

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Evaluación de métodos de diseño de hormigón basados en las características de los materiales usados en la región central de Cuba.

Autor: Henriqueta Nankali Bimba Fernando

Tutores: Divanis Manuel Rodríguez Gutiérrez

Juan José Dopico Montes de Oca

Santa Clara, Junio, 2019
Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

DIPLOMA THESIS

Title: Evaluation of concrete mix design methods based on the characteristics of the materials used in the central region of Cuba.

Author: Henriqueta Nankali Bimba Fernando

Thesis Director: Divanis Manuel Rodríguez Gutiérrez

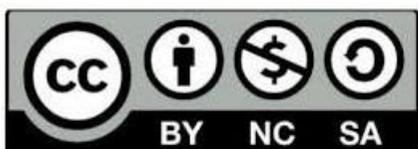
Juan José Dopico Montes de Oca

Santa Clara, June, 2019
Copyright©UCLV

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

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

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

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Agradecimientos

A Dios padre todo poderoso por su infinito e incondicional amor.

A mis padres, Juliana María Salomé Moapulungundja y Manuel Bimba Fernando, por todo lo que por mi hicieron y hacen hasta hoy, pues que sin ellos no fuera posible este logro en mi vida.

A mis hermanos por su amor y apoyo en todos los momentos.

A Flavio Tiopi Miguel, Dimas Germano, Marilia Baptista, Aurea Nunes, Edna Perestrelo, Indira Mayer, Juliana Escrita, Evaristo Paz, Sebastião Paz, Víctor Mundombe, Eduardo Luís, Vandemberg Bras, por su amor y amistad paciencia y gran apoyo durante todos estos años.

A los funcionarios de la Empresa de construcción y montaje de pre fabricado de Sancti Spiritus, en particular los ingenieros Jorge Leonel Ortiz Hernández y Juan Fritze Balmaceda.

A todos mis profesores, no solo los que me han impartido clase como también a todos que de una u otra forma contribuyeron para mi formación, en especial mis tutores.

E a todos los que no he mencionado pero que contribuyeron a que esto se tornara realidad.

Dedicatoria

A mis padres que con mucho esfuerzo todo lo hicieron para que nunca me faltara lo necesario, que me enseñaron el camino no solo con palabras sino con hechos lo que fue mui importante para que me volviera la mujer que soy.

FRASE

*“Ante una patología, primero que los ingenieros miren si hay flechas, si no las hay, llamar a los químicos a ver si son los cloruros o la carbonatación y si no lo son que Dios nos coja a todos confesados porque son los *áridos*”*

(ROCÍO LAPUENTE ARAGÓ)

RESUMEN

El presente trabajo de diploma refleja la evaluación por tres de los métodos de dosificación, ACI, O'Reilly y Toufar, de la influencia en el comportamiento del hormigón, el uso de los áridos de la región central de Cuba específicamente de la provincia de Sancti Spiritus. Se hicieron varias pruebas cambiando el método de dosificación lo que permitió identificar para cada método la consistencia y la resistencia alcanzadas. Por ello se pudo concluir que al cambiar el método de dosificación se modifica la cantidad de cada componente de hormigón y que las propiedades consistencia y resistencia son directamente afectados, principalmente por la relación a/c derivada de cada método.

Palabras claves: Métodos de dosificación, Resistencia, Asentamiento, consistencia, influencia.

ABSTRACT

The present work of diploma reflects the evaluation by three methods of dosage, ACI, O'Reilly and Toufar, the influence on the behavior of concrete, the use of the aggregates of the central region of Cuba specifically the province of Sancti Spiritus. Several tests were made changing the dosing method, which allowed to identify for each method the consistency and resistance reached. Therefore, it could be concluded that changing the dosing method modifies the quality of each concrete component and that the consistency and resistance properties are directly affected, mainly due to the water/cement ratio derived from each method.

Keywords: Dosage methods, resistance, settlement, consistency, influence.

ÍNDICE.

Introducción	1
1.1. El hormigón. Componentes y generalidades	5
1.1.1. Áridos, origen y tipos.	5
1.1.1.2. Importancia del estudio de las propiedades de los áridos para la elaboración de hormigones Hidráulicos.	10
1.1.1.3. Características de los áridos.....	10
1.1.1.4. Influencia de la forma y textura superficial de las partículas	12
1.1.1.5. Propiedades de los áridos y su influencia al hormigón	12
1.1.3. Adición	14
1.1.4. Aditivo	14
1.2. Relación Agua-Material Cementante	14
1.3. Métodos de diseño para la dosificación de las mezclas de hormigón	15
1.3.1. Generalidades	15
1.3.2. Clasificación de los métodos de diseño de mezcla.....	15
1.3.3. Reseña histórica de los métodos de diseño de mezclas de hormigón.....	16
1.3.4. Principales cualidades que se le exigen al concreto, a considerar en el proceso de dosificación:	17
1.3.5. Métodos teóricos y analíticos	18
1.3.6. Métodos experimentales	19
1.3.7. Optimización de las dosificaciones de las mezclas de hormigón, la economía de las mezclas de concreto	20
1.3.8. Diseño mediante programas computacionales.	20
1.4. Dosificación del hormigón y su influencia en la segregación	22
1.5. Conclusiones parciales.	23
Capítulo II: Diseño experimental de mezcla de hormigón con el empleo de diferentes métodos.	24
2.1. Caracterización de los materiales componentes	24
2.1.1. Materiales cementicos	24
2.1.2. Áridos	26
2.1.3. Agua	29

2.1.4. Aditivo	29
2.2. Diseño experimental de la investigación.	30
2.3. Descripción de procedimientos	31
2.3.1. Elaboración de hormigón para probetas a ensayar	31
2.4. Conclusiones parciales	37
Capitulo III: Análisis y discusión de los resultados.	38
3.1. Ensayos Reológicos	38
3.1.2. Confección de especímenes de hormigón.	39
3.1.3. Curado de las probetas.	40
3.1.4. Resistencia mecánica a compresión a edades de 3, 7 y 28 días.	40
3.1.5. Análisis de los valores de asentamiento.	41
3.2. La cantidad de cemento en los tres métodos analizados, O´Reilly y ACI.	43
3.3. Relación agua/cemento en los tres métodos analizados, O´Reilly y ACI.	44
3.4. Resultados de resistencias del Hormigón.	46
3.4.1. Valoración de la influencia del uso de aditivos y adiciones en la resistencia del hormigón a diferentes edades.	48
3.4.2. Comparación de la resistencia en los dos métodos analizados, O´Reilly y ACI.	50
3.5. Conclusiones parciales	52
Conclusiones generales	53
Recomendaciones	54
BIBLIOGRAFÍA	55
ANEXOS	57

Introducción

Ese polvo fino tan fino de apariencia simple y extraordinarias propiedades que denominan cemento Portland, es el constituyente fundamental del material constructivo más utilizado en el mundo: el hormigón. Su desarrollo ha sido tan grande que domina y caracteriza a la ingeniería y la arquitectura de este siglo y, ha de proseguir pues no existe aglomerante hidráulico de mejores características (Bloem, 1961; Glanville., Collins., & Matthews., 1938; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004; Lenhard, 1942).

Con la invención del cemento Portland en 1824, las investigaciones científico-técnicas desarrolladas con los materiales de construcción se trataron de establecer, a fines del siglo XIX, leyes que permitieran determinar las proporciones del hormigón mediante las relaciones del contenido de cemento, los vacíos y la resistencia (Jiménez, García, & Morán, 1991; Kosmatka et al., 2004).

Existen distintos métodos de diseño de mezclas de hormigón hidráulico, entre los que se encuentran el método de Bolomey, Faury, De la Peña, Skrantaev, ACI y otros, que han sido utilizados y se utilizan hoy en diversas partes del mundo. En Cuba se ha desarrollado el método de O'Reilly, que es el que está establecido para su uso por el Ministerio de la Construcción y que se encuentra normado para Cuba (Herrero, 1968 ; O'Reilly, 2007).

En cada país, en dependencia de las condiciones tecnológicas parciales y las características de las materias primas locales, se utilizan con preferencia alguno de los métodos arriba mencionados. Hasta el momento en Cuba se han utilizado mayormente los métodos de Bolomey y O'Reilly, pero en las últimas décadas se ha establecido el empleo del segundo, dada las características particulares que presentan los áridos en Cuba. En este sentido, los resultados obtenidos con el empleo de este método han sido muy exitosos, garantizando ahorros considerables de cemento.

Al analizar las maneras por las que se dosifica en Cuba, las características de los materiales usados y su proceso tecnológico de producción, sin herramientas que pueda hacer mucho más sencilla la manera de crear una mezcla garantizando mejores propiedades mecánicas a diferentes edades, así como su durabilidad ante los agentes corrosivos, nos proponemos realizar varios diseños por diferentes métodos utilizados en el mundo y definir para nuestras

características el de mejores prestaciones. Bajo este escenario surge **el problema científico**:

¿Cómo influye desde el punto de vista físico-mecánico y reológico el empleo de distintos métodos de diseño de mezclas de hormigón con las características de los materiales más usados en Cuba?

Objeto de la Investigación:

Diseño de mezclas de hormigón.

Campo de acción:

Diseño de mezclas de hormigón por los métodos ACI, O'Reily y Tufour.

Objetivo General:

Obtener hormigones estructurales a partir de aplicar los métodos de diseño de mezcla de hormigones con las características de los materiales de Cuba (cemento P-35, CL-2, aditivos y áridos de la cantera algaba), cumpliendo con los parámetros físico-mecánicos-reológicos.

Objetivos Específicos:

1. Analizar el estado de arte sobre métodos de dosificación de hormigones en uso internacionalmente.
2. Caracterización de los materiales usados en la elaboración de hormigones en la Empresa de pre fabricado de Sanctí Spiritus (áridos, cemento, agua).
3. Valorar la influencia de los materiales utilizados en la resistencia de hormigones diseñados por diferentes métodos de dosificación de hormigones.

Hipótesis:

Si se emplean distintos métodos de diseño de dosificación de hormigón se puede evaluar la influencia de los materiales utilizados, en las características físico-mecánicas de los hormigones obtenidos.

Novedad Científica:

Con el diseño y prueba experimental de dosificaciones de mezclas de hormigón por diferentes métodos, se logra evaluar la influencia de los materiales utilizados en las propiedades de los hormigones obtenidos.

Aportes de la Investigación:

Prácticos

A partir de esta investigación se puede conocer el comportamiento del hormigón elaborado aplicando diferentes métodos de dosificación, con los áridos que se utilizan específicamente en la provincia de Sancti Spíritus.

Económico

El diseño de una buena mezcla de hormigón generará ahorros sustanciales en la utilización de combustibles y recursos minerales, permitiendo lograr mayor durabilidad y resistencia al ataque de agentes patógenos externos.

Medio ambiental

La generalización de un método para dosificar hormigones permite disminuir los índices de consumo de cemento provocando una reducción de emisiones de CO₂ a niveles superiores al 20-30% sin necesidad de realizar grandes inversiones.

Población y Muestras:

Se realizarán de cada mezcla obtenida con cada método de diseño aplicando un total de 3 réplicas, de nueve probetas cada una, para ser ensayadas a las edades de 3, 7 y 28 días. En este caso por ser un experimento la muestra coincide con la población.

