NC-ISO 1920-3, “Ensayos al hormigón. Elaboración y curado para ensayos”, Oficina Nacional de Normalización, Ciudad de La Habana, Cuba.

Niño Sandoval, Werner Adolfo, (2013), “Caracterización mecánica y de durabilidad de concretos de alto desempeño”, Trabajo de diploma, Facultad De Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana Bogotá D.C.

Nasco Díaz, Alberto Gabriel, (2016),” Evaluación del transporte de iones cloruros en especímenes de hormigón hidráulico producidos con cementos de bajo carbono LC3”, Trabajo De Diploma, Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Olivares, M., (2004), “Evaluación de la resistencia mecánica de un hormigón según su porosidad”, Departamento de Construcciones arquitectónicas, Escuela Técnica Superior de arquitectura de Sevilla.

Payá, Valcuende, (2017), “Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura”, Trabajo de diploma, Universidad politécnica de Valencia.

- Rodríguez Martínez, Oris, (2013), “Actividad puzolánica en pastas con adiciones de zeolitas, aditivo superplastificante y su combinación”, Trabajo de Diploma, Facultad de Ingenierías Departamento de Construcciones, Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”.
- Ramírez Pérez, Jany, (2015), “Estudio de factibilidad técnico-financiero de las alternativas de inversión para la industria cementera cubana a corto, mediano y largo plazo”, Trabajo De Diploma, Facultad De Ciencias Económicas Departamento De Economía, Universidad central "Marta Abreu" de las villas.
- Sepulveda, Amanda, (2013), “Factores Determinantes De La Resistencia A Compresión Del Concreto”, Trabajo De Diploma, National University of Colombia.
- Taus, Valeria, (2003), “Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados”, Ciencia y Tecnología del Hormigón, Vol. 26.
- Toirac Corral, José, (2009), “La resistencia a compresión del hormigón, condición necesaria pero no suficiente para el logro de la durabilidad de las obras”, Ciencia y Sociedad, vol. XXXIV, pp. 463-504.
- Villanueva Rodríguez, Tomás, (2008), “Los áridos”, Talleres Gráficos Soler, S.A., 2008, Sociedad de Investigación y Explotación Minera de Castilla y León (SIEMCALSA).
- Vizcaíno Andrés, Maday, (2014), “Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada – caliza”, Tesis Doctoral Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.
- Vargas Leyva, Aylín, (2017), “Diseño de una investigación experimental”, Trabajo de diploma, Facultad De Ingeniería Departamento De Construcciones, Universidad Tecnológica De La Habana “José Antonio Echeverría”.