Métodos de Investigación:

- El método histórico lógico en la realización de estudios sobre la evolución de los métodos de diseño de hormigones.
- El método de análisis-síntesis e inductivo deductivo para la evaluación de la experiencia internacional referente al diseño de hormigones.

- El método experimental en la realización de los diferentes ensayos de laboratorio para las mezclas de hormigón según las normas cubanas.
- Métodos estadísticos en el establecimiento de la interpretación y optimización de resultados para otorgarle a los diferentes ensayos realizados un grado de confiabilidad alto.

Estructura de los Capítulos:

- Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre el empleo de diferentes métodos de dosificaciones de hormigón.

Se realizará una caracterización de los métodos ACI, O'Reilly, Tufour. Realizando un bosquejo de las características principales de la cantera de áridos Algaba en Trinidad de la provincia Sancti Spiritus, en Cuba.

- Capítulo II: Diseño experimental de mezcla de hormigón con el empleo de diferentes métodos.

Se realizará una selección y agrupación por tipos de cemento, tipos de áridos y granulometrías con el fin de realizar una serie de diseños de mezclas por los métodos ACI, O'Reilly, Tufour.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados.

Se analizarán los resultados con los parámetros físico-mecánicos-reológicos determinando y los métodos más factibles a utilizar

Resultados esperados.

Con la presente investigación esperamos generalizar y fomentar un método para el diseño de mezclas de hormigón con las características deseadas para cada uno de los casos puntuales que se presentan a diario en las industrias productoras de Hormigón.

Capítulo I: Fundamentos teóricos sobre el empleo de diferentes métodos de dosificaciones de hormigón

1.1. El hormigón. Componentes y generalidades

El hormigón hidráulico es un material heterogéneo compuesto por distintos elementos como el cemento, en ocasiones aditivos, el agua y los agregados. Este último se detallará más en su aporte a la mezcla de hormigón y qué cantidades de cada elemento componen la misma (Cristina, Nicolas, Camila, & Julieth, 2017).

Inventado en 1824 el cemento Portland es un polvo fino compuesto principalmente de silicatos hidráulicos de calcio que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el hormigón (Jiménez et al., 1991; José, 2004; Kosmatka et al., 2004).

El hormigón debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estanque y resistente al desgaste. Estas calidades se las puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, preferiblemente el uso de aditivos (a excepción de los inclusores de aire cuando sean necesarios), que son ingredientes del hormigón que, además del cemento Portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado para mejorar ciertas propiedades según lo deseado y los hay de distintos tipos para diferentes funciones (Jiménez et al., 1991).

La importancia del uso, el tipo y de la calidad correcta del árido no se puede subestimar ya que estos ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del hormigón e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en la economía del hormigón (Blanco, 2006; Jiménez et al., 1991; José, 2004; Kosmatka et al., 2004).

1.1.1. Áridos, origen y tipos.

Los agregados finos generalmente consisten en arena natural o piedra triturada con la mayoría de sus partículas menores que 5 mm (0.2 pulgada.). Los agregados gruesos consisten en una o en la combinación de gravas o piedras trituradas con partículas predominantemente mayores que 5 mm (0.2 pulgada.) y generalmente entre 9.5 mm y 37.5 mm (3/8 y 1 1/2 pulgada.) Algunos depósitos naturales de agregado, llamados de gravas de mina, consisten en grava y arena que se pueden usar inmediatamente en el hormigón,

después de un procesamiento mínimo(Cristina et al., 2017; Jiménez et al., 1991; José, 2004).

Las gravas y las arenas naturales normalmente se excavan o dragan de la mina, del río, del lago o del lecho marino. La piedra triturada se produce triturando la roca de cantera. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se usa como agregados fino y grueso(Kosmatka et al., 2004).

Los agregados frecuentemente se lavan y se gradúan en la mina o en la planta. Se puede esperar alguna variación en el tipo, calidad, limpieza, granulometría, contenido de humedad y otras propiedades(Cristina et al., 2017; Chile, 2002).

Los agregados naturales para hormigón son una mezcla de rocas y minerales. Mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de límites estrechos. Las rocas, se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen con varios minerales. Por ejemplo, el granito contiene cuarzo, feldespato, mica y otros pocos minerales, la mayoría de las calizas consiste en calcita, dolomita y pequeñas cantidades de cuarzo, feldespato y arcilla. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo y arcilla(Chile, 2002; Gámez, Saldaña, & Corral, 2017; Steopoe, 1968).

1.1.1.1. Influencia del árido sobre la resistencia de los hormigones

El francés R. Feret (1896) fue el primer investigador que propuso un método para calcular la resistencia del hormigón en función de los materiales que lo componen, expresado como sigue:

$$R_c = k \left(\frac{c}{1 - (s + g)} \right)^2$$

Donde R_c es la resistencia a compresión del hormigón;

c , s y g , los volúmenes absolutos del cemento, de la arena y de la grava;

k un coeficiente que depende de la calidad del cemento.

Bolomey, (1925) propuso un nuevo método, en la cual los elementos del hormigón se consideran en peso. Para hormigones compactos, la expresión es la siguiente:

$$R_c = k \left(\frac{c}{g} - 0.50 \right)$$

Bolomey en nuevos estudios posteriores, llama la atención sobre la influencia de los áridos, que no sólo intervienen por su cantidad, sino también por su composición granulométrica, que modifica la cantidad necesaria de agua de amasado, y el límite máximo del árido. Sus conclusiones se basarán en el estudio sobre seis composiciones granulométricas realizadas según Fuller, en las cuales varió el tamaño máximo del árido, obteniendo los resultados siguientes, con hormigones de consistencia plástica y una dosificación de 300 kg de cemento por m³ de hormigón:

Tabla 1.1 Resumen de resultados obtenidos por Bolomey para comprobar la influencia de los áridos en las propiedades del hormigón.

Límites del árido (mm)	0/4	0/8	0/15	0/30	0/60	0/120
Agua de amasado (kg/m ³)	253	214	202	165	157	136
Peso volúmico (kg/m ³)	2.173	2.260	2.317	2.385	2.447	2.476
Resistencia a compresión a los 28 días (kg/cm ²)	88	108	131	201	205	262

De acuerdo con los resultados obtenidos concluyó que el agua de amasado necesaria viene determinada por el tamaño máximo del árido y trató de calcular esta cantidad de agua teniendo en cuenta el módulo de finura de Abrams, para tal, él determinó experimentalmente distintos coeficientes en función de la finura y la naturaleza del árido.

Según Gilkey en ACI Journ, de 1927, para una misma consistencia, la introducción de grava en un mortero lleva a la disminución de su resistencia(Steopoe, 1968).

O. Graf en Aufbau des Morteles und des Betons, Berling 1930, págs. 3-4, ha sostenido que la resistencia del hormigón depende, en primer lugar, de la resistencia de su mortero y que, introduciendo grava o piedra triturada en un mortero sin cambiar la relación agua/cemento, la resistencia permanece prácticamente constante. Como ejemplo ha presentado los siguientes resultados:

Tabla 1. 2: Resultados de resistencia a la compresión

Paso del tamiz	5	15	25 mm
Curva I	40	72	100
Curva II	55	82	100
Curva III	70	92	100

En la tabla que sigue se presentan los resultados donde se confirma que para mantener la consistencia constante introduciendo grava al mortero, se requiere aumentar la relación agua-cemento lo que provoca una disminución de la resistencia(Steopoe, 1968).

Mortero inicial	Composición del árido (mm)			e/c	Escu-rrimiento (cm)	R _c (28 días) (kg/cm ²)
	0/5	5/15	15/25			
1 : 2,4	40	—	—	0,50	48	448 —
	40	32	—	0,60	46	326 (— 27 %)
	40	32	28	0,66	47	241 (— 46 %)
1 : 3,3	55	—	—	0,64	51	289 —
	55	27	—	0,70	49	269 (— 7 %)
	55	27	18	0,70	43	235 (— 18 %)
1 : 4,8	70	—	—	0,74	50	254 —
	70	22	—	0,79	48	202 (— 20 %)
	70	22	8	0,79	44	180 (— 29 %)

Casi en la misma época aparecieron dos estudios en los cuales se afirmaba que, la relación agua/cemento constante, la resistencia del hormigón a la compresión es independiente de la composición granulométrica del árido si la compactación se hace cuidadosamente, pero esta compactación necesita un trabajo mecánico tanto más prolongado cuanto más arena contiene el árido (Glanville. et al., 1938; Lenhard, 1942).

Cant fue el primero que señaló la influencia de la relación arena/grava sobre las propiedades del hormigón (Cant, 1930 ; Pef. Graf, 1930)

Esta influencia se manifiesta no sólo sobre la resistencia, sino también sobre todas las características de los hormigones. Para demostrarlo, el autor muestra en la Tabla 3 los resultados de sus investigaciones realizadas con dos variedades de arena, que se

sustituyen progresivamente en la fracción 7/15 del árido. Los ensayos se realizaron sobre probetas prismáticas de 10 cm X 10 cm X 55 cm. El autor indica que, de los resultados se deduce que aumentando la cantidad de arena en hormigones plásticos con la misma dosificación en peso 1: 6, por el hecho de aumentar la superficie total del árido aumentan la relación agua/cemento y la retracción, en tanto, que el peso volumétrico, la dosificación real y la resistencia a la compresión disminuyen(Steopoe, 1968).

Arena 0/3 mm	Composición % del árido	0/3 mm 7/15 mm 15/30 mm	30 20 50	40 10 50	50 — 50	Diferencia % entre los extremos
	Hormigón fresco	<i>e/c</i> <i>c/m³</i> Peso vol.	0,55 331 2.502	0,60 321 2.443	0,67 308 2.369	+ 21 % — 7 % — 5 %
	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	28 días 56 días	179 188	132 147	124 128	— 30 % — 32 %
	Retracción (mm/m)	28 días 56 días	0,16 0,23	0,22 0,34	0,25 0,36	+ 56 % + 56 %
Arena 0/7 mm	Composición % del árido	0/7 mm 7/15 mm 15/30 mm	30 20 50	40 10 50	50 — 50	Diferencia % entre los extremos
	Hormigón fresco	<i>e/c</i> <i>c/m³</i> Peso vol.	0,52 329 2.477	0,59 320 2.474	0,62 317 2.420	+ 19 % — 4 % — 2 %
	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	28 días 56 días	163 203	118 159	111 147	— 31 % — 27 %
	Retracción (mm/m)	28 días 56 días	0,13 0,25	0,15 0,30	0,18 0,31	+ 38 % + 24 %

La influencia del tamaño máximo del árido depende también de la dosificación del hormigón (Bloem & Gaynor, 1960). Hormigones de la misma dosificación y consistencia tienen una resistencia tanto más reducida cuanto más elevado es el límite superior del árido (Walker & Bloem, 1960). Y se ha demostrado que con la misma relación agua/cemento y la misma dosificación, no es el hormigón con árido más grueso el de más alta resistencia (Bloem, 1961).

Para alcanzar altas resistencias a la compresión, la dosificación de cemento no debe determinarse por el volumen de los huecos del árido, sino por la superficie total de sus gránulos (Zollinger, 1961).

1.1.1.2. Importancia del estudio de las propiedades de los áridos para la elaboración de hormigones Hidráulicos.

Resulta importante estudiar las características de los áridos pues mientras mejor sea la gradación de los áridos, menor será el volumen de vacíos y menor la cantidad de pasta de cemento para llenar tales vacíos. Además del agua de hidratación se necesita agua para humedecer la superficie de los áridos. Al adicionar agua a la mezcla aumenta la plasticidad y fluidez de la mezcla, pero disminuye la resistencia debido al mayor volumen de vacíos creados por el agua libre. Para reducir el agua libre y mantener la laborabilidad, es necesario agregar cemento, así, desde el punto de vista de la pasta de cemento, la relación agua cemento es factor principal en el control de resistencia del hormigón. Para una relación agua cemento dada se selecciona la mínima cantidad de cemento que asegure la laborabilidad deseada (Kosmatka et al., 2004).

La relación agua-cemento influye de manera decisiva en la resistencia a la compresión del hormigón. Su influencia sobre la resistencia a la tensión, medida a través de la resistencia nominal a flexión o módulo de rotura, es pronunciada pero mucho menor que su efecto sobre la resistencia a la compresión del hormigón. Esto parece ser así porque, además de la relación de vacíos, la resistencia a tensión depende en gran medida de la resistencia de adherencia entre el árido grueso y el mortero de cemento. De acuerdo con los ensayos realizados en la Universidad de Cornell, la resistencia a la adherencia se ve relativamente poco afectada por la relación agua cemento (Smith, 1998).

La investigación mostró que la dosis de agua, la curva granulométrica del árido combinado y la forma del árido son variables significativas en la trabajabilidad y resistencia de los hormigones. En la evaluación de la trabajabilidad del hormigón fresco, la curva granulométrica del árido combinado es una variable más significativa que la forma del árido, que sí tiene un efecto significativo sobre la resistencia del hormigón endurecido. Se puede concluir que, a igualdad en trabajabilidad, la calidad del árido afecta fuertemente la resistencia del hormigón (Walker & Bloem, 1960).

1.1.1.3. Características de los áridos

Granulometría (Gradación)

La granulometría es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices. La variación del tamaño de partículas se

muestra en la Figura 1.1. El tamaño de la partícula del agregado se determina por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices normalizados para el agregado fino tienen aberturas que varían de 150 μm a 9.5 mm (Tamiz No.100 a 3/8 pulgada) (Kosmatka et al., 2004)



Figura 1.1: Áridos con distintos tamaños.

La granulometría y los límites granulométricos se expresan generalmente en porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz. La Figura 1.2, muestra estos límites para el agregado fino y un tamaño de agregado grueso (Kosmatka et al., 2004).

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, bien como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, economía, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del hormigón. Las variaciones en la granulometría pueden afectar seriamente la uniformidad del hormigón de una amasada a otra. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad. En general, los agregados que no tienen una gran deficiencia o exceso de cualquier tamaño y presentan una curva granulométrica suave, producirán los resultados más satisfactorios. (Kosmatka et al., 2004; NC 251, 2013)

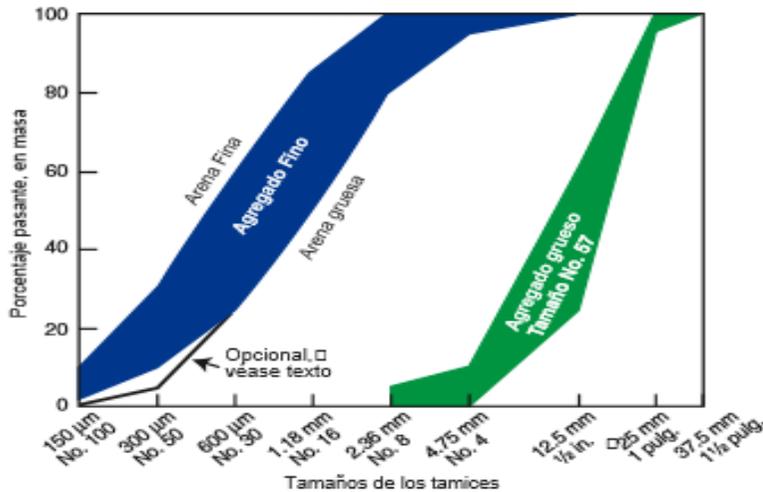


Figura 1.2: Curvas que indican los límites especificados en la AASHTO, para el agregado fino y para tamaño granulométrico de agregado grueso comúnmente utilizado.

1.1.1.4. Influencia de la forma y textura superficial de las partículas

La forma y la textura superficial de las partículas de un agregado, influyen en las propiedades del hormigón fresco más que las del hormigón endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más agua para producir un hormigón trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregado angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Sin embargo, con la granulometría satisfactoria, tanto los agregados triturados como los no triturados (de un mismo tipo de roca), generalmente, producen hormigones con la misma resistencia, si se mantiene el contenido de cemento. (Kosmatka et al., 2004)

1.1.1.5. Propiedades de los áridos y su influencia al hormigón

Densidad

La densidad de las partículas que se usa en los cálculos de proporcionamiento (no incluyen los vacíos entre las partículas) se determina por la multiplicación de la densidad relativa (gravedad específica) de los agregados por la densidad del agua. Se usa un valor aproximado para la densidad del agua de aproximadamente 1000 kg/m³ (62.4 lb/pie³). La densidad del agregado, juntamente con valores más precisos de la densidad del agua, se presenta en las normas ASTM C 127 (AASHTO T 85) y ASTM C 128 (AASHTO T 84). La densidad de las partículas de la mayoría de los agregados naturales está entre 2400 y 2900 kg/m³ (150 y 181 lb/pie³) (Kosmatka et al., 2004)

Densidad Relativa (Densidad Absoluta, Gravedad Específica)

La densidad relativa (densidad absoluta, gravedad específica) de un agregado es la relación entre su masa y la masa de agua con el mismo volumen absoluto. Se usa en algunos cálculos de proporcionamiento y del control de la mezcla, tales como el volumen ocupado por el agregado en el método del volumen absoluto de diseño de mezcla. Normalmente no se usa como una medida de la calidad del agregado, aunque algunos agregados porosos que exhiben deterioro acelerado por congelación-deshielo presentan baja gravedad específica. (Kosmatka et al., 2004)

Densidad Suelta (Peso Volumétrico, Peso Unitario, Masa Unitaria, Peso Específico) y Vacíos

La densidad suelta (peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria, peso específico, densidad a granel) de un agregado es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen a que se refiere aquí es aquél ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas de agregado. La densidad suelta aproximada del agregado comúnmente usado en el hormigón de peso normal varía de 1200 a 1750 kg/m³ (75 a 110 lb/pie³). La cantidad de vacíos entre las partículas afecta la demanda de pasta en el diseño de la mezcla (véase la sección anterior, "Forma y Textura Superficial de las Partículas"). La cantidad de vacíos varía de cerca del 30% a 45% para el agregado grueso y de cerca del 40% a 50% para el agregado fino. La angulosidad aumenta la cantidad de vacíos, mientras que los tamaños mayores de un agregado bien graduado y la mejoría de la granulometría disminuyen el contenido de vacíos. Los métodos para la determinación de la densidad del agregado y el contenido de vacíos se encuentran en las normas ASTM C 29 (AASHTO T 19), COVENIN 0274, COVENIN 0263, IRAM 1548, NMX-C-073, NTC 92, NTP 400.017, UNIT-NM 45, NC 251. En estas normas, se describen tres métodos para la consolidación del agregado en el recipiente, dependiendo del tamaño máximo del agregado: varillado, sacudido y vaciado con pala (Kosmatka et al., 2004; NC 251, 2013).

1.1.2. Cemento

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos se hidratan y se endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la

pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada piedra machacada, grava u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el hormigón, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (José, 2004; NC 526, 2007).

1.1.3. Adición

Son sustancias generalmente en polvo de origen puzolánica, que se agregan al hormigón para cambiar propiedades como la resistencia, plasticidad, durabilidad y otras, también se usan para disminuir el contenido de cemento. Se define además como “material mineral finalmente molido utilizado en el hormigón con el objetivo de mejorar ciertas propiedades, reológicas, mecánicas u otras, o de conferirle propiedades especiales. Se consideran de dos tipos las minerales: Tipo I aproximadamente inertes y Tipo II puzolánicas o hidráulicamente activas(NC 120, 2014).

1.1.4. Aditivo

Los aditivos son aquellos productos que, introducidos en el hormigón en pequeñas cantidades en relación con la masa de cemento, permiten modificar sus propiedades en estado fresco o endurecido en una forma susceptible de ser prevista y controlada. Son 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(NC 120, 2014; NC 228-1, 2005).

1.2. Relación Agua-Material Cementante

La relación agua-material cementante es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas(García, 2004).

La cantidad de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua-material cementante, contenido de agua, tipo y contenido de material cementante, aditivos y condiciones ambientales. Un aumento del contenido de aire y del tamaño del agregado, una reducción de la relación agua-material cementante y del revenimiento o el uso de agregados redondeados, de aditivos reductores

de agua o de ceniza volante reducirá la demanda de agua. Por otro lado, el aumento de la temperatura, del contenido de cemento, del revenimiento (asentamiento), de la relación agua-cemento, de la angularidad del agregado y la disminución de la proporción entre el agregado grueso y el agregado fino aumentarán la demanda de agua (Fallas et al., 2012; NC 353, 2004).

1.3. Métodos de diseño para la dosificación de las mezclas de hormigón

1.3.1. Generalidades

El proceso de determinación de las características requeridas del hormigón y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Los métodos de dosificación de hormigones tienen como finalidad, encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes componentes de los mismos, para conseguir mezclas que posean determinadas características de consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, entre otros (García, 2004).

Los métodos de proporcionamiento evolucionaron desde el método volumétrico arbitrario (1:2:3 – cemento: arena: agregado grueso) a principios del siglo XX (Abrams 1918) hasta los métodos actuales de masa y volumen absoluto. El cálculo teórico de las proporciones en que hay que mezclar a los componentes no exime de la comprobación experimental para la puesta a punto de la composición a adoptar. Esto es debido a que ningún método de dosificación puede tener en cuenta la gran cantidad de factores que influyen en las propiedades del hormigón a conseguir (Herrero, 1968).

1.3.2. Clasificación de los métodos de diseño de mezcla.

- Métodos empíricos: No se tienen en cuenta las características de los materiales componentes, pero sí se proporcionan en volumen o peso, o sea, es cuando no es estudiada la dosificación;
- Métodos semi-empíricos o experimentales: cuando se fija la relación agua/cemento en peso, mientras que los agregados se proporcionan mediante tanteos sucesivos en volumen;
- Métodos racionales, también llamados analíticos y teóricos: cuando además de fijar la relación agua /cemento en peso, se determinan los contenidos óptimos de cada uno

de los componentes en base al estudio de las características físicas de los agregados (German & Hanes, 2014).

1.3.3. Reseña histórica de los métodos de diseño de mezclas de hormigón.

En 1925, Bolomey introdujo el uso de la trabajabilidad en el hormigón, proponiendo el empleo de las curvas granulométricas ideales elaboradas por Fuller y Thompson. Él plantea unas ecuaciones para la determinación de la resistencia del hormigón, que es la más difundida mundialmente, al considerar que la característica de forma de los agregados tiene una marcada influencia en la resistencia final del hormigón que se diseña (Geraldo, 2005).

En 1941, Faury incorporando los estudios de Caquot y Bolomey, propuso un método de diseño basado en una curva granulométrica que consideraba el efecto pared y la trabajabilidad del hormigón (Geraldo, 2005; Madrid., 2010).

En 1944, el ACI publica en EUA el texto elaborado en el año 1936 por su Comité 613, el primer documento normativo consensual para la América, sobre dosificación del hormigón.

En 1952, Joisel A. propuso un complejo método fundamentado en la granulometría continua de Fuller, que tenía en cuenta: trabajabilidad, efecto pared, consumo de cemento, agua, compacidad del hormigón y área específica de la mezcla. Por su complejidad de aplicación no se difundió (Herrero, 1968).

En 1954, El ACI realiza la primera revisión del documento elaborado por el Comité 613 y publicado en 1944, el cual incluye los aspectos relativos al aire incorporado y estimación del agregado grueso a partir del volumen aparente compactado seco, por unidad de volumen de hormigón, para diferentes módulos de finura de las arenas, indicado en el texto ACI 613 54. Este Comité a partir del año 1970 cambió al ACI-211.11.

En 1978, O'Reilly, V. A. después de largos años de estudios e investigaciones y probar más de 20 000 testigos, logra un Nuevo Método de Dosificar Hormigón de baja consistencia, en la que intervienen:

- a) la influencia de las características de forma de los agregados gruesos.
- b) establece una nueva forma de determinar las proporciones de los agregados finos y gruesos.
- c) incluye en su ecuación, de forma directa la influencia de la consistencia del hormigón en su resistencia, lo cual se logra por primera vez en una ecuación.

d) hace la determinación de la cantidad de agua para una consistencia requerida de forma más exacta y racional. El método garantiza los parámetros que se exigen para lograr la durabilidad del hormigón(O'Reilly, 2007).

En 1983, O'Reilly V. A. ante la inexistencia de un método universal para dosificar el Hormigón de Alta Consistencia que se compacta por vibración, creó uno de forma científica, después de muchos años de investigación y pruebas en la producción de construcciones, basado en:

- a) medición de la consistencia del hormigón siempre con el consistómetro VeBe.
- b) establece una nueva forma de determinar las proporciones óptimas de los agregados finos y gruesos.
- c) determina la cantidad de pasta de cemento, que requiere la consistencia y resistencia, de un hormigón exigido y que será compactado con un equipo predeterminado, cuya aceleración está especificada.
- d) determina la característica de forma de los agregados gruesos que se empleen (O'Reilly, 2007).

Se introdujo el término Hormigón de Alto Desempeño (HAD), para calificar las mezclas de este. Tienen tres características: gran trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad. La primera diferencia fundamental entre el hormigón de alta resistencia y el hormigón de alto desempeño, es el requisito obligatorio de la durabilidad en el caso del HAD (Mehta & Monteiro, 1998).

1.3.4. Principales cualidades que se le exigen al concreto, a considerar en el proceso de dosificación:

Resistencia mecánica: Es el parámetro primero que exigen los usuarios del hormigón, ya que es el que garantiza la estabilidad de la estructura diseñada con este material. Esta se mide mediante probetas cilíndricas normalizadas (O'Reilly, 2007)

Consistencia de la mezcla: es un indicador de la trabajabilidad de la mezcla. Aunque sea una propiedad del hormigón en estado fresco es un factor que influye en las propiedades del mismo cuando endurece pues en ella se tiene en cuenta:

- La exigencia del diseño estructural, es decir, la forma, el tamaño de las secciones, cantidad de acero, que se exigen en el diseño arquitectónico.

- Los equipos que se emplean para su colocación en obra;
- La calidad de terminación que exige la superficie del hormigón de la obra;
- Las características climáticas ambientales a que estará expuesta la obra

(O'Reilly, 2007).

La durabilidad del hormigón: esta garantiza la vida útil de las construcciones. Depende de factores propios del hormigón como son la porosidad, relación agua/cemento, el tipo de cemento, la compactación a que se somete, el recubrimiento de las armadura e otros (O'Reilly, 2007).

Deformaciones del hormigón: Las deformaciones del hormigón pueden ser generadas por la contracción hidráulica, la cual produce una deformación inicial o inmediata y fundamentalmente las deformaciones lentas, denominadas como fluencia del hormigón (O'Reilly, 2007).

1.3.5. Métodos teóricos y analíticos

Los métodos de proporcionamiento a través de masa son bastante sencillos y rápidos para estimar las proporciones de la mezcla, usando una masa supuesta o conocida de hormigón por unidad de volumen. El método del volumen absoluto es más preciso y envuelve el uso de las densidades (gravedad específica) de todos los ingredientes, es para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de hormigón. Una mezcla de hormigón también se puede proporcionar por la experiencia de campo (datos estadísticos) o de mezclas de pruebas (Kosmatka et al., 2004).

Método del ACI

El sistema del American Concrete Institute (A.C.I) es el método de dosificación más utilizado el mundo, siendo adecuado para cualquier obra realizada con hormigón (Anónimo, S.A-c). A continuación, se muestran los pasos que se deben seguir para dosificar una mezcla de hormigón siguiendo el método de la A.C.I (ACI211.1-91, 2000; ACI211.3-91, 2000; ACI211.4-91, 2000).

1. Determinar el tamaño máximo del árido, teniendo en cuenta que debe ser el mayor posible siempre que cumpla con las especificaciones de diseño.

2. Obtener en una tabla los valores de consistencia después de haber hecho el ensayo del cono de Abrams. Para ello se toma el menor asentamiento, siendo este el que más se acerca a la realidad.
3. Hallar por medio de tablas la cantidad de agua de amasado por metro cúbico de hormigón que necesita la mezcla.
4. Definir la relación agua/cemento de acuerdo al tipo de ambiente al que se encuentre expuesto (términos de durabilidad) y la resistencia a compresión a los 28 días (términos de resistencia) apoyados en las tablas.
5. Calcular la cantidad de cemento que va a ser utilizada por metro cúbico de hormigón teniendo la cantidad de agua y la relación agua/cemento.
6. Determinar las cantidades de árido grueso y árido fino. Es necesario emplear la mayor cantidad de árido grueso para mejorar las condiciones de resistencia sin afectar la docilidad de la mezcla. Por otro lado, el contenido de finos puede obtenerse por el método de los volúmenes absolutos o por el de los pesos (German & Hanes, 2014).

1.3.6. Métodos experimentales

Método O'Reilly

El procedimiento propuesto por el profesor Vitervo O'Reilly (1993) se utiliza en Cuba, en otros países de América y en algunos países de África. El ahorro de cemento que proporciona es una de las principales ventajas de este método, comparado con otros métodos (europeo, ACI). El método O'Reilly puede llegar a reducir en un 15% o más el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón, lo que repercute de gran forma económicamente, dato muy importante en la industria de la construcción (O'Reilly, 2007).

Este método se basa en la determinación de las características de los áridos para encontrar el mínimo contenido de vacíos. O'Reilly demostró que la forma de los áridos influye significativamente en la cantidad de cemento a utilizar. Su objetivo principal es lograr un ahorro máximo de cemento bajo las condiciones de trabajo que existan, sin necesidad de utilizar recursos costosos importados. A continuación, se enumera el procedimiento seguido en el método(O'Reilly, 2007).

- 1- Determinar por el método experimental la relación óptima de la mezcla de arena y áridos gruesos.
- 2- Determinar la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia requerida de la mezcla de hormigón
- 3- Determinar la característica A de los áridos.
- 4- Determinar la cantidad de cemento(O'Reilly, 2007).

1.3.7. Optimización de las dosificaciones de las mezclas de hormigón, la economía de las mezclas de concreto

El costo de la elaboración de una mezcla de hormigón está constituido básicamente por el costo de los materiales, equipo y mano de obra. La variación en el costo de los materiales se debe principalmente a que el precio del cemento por kilogramo es mayor que el de los demás componentes, por tanto, la proporción de los áridos debe minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar las propiedades del hormigón. La diferencia en costo entre los áridos generalmente es secundaria; sin embargo, en algunas localidades o con algún tipo especial pueden ser suficientes para que influya en la selección y dosificación. El costo del agua usualmente no tiene ninguna influencia, mientras que el de los aditivos puede ser importante por su efecto potencial en la dosificación del hormigón (Ortega, 2012).

El costo de la mano de obra depende de la trabajabilidad de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación. Una mezcla poco trabajable con un equipo de compactación deficiente aumenta los costos de mano de obra(Ortega, 2012).

La economía de un diseño de mezcla se debe también al grado de control de calidad que se espera en la obra. El hormigón tiene una variabilidad tanto en la calidad de los materiales, la producción como en las acciones que se ejecutan en la obra. En obras pequeñas “sobre diseñar” el hormigón puede resultar económico entre comillas pero en una obra muy grande de altos volúmenes de hormigón se debe implementar un amplio control de calidad con el propósito de mejorar los costos y la eficiencia (Ortega, 2012).

1.3.8. Diseño mediante programas computacionales.

Programas para dosificaciones de hormigón

Aunque las tecnologías de construcción sean las que más tiempo llevan para actualizar existen avances notables en esta rama, así por ejemplo están el uso de nuevos materiales tales como los aditivos, maquinarias entre otros. No obstante, también están los software para dosificaciones de hormigón que calculan las proporciones en que han de ser mezclados el cemento, los áridos y el agua de la mezcla, con el fin de alcanzar valores dados de resistencia, consistencia, tomando en consideración las características de los áridos, las maquinaria disponibles y las condiciones ambientales del emplazamiento de la obra (Madrid., 2010).

Método Toufar

Es un método canadiense que se basa en la disminución del contenido de cemento mediante el cálculo de la proporción de áridos que garantice el menor volumen de vacíos. Está centrado en lograr el factor de empaque máximo para la mezcla que se quiera diseñar, teniendo la posibilidad de trabajar en el diseño con tres fracciones de áridos y con varios materiales cementosos suplementarios. A continuación, se muestra la metodología seguida por Toufar para el diseño de mezclas de hormigón(ENCI513, 2011).

1. Tamizar los agregados para saber el % retenido y el % pasado en cada tamiz, los cuales van desde 112 mm hasta 0.08mm.
2. Introducir en el programa los siguientes resultados de laboratorio:
 - densidad seca, debe oscilar entre 2600-2700 kg/cm³.
 - densidad a granel, entre 1450-1600 kg/cm³,
 - % de absorción, sus valores típicos están en un rango de 0.5% - 2.0%.
 - contenido de humedad (%), varía de 0-5% para agregado muy mojado.
3. Introducir en el programa otros datos que se requieren para el diseño.
 - Porcentaje de remplazo de cemento por materiales cementosos suplementarios.
 - Densidad del cemento que se va a utilizar.
 - Densidad de los materiales cementosos suplementarios.
 - Porcentaje de aire incluido en la mezcla de hormigón.
 - Relación agua/cemento.
 - Porcentaje adicional de volumen de pasta de cemento entre 0-5% del volumen de pasta.

Luego de introducir en el programa esta serie de pasos, se obtiene como resultado una dosificación de todos los materiales, arrojando las cantidades exactas y logrando en su distribución el factor de empaque máximo. El Método de Toufar es de fácil aplicación y muy práctico, recomendable para cualquier tipo de diseño de mezclas de hormigón que utilice hasta tres tamaños de áridos diferentes (ENCI513, 2011).

1.4. Dosificación del hormigón y su influencia en la segregación

Además de otros factores relacionados con la puesta en obra, la dosificación tiene gran influencia en el riesgo de segregación y la pérdida de homogeneidad de la mezcla. Pues si se tiene un hormigón con muchos finos y pobre en agua, vuelve al hormigón muy seco. Los áridos más gruesos tienden a separarse depositándose en el fondo con más facilidad que las partículas finas, la posible solución es el aumento la cantidad de agua mejorando así la cohesión y eliminando la segregación del hormigón. Pero si la cantidad de agua es excesiva existe el riesgo de que se separe el mortero de la mezcla y se vuelvan a segregar los áridos, dando así dos tipos de segregación diferentes, para una misma mezcla, en función del agua de amasado (Madrid., 2010).

La docilidad del hormigón también influye en la segregación, debido a que las mezclas propensas a la segregación son las poco dóciles o ásperas, las considerablemente fluidas o secas, o aquellas que tienen gran cantidad de arena. Se pueden producir también segregación en un hormigón que, a pesar de ser muy dócil, haya sido maltratado o sometido a operaciones inadecuadas (Madrid., 2010)

1.5. Conclusiones parciales.

- ✓ El diseño de la mezcla es un proceso que interrelaciona: selección de los materiales, determinación de las cantidades relativas para producir la mezcla más económica, que sea trabajable y que le proporcione al hormigón la resistencia y durabilidad especificadas u otras propiedades.

- ✓ De los materiales es común que se le atribuya mucha más importancia a la cantidad de cemento como si este solo fuera suficiente para determinar la calidad del hormigón tanto en el estado fresco o en estado endurecido, pero desde que el francés R. Feret (1896) propuso un método para calcular la resistencia del hormigón en función de los materiales que lo componen, se empezó a analizar desde otras perspectivas el diseño de hormigón y con el tiempo otros científicos y estudiosos se dedicaron en procurar saber de qué dependía la calidad del hormigón. Los áridos en un principio no se les dio importancia hasta que Bolomey insatisfecho con esta primera fórmula, en una publicación posterior llamó la atención sobre la influencia de los áridos, que no sólo intervienen por su cantidad, pero también por su composición granulométrica, que modifica la cantidad necesaria de agua de amasado, y por el límite máximo del árido. En este proceso continuo del desarrollo del hormigón algunos científicos estaban de acuerdo y solo añadieron otros aspectos como cualquier investigación hay quien no estuvo de acuerdo y también trató de probar estar cierto. Hoy por hoy se ha podido probar que se pueden obtener distintos tipos de hormigón si se mantiene la cantidad de cemento y se alteran los demás componentes. Como es el caso del agua, al tratar de buscar la mejor relación agua-cemento pues que de esta depende principalmente la laborabilidad y la resistencia de hormigón.

Capítulo II: Diseño experimental de mezcla de hormigón con el empleo de diferentes métodos.

2.1. Caracterización de los materiales componentes

Para dosificar mezclas de hormigón es seleccionar y medir la cantidad elementos componentes de maneras que se obtenga una mezcla con las propiedades requeridas a buen costo y calidad esperada.

Para eso nos apoyamos en diferentes métodos de diseño de mezcla según las características de los elementos a fabricar, las condiciones de trabajo, transporte y futuras condiciones de explotación , en otras palabras “desempeño” . Como los métodos son muy relativos, nada es absoluto, es con base a las condiciones antes mencionadas y a que tienen que ver con los materiales componentes, que se quiere conocerlos, caracterizar los mismos.

2.1.1. Materiales cementicos

- **Cemento Portland P-35**

El Cemento P-35 fue producido en la Fábrica de Cemento de Siguaney, de Sancti Spiritus en el mes de marzo, almacenado en condiciones adecuadas en los silos de producción de la Planta de Prefabricado. Se verifica que cumpla con los requerimientos establecidos en la NC 95:2017, avalados en el Laboratorio de la Fábrica de Cemento Siguaney, tal como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Resultados Físico Químicos del Cemento.

EMPRESA DE CEMENTO SIGUANNEY REGISTRO DE ENSAYOS					CEMENTO P-350 PRODUCIDO												
FECHA PRODUCCION					QUIMICOS				FISICOS		FRAGUADO		RESISTENCIAS COMPRESION			ADICION	
Clave	Cant Mtras	DIAS		MES	%	%	%	%	cm2/g	mm	mtos.	hor.	MPa			YESO %	CALIZA %
		INICIO	FINAL										3	7	28		
M - 277	14	9	10	Marzo	1,34	2,97	2,33	4,55	3160	0,6	160	3,42	18,8	26,3	39,3	4,57	7,91
M - 278	12	11	12	Marzo	1,34	2,91	1,27	3,35	2994	0,5	155	3,17	22,7	29,2	36,5	4,40	5,91
M - 279	17	14	16	Marzo	1,34	2,17	1,47	4,32	3078	0,6	130	3,17	18,4	25,5	35,6	2,54	8,09
M - 280	15	17	22	Marzo	1,59	2,31	1,49	3,42	3280	0,4	140	3,33	20,7	28,2	39,8	2,93	5,64
M - 281	10	29	30	Marzo	1,45	2,03	0,92	2,85	3578	0,2	130	3,33	17,5	25,9	35,9	2,07	4,71
M - 282	12	31	31	Marzo	1,34	2,88	1,16	3,88	2951	0,4	140	3,42	18,1	27,6	37,5	4,42	6,19

Tabla 2.2. Tabla comparativa

MEDIA MENSUAL

CEMENTO P-35					S.E.	FRAGUADO		Resist. COMPRESION			Aditivos	
INDICE:	SO3	MgO	PPI	RI		Inicial	Final	3 días	7 días	28 días	Caliza	Yeso
Norma	3,50	5,00	4,00	4,00	2800	45	10,0	17,0	25,0	35,0	5,0	5,0
NC 95: 2017	máx	máx	máx	máx	min	min	máx	min	min	min	máx	máx
Empresa	%	%	%	%	cm2/g	mtos.	horas	MPa	MPa	MPa	%	%
Siguaney	2,55	1,40	3,73	1,44	3174	143	3,31	19,4	27,1	37,4	6,4	3,5

Como se aprecia, en las tablas 2.1 y 2.2, el Cemento Portland P-35 cumple con los requerimientos de resistencia a los 28 días y resto de los parámetros físico químicos.

- **LC-2**

El LC-2 es una adicción resultante de la calcinación de la arcilla caolinítica que luego de calcinadas son homogenizadas, se procede a la fabricación del LC2.

Para esta investigación se utiliza una arcilla procedente del yacimiento Yaguajay que se encuentra ubicado a 300 m al sur de la ciudad con el mismo nombre en la provincia de Sancti Spíritus, la prueba industrial de producción de este material fue realizada en Siguney, Sancti Spiritus, entre diciembre de 2018 y enero de 2019.

Se muestra en la foto 2.1 la adición mineral dentro de la cubeta y en la tabla 2.2 los ensayos realizados al LC-2.



Figura 2.1 Adición mineral LC-2

Tabla 2.3: Resultado de ensayos realizados al LC-2.

Molienda	Muestra	Fecha	Blaine	SO ₃ (%)	PPI (%)	Yeso (%)	Aditivo (%)	Fineza (%)
primera	1	7-12-2018	7420	2.4	17.66	2.59	28.75	99.3
	2	8-12-2018	6009	2.35	19.83	2.42	-	89.8
	3	8-12-2018	6841	2.56	22.9	3.11	-	93.6
	4	8-12-2018	6000	-	21.63	-	-	92.4
	5	8-12-2018	6254	2.27	22.27	2.15	-	91.2
	6	8-12-2018	6425	-	20.28	-	-	94.4
	7	8-12-2018	6928	-	21.20	-	-	93.2
segunda	8	16-12-2018	6889	1.47	18.93	0.5	32.59	89.9
	9	16-12-2018	7530	1.79	21.50	0.56	40.12	89.6
	10	17-12-2018	7246	-	18.87	-	-	89.4
	11	17-12-2018	7099	2.18	17.05	1.86	26.58	89
	12	17-12-2018	7696	3.40	18.28	5.90	28.68	87

2.1.2. Áridos

- **Árido grueso**

Se usará el árido grueso de la cantera Algaba en el municipio Trinidad, provincia de Sancti Spiritus, fracción de 19-10mm. Se verifica que cumpla con los requerimientos establecidos en la “NC 251 -2013 Áridos para hormigones hidráulicos. Ver Foto 2.2. Los resultados de los ensayos se muestran en la Tabla 2.3.



Figura 2.1: Muestra de gravilla gruesa de Algaba

Tabla 2.4: Resultado de los ensayos físicos del árido grueso

Ensayos físicos	Unidad	Fecha	Resultado	Según NC 251:2013
Material más Fino que 0.074 mm	(%)	22/04/2019	0.3	≤ 1.0
Pesos Específicos Corriente	g/cm ³	22/04/2019	2.59	≥ 2.50
Pesos Específicos Saturado	g/cm ³	22/04/2019	2.63	
Pesos Específicos Aparente	g/cm ³	22/04/2019	2.7	
Absorción	(%)	22/04/2019	1.65	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m ³	22/04/2019	1432	
Masa Volumétrica Compactada	kg/m ³	22/04/2019	1571	
Módulo de Finura	(%)	22/04/2019		
Índice de Triturabilidad	(%)	22/04/2019	7.1	
Partículas Planas y Alargadas	(%)	22/04/2019	1.49	≤ 10
Tamaño máximo	mm	22/04/2019	19.1	

Análisis Granulométrico.

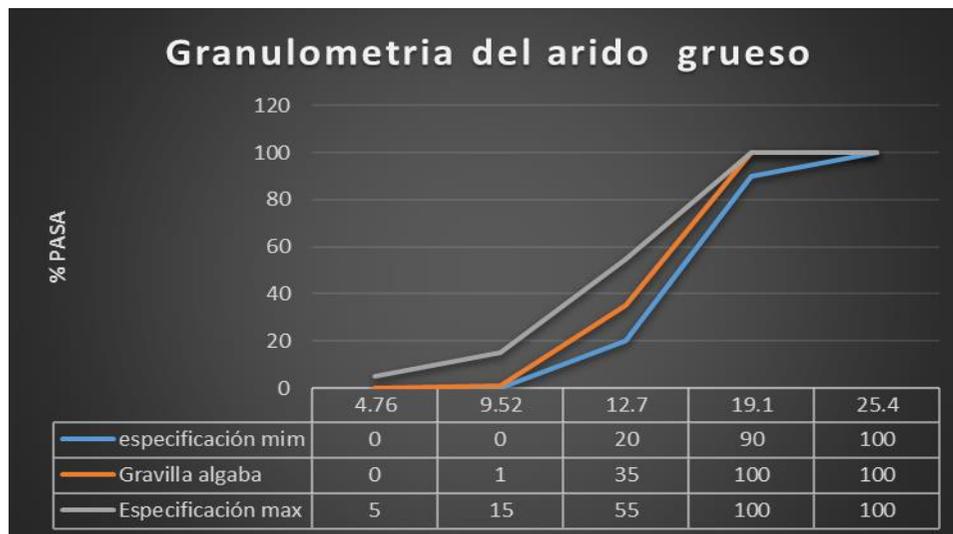


Figura 2.2: Granulometría de la gravilla de Algaba

Desde el punto de vista granulométrico el árido es satisfactorio.

- **Árido fino**

Se usará el árido grueso de la cantera Algaba en el municipio Trinidad, provincia de Sancti Spiritus, fracción de 9.52-0.149mm. Se verifica que cumpla con los requerimientos establecidos en la “NC 251-2013 Áridos para hormigones hidráulicos.

Tabla 2. 5: Resultado de los ensayos físicos del árido fino

Ensayos físicos	Unidad	Fecha	Resultado	Según NC 251:2013
Material más Fino que 0.074 mm	(%)	15/03/2019	1	≤ 1.0
Pesos Específicos Corriente	g/cm3	15/03/2019	2.62	≥ 2.50
Pesos Específicos Saturado	g/cm3	15/03/2019	2.65	
Pesos Específicos Aparente	g/cm3	15/03/2019	2.7	
Absorción	(%)	15/03/2019	1.2	≤ 3.0
Masa Volumétrica Suelta	kg/m3	15/03/2019	1454	
Masa Volumétrica Compactada	kg/m3	15/03/2019	1622	
Módulo de Finura	(%)	15/03/2019	3.13	
Partículas Planas y Alargadas	(%)	15/03/2019		≤ 10
Tamaño máximo	mm	15/03/2019	4.76	

Análisis Granulométrico.

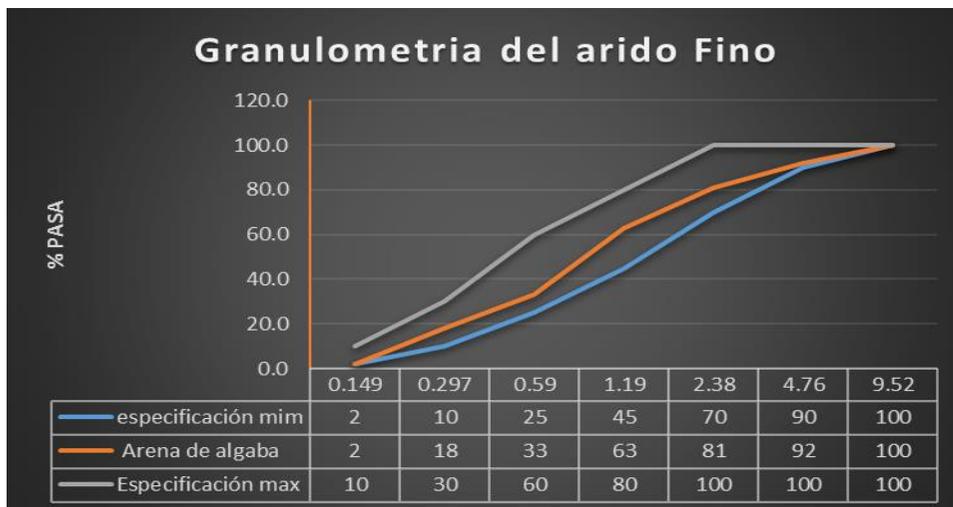


Figura 2.3: Granulometría de la arena de Algaba

Como se puede apreciar en la Figura 2.4, la arena cumple con las especificaciones máximas y mínimas, lo que lo hace desde el punto de vista granulométrico satisfactorio.

2.1.3. Agua

Para el amasado se usa agua potable que cumplió con las especificaciones de la "NC 353 - 2004 Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros. Especificaciones".

Existe un límite permisible de contenidos o sustancias impuras y/o perjudiciales en el agua de amasado que se expresan en la tabla que sigue (NC 353, 2004):

Tabla 2.6: Sustancias nocivas y sus limitaciones para el agua de amasado y curado de hormigones y morteros.

Tipo de sustancia nocivas	Contenido máximo permisible (mg/l)
Productos derivados del petróleo, grasas y aceites	15000
Contenido de residuo seco	2000
Contenido de materia orgánica	30
La oxidabilidad del agua	15
Hidratos de carbono y azúcares	Exenta

2.1.4. Aditivo

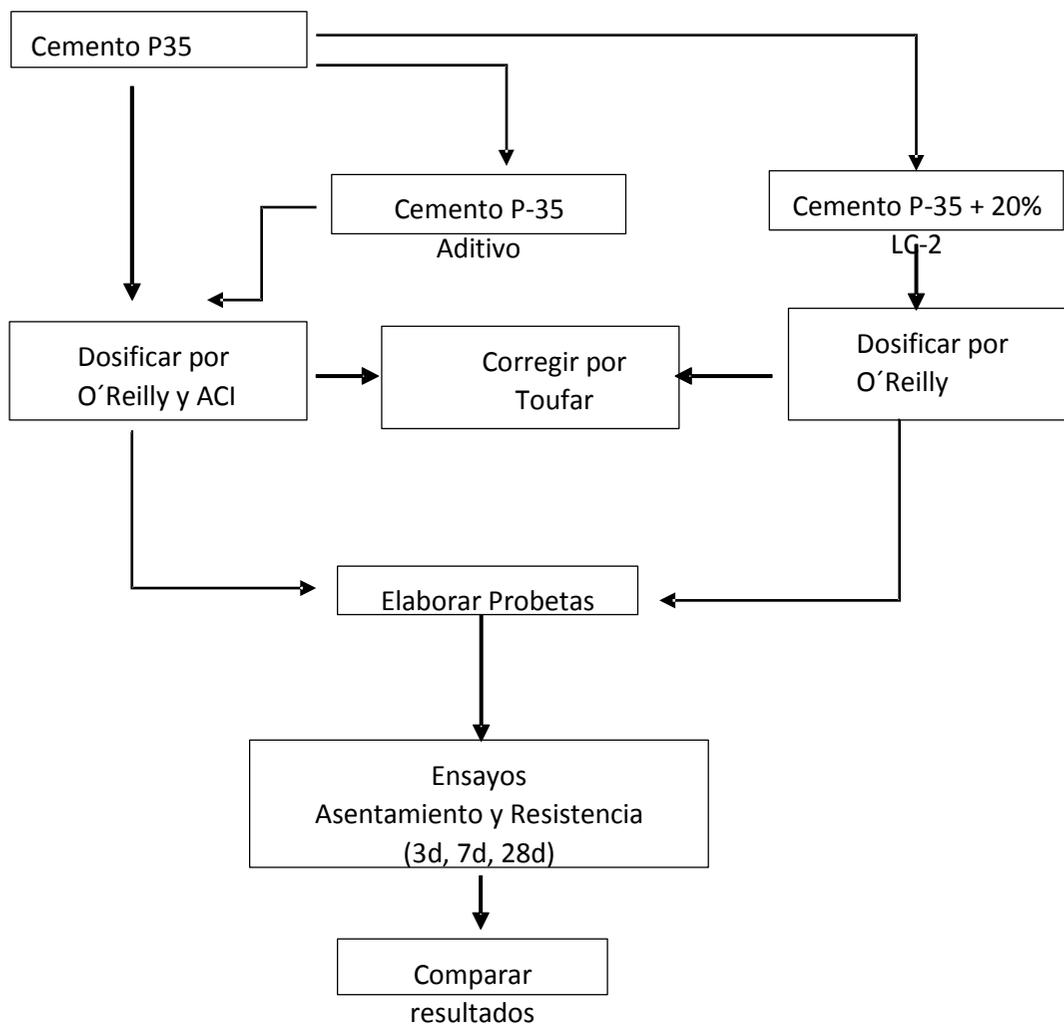
Se utilizará el Dynamon SR2 que es un aditivo de base acrílica modificada, específico para el hormigón preparado, perteneciente al nuevo sistema MAPEI Dynamon SRC-20. Es un retardador de fraguado (Mapei, 2019).

DATOS IDENTIFICATIVOS DEL PRODUCTO	
Aspecto:	líquido
Color:	ámbar
Densidad según ISO 758 (g/cm³):	1,09 ± 0,02 a +20°C
Porcentaje extracto seca según EN 480-8 (%):	24,5 ± 1,2
Acción principal:	reducción del agua de amasado, mantenimiento de la trabajabilidad para largos periodos (más de 2 horas) en climas particularmente calurosos
Clasificación según EN 934-2:	retardante de fraguado, superfluidificante reductor de agua de alta eficacia, tabla 11.1 y 11.2
Cloruros solubles en agua según EN 480-10 (%):	< 0,1 (ausentes según EN 934-2)
Contenido de álcalis (Na₂O equivalente) según EN 480-12 (%):	< 2,5
Almacenamiento:	12 meses; proteger de las heladas
Clasificación de peligro según Directiva CE 1999/45:	ninguna. Antes de su uso consultar el párrafo "Instrucciones de seguridad" y las instrucciones de los envases y la Ficha de Seguridad
Partida arancelaria:	3824 40 00

Figura 2.4 Datos técnicos del aditivo Dynamon SR2.

2.2. Diseño experimental de la investigación.

El trabajo experimental comprende la realización de las acciones que se expresan en el esquema que se muestra. La elaboración de las mezclas es realizada en las instalaciones de la Planta de Prefabricado Gran Panel de Sancti Spíritus, realizando la medición en peso. Las muestras son tomadas de las amasadas realizadas el batching plant, hormigonera de acción forzada, utilizando en los moldes el resto del hormigón elaborado.



2.2.1. Variables Independientes.

- Cantidad de cemento.

Esta, por amasada se obtendrá aplicando el método de diseño de mezclas de O' Reilly y por el ACI tanto para las mezclas con cemento P-35 con y sin aditivo como para las realizadas con P-35 + LC-2, se utilizarán las mismas dosificaciones.

- Cantidad de agua
- Características de los áridos

2.2.2. Variables dependientes

- Asentamiento.

El asentamiento del hormigón es un parámetro que depende de todo el proceso hasta que se termine el mezclado de los materiales, eso es del método empleado y variables independientes. Se va a realizar por el método de cono de Abrams luego de terminada la mezcla.

- Resistencia a compresión.

La resistencia del hormigón es un resultado que depende de todo el proceso. Las muestras serán analizadas a las 3, 7 y 28 días.

2.3. Descripción de procedimientos

Para la evaluación de los hormigones elaborados con cemento P-35 y P-35+ LC-2, se caracterizarán los materiales, se diseñarán las 6 mezclas, 2 para cada método y condición, una de 20Mpa la otra de 30Mpa. Se realizarán ensayos consistencia y de resistencia a la compresión de cada mezcla elaborada con ambos cementos, el hormigón restante de las mezclas es utilizado en la fabricación de elementos prefabricados para un mejor análisis de sus propiedades.

2.3.1. Elaboración de hormigón para probetas a ensayar

El hormigón se elaborará en la Planta de Prefabricado Gran Panel VI de la Empresa de Construcción y Montaje de Sancti Spíritus (ECMSS). La planta de hormigón es dirigida por el operador desde el cuarto de control, donde son medidas la cantidad y peso de los materiales a utilizar en cada amasada de 0.35 m³ de hormigón. Se realizarán las amasadas con los cementos Portland P35 y P-35 + LC-2 y con P-35+ aditivo, elaboradas según las

dosificaciones usadas en el Laboratorio de la Planta Gran Panel VI, basadas en el Método de O' Reilly y dosificaciones basadas en el método del ACI diseñadas en la presente investigación, teniendo en cuenta las correcciones por humedad realizadas a los áridos. Cada amasada es empleada en la elaboración de probetas de 15 x 30 cm(NC 221 2002).



Figura 2.6: Planta de hormigón dosificadora mezcladora (**Batching Plant**); b) **Batching Plant**



Figura 2.7: Proceso de llenado y colocación del hormigón en los moldes en la planta de prefabricado. Transportación del hormigón con grúa pórtico

- **Dosificación de los componentes de la mezcla por el método de O'Reilly**

Tabla 2.7: Dosificación por el método de O'Reilly para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35, sin aditivo químico.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P-35	kg	345	120.75	455	159
Agua	l	215	75	192	67
Arena	kg	819	287	803	281
Gravilla	kg	924	323	906	317
a/c	u	0.62	0.63	0.66	0.66

Tabla 2.8: Dosificación por el método de O'Reilly para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 y 20% de adición LC-2.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P 35	kg	276	96.6	364	159
Agua	l	215	75	202	70,7
Arena	kg	819	287	803	281
Gravilla	kg	924	323	906	317
LC-2 (20%)	kg	69	24	91	32
a/c	u	0.77	0.78	0.53	0,37

Tabla 2.9: Dosificación por el método de O'Reilly para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 y aditivo químico.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P-35	kg	345	120.75	455	159
Agua	l	212.42	74.35	189.70	66.39
Aditivo 1.2%	l	2.58	0.90	2.30	0.81
Arena	kg	819	287	803	281
Gravilla	kg	924	323	906	317
a/c	u	0.61	0.61	0.42	0.42

- **Dosificación de los componentes de la mezcla por el método del ACI.**

Con el objetivo de analizar la influencia de los métodos de dosificación se prosigue al diseño de mezclas por el ACI, con la misma resistencia esperada a los 28 días y con los mismos materiales en iguales condiciones.

Tabla 2.10 Dosificación de mezclas utilizando el método de la ACI para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, con Cemento Portland P-35.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P-35	kg	297	104	380	133
Agua	l	181	63	183	64
Arena	kg	980	352	902	316
Gravilla	kg	859	301	859	301
a/c	u	0.61	0.61	0.48	0.48

Tabla 2.11 Dosificación por el método de ACI para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 y 20% de adicción LC-2

Materiales	Unidad	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	Amsd 0.35 m ³	1 m ³	Amsd 0.35 m ³
Cemento P35+Lc2	Kg	237.6	83.16	304	106
agua	Lts	201	70.35	203	71.05
arena	Kg	819	287	803	281
gravilla	Kg	924	323	906	317
LC-2 (20%)	Kg	59.4	20.79	76	26.6
Agua/cemento	adm	0.84	0.84	0.67	0.67

Tabla 2.12: Dosificación por el método de ACI para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 con aditivo

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento	kg	297	104	380	133
Agua	l	178.83	62.59	180	63.
Aditivo (1.2%)	l	2.17	0.76	2.20	0.77
Arena	kg	980	352	902	316
Gravilla	kg	859	301	859	301
a/c	u	0.60	0.60	0.47	0.47

El diseño por este método no tiene en cuenta la característica de la forma de los áridos lo que implica en el caso de los áridos triturados con un alto por ciento de partículas planas y alargadas que no se considera el espacio que se forma entre ellos, lo que disminuye la compacidad del material.

- **Dosificación de los componentes de la mezcla por el método Toufar**

Tabla 2.13 Dosificación por el método de Toufar para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento	kg	370	129.5	370	129.5
Agua	l	209	73	209	73
Arena	kg	659	230.65	659	230.65
Gravilla	kg	1055	369.25	1055	369.25
a/c	u	0.56	0.56	0.56	0.56

Tabla 2.14: Dosificación por el método de Toufar para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 + 20% LC-2

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P35	kg	295	103.25	295	103.25
agua	l	209	73	209	73
arena	kg	659	230.65	659	230.65
gravilla	kg	1055	369.25	1055	369.25
LC-2 (20%)	kg	74	25.9	74	25.9
a/c	u	0.70	0.71	0.70	0.71

Tabla 2.15: Dosificación por el método de Toufar para 1 m³ y para una amasada de 0.35 m³ de hormigón, para una mezcla con cemento portland P-35 con aditivo.

Materiales	UM	Volumen de hormigón			
		20 MPa		30 MPa	
		1 m ³	0.35 m ³	1 m ³	0.35 m ³
Cemento P35	kg	370	104	370	104
Agua	l	207	62.59	207	62.59
Aditivo (1.2%)	l	2.5	0.88	2.5	0.88
Arena	kg	659	230.65	659	230.65
Gravilla	kg	1055	369.25	1055	369.25
a/c	u	0.56	0.56	0.56	0.56

Al dosificar por este método se puede verificar que el mismo no considera la resistencia característica o especificada por lo que para diferentes resistencias esperadas se utiliza la misma dosificación. Como ventaja a diferencia de los demás métodos este ya tiene en cuenta el porcentaje de material cementicio suplementario.

Las Tablas 2.16 y 2.17, muestran la cantidad de probetas ensayadas para los métodos de O'Reilly y ACI respectivamente.

Tabla 2.16: Cantidad de probetas a ensayar método de O'Reilly.

Aglomerante	Resistencia	Edad de ensayo			Total
		3días	7días	28días	
P-35	20 MPa	3	3	3	9
	30 MPa	3	3	3	9
P-35 + Lc2	20 MPa	3	3	3	9
	30 MPa	3	3	3	9
P-35 + Aditivo	20 MPa	3	3	3	9
	30 MPa	3	3	3	9
				Total	54

Tabla 2.17: Cantidad de probetas a ensayar según ACI.

Aglomerante	Resistencia	Edad de Ensayo			Total
		3días	7días	28días	
P-35	20 MPa	3	3	3	9
P-35 + Aditivo	20 MPa	3	3	3	9
				Total	18

2.4. Conclusiones parciales

- ✓ Los áridos utilizados cumplen satisfactoriamente con la NC 251.2103 Áridos para hormigones hidráulicos.
- ✓ Existe variabilidad en los resultados del diseño de mezclas por cada uno de los métodos utilizados.
- ✓ El diseño de mezclas por Toufar permite obtener mezclas donde quedan ajustados los niveles de compacidad de los áridos, pero no especifica los valores de resistencia a obtener.

Capítulo III: Análisis y discusión de los resultados.

La preparación de la mezcla de hormigón es una actividad compleja dentro del sistema de los trabajos generales de hormigonado, su importancia también radica en que garantiza las propiedades iniciales de la mezcla de hormigón en función de los requisitos tecnológicos de todo el sistema de hormigonado (José, 2004). No se pueden confeccionar las mezclas sin haber obtenido las dosificaciones, pues las tablas de dosificación son el documento básico para la preparación de la mezcla, aunque este es temporal según la estabilidad de los materiales y el desarrollo o realización de estudios más avanzados.

3.1. Ensayos Reológicos

Es importante conocer las propiedades del hormigón en estado fresco, para tal se realizarán los ensayos reológicos de asentamiento por el Cono de Abrams. Ver Foto 3.1.



Figura 3.1: Hormigón en estado fresco a ser usado para la elaboración de probetas.

3.1.1. Asentamiento

Al analizar o verificar la consistencia nos basamos en el asentamiento de las mezclas realizadas mediante el método del cono de Abrams, en el que se utiliza un molde troncocónico, una varilla y una regla. Se vierte el hormigón en tres capas de volúmenes aproximadamente iguales, con varilla se compactan uniformemente dando 25 golpes por cada capa, luego se desmolda para así medir el asentamiento de la muestra. Se escoge un punto de bajo y de alto asentamiento para hallar un promedio en la muestra de hormigón. El

procedimiento y las especificaciones del ensayo a ambas amasadas se realizaron según la NC 174: 2002 “Hormigón fresco. Medición del asentamiento por el cono”.



Figura 3.2: Medición del asentamiento por el cono de Abrams

3.1.2. Confección de especímenes de hormigón.

Para la evaluación de los especímenes se emplean moldes cilíndricos de 15 x 30 cm, en ellos se les vierte el hormigón manualmente en 3 capas aproximadamente iguales. Cada molde se compacta realizando 25 golpes de varilla por cada capa para evitar oquedades y la segregación del hormigón, según establece la NC 221:2002 “Hormigón. Elaboración de probetas para ensayos”. Los moldes se retiraron a las 24 horas para ser utilizados con la próxima amasada de hormigón(NC 221 2002).



Figura 3.3: Hormigón colocado en moldes para la elaboración de probetas.

3.1.3. Curado de las probetas.

Pasadas las 24 horas se ensayan las probetas, se procede al curado, sumergiendo los especímenes desmoldados, estos permanecen en el tanque de curado y se secan superficialmente antes de realizar el proceso de rotura. El tiempo de curado se extiende hasta que el hormigón alcance la edad de 3; 7 y 28 días respectivamente para las demás probetas a ensayar(NC 293, 2005).



Figura 3.4: Probetas retiradas del tanque de curado

3.1.4. Resistencia mecánica a compresión a edades de 3, 7 y 28 días.

El comportamiento mecánico de los hormigones fabricados se evalúa mediante los ensayos a compresión realizados en el laboratorio de la Planta de Prefabricado Gran Panel VI. Para ello se tomaron 3 probetas de 15 x 30 cm por cada serie y por cada mezcla para ser ensayadas a las 3; 7 y 28 días resultando un total de 90 especímenes. Los requerimientos del ensayo a compresión se encuentran especificados en la NC 724- 2009 “ Ensayos del Hormigón. Resistencia del Hormigón en estado endurecido” (ISO 1920 -4:2005, MOD). Al realizar el ensayo se ubica cada probeta cilíndrica en el centro del plato de la máquina y se aplica una fuerza con carga continua a velocidad constante de 1mm x minuto hasta su rotura. Se valora el tipo de fallo y si la rotura es satisfactoria o insatisfactoria(NC 244, 2005; NC 724, 2009).

Al realizar el ensayo se ubica cada probeta cilíndrica en el centro del plato de la máquina y se aplica una fuerza con carga continua a velocidad constante de 1mm x minuto hasta su rotura. Se valoró el tipo de fallo y si la rotura es satisfactoria o insatisfactoria.



Figura 3.5: Ensayo de rotura de probetas para la determinación de la resistencia mecánica a compresión.

3.1.5. Análisis de los valores de asentamiento.

La consistencia del hormigón es de extrema importancia principalmente a la hora de manejar este material y dependiendo del tipo de elemento que se pretenda construir, existe una consistencia ideal o recomendable. Pero para conocer la consistencia hay que determinar o medir el asentamiento pues de este se puede inferir la consistencia. Aunque existan diferentes métodos para determinar este parámetro se utiliza el del cono de Abrams por ser de fácil aplicación y sencillo.

Tabla 3.1. Resultado de los asentamientos obtenidos en el cono de Abrams, en las mezclas dosificadas según O'Reilly.

Resistencia (MPa)	Asentamiento (cm)		
	P-35	P-35 +LC2	P-35 + Aditivo
20 MPa	5.5	2.5	8.5
30 MPa	6.5	4.2	9.4

Tabla 3.2: Resultado de los asentamientos obtenidos en el cono de Abrams, en las mezclas dosificadas según ACI.

Resistencia (MPa)	Asentamiento (cm)	
	P35	P-35 Aditivo
20 MPa	6,5	8.5

El asentamiento del hormigón depende de las proporciones de cada elemento de la mezcla, pero depende mucho más de la relación agua cemento. Este parámetro influye directamente en la consistencia y en la laborabilidad del hormigón y en los casos como en la muestra con LC-2, disminuye como consecuencia del incremento de la superficie específica aportada por la adición mineral incorporada. Se pudo verificar la dificultad en el momento de colocar el hormigón en los moldes, pues resultó trabajosa. En cambio, cuando es utilizado aditivo químico, son alcanzados los valores de asentamiento esperados, dada la influencia de este sobre el aglomerante.

En el caso del uso de la adición mineral, requiere una nueva formulación, la autora propone sea utilizado aditivo químico que logre dispersar el aglomerante sin necesidad de incrementar el agua de amasado que varíe la relación agua cemento.

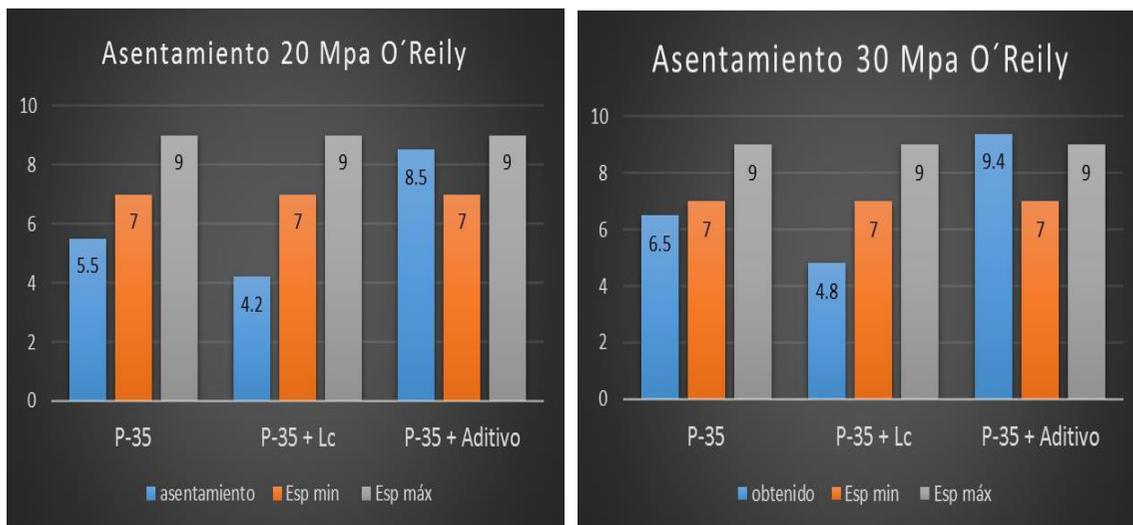


Grafico 3.1: Asentamiento en hormigón de 20 y 30 MPa diseñado por el método de O'Reilly, con diferentes materiales.

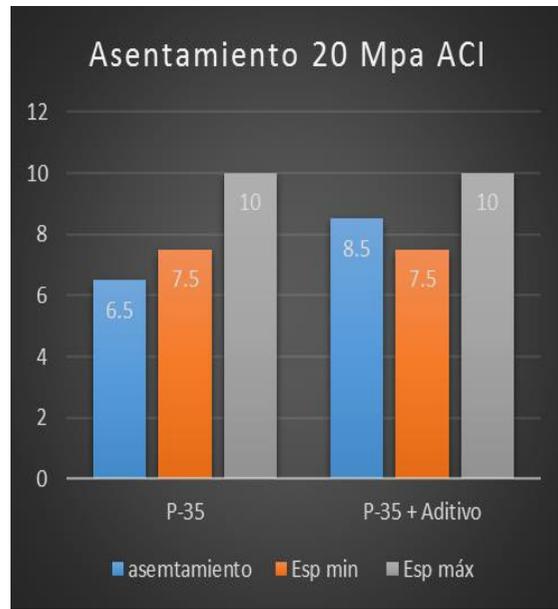
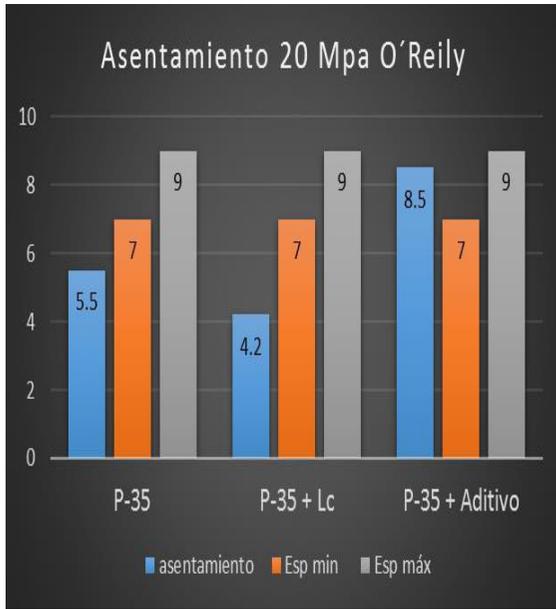


Grafico 3.2: Asentamientos para hormigones de 20 MPa, con diferentes materiales. ACI vs O'Reilly.

3.2. La cantidad de cemento en los tres métodos analizados, O'Reilly y ACI.

La cantidad de cemento en la mezcla es un elemento muy importante, no solo desde el punto de vista técnico sino también económico, de ahí la importancia a la hora de analizar que método define el contenido de cemento que se necesita en cada una de las mezclas.

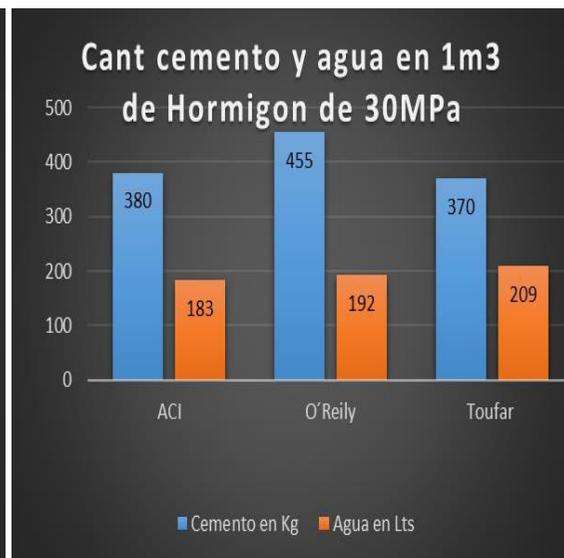
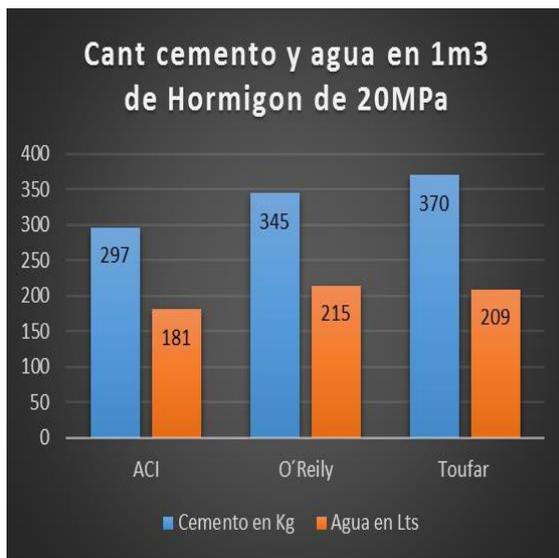


Grafico 3.3 Cantidad de cemento y agua en 1m3 de hormigón para 20 MPa y 30 MPa.

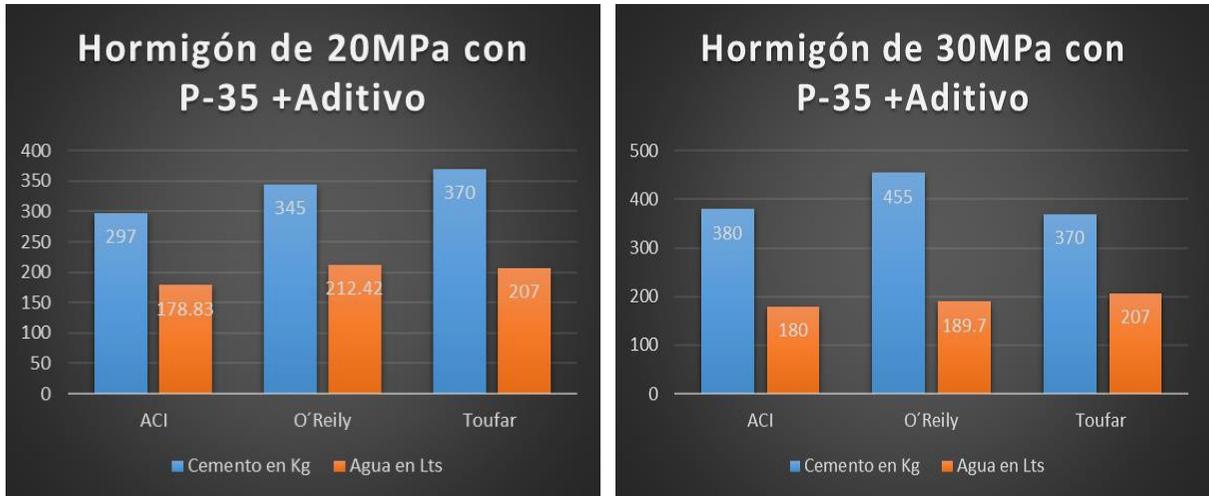


Grafico 3.4: Cantidad de cemento y agua en 1m3 de hormigón con aditivo para 20 MPa y 30 MPa

3.3. Relación agua/cemento en los tres métodos analizados, O'Reilly y ACI.

En el método del ACI la cantidad de agua a utilizar en el hormigón será en función de la consistencia que deba tener el mismo, del tamaño máximo de árido elegido, y de su granulometría, viniendo, también, influenciada por la cantidad de aire incorporado y siendo independiente de la cantidad de cemento empleada.

En el método O'Reilly se obtiene la cantidad de agua por tanteo en función de la consistencia requerida, proporción de los áridos, cantidad de cemento.

Y en el método Toufar la cantidad de agua está en función de la relación agua/cemento requerida y de la cantidad de cemento.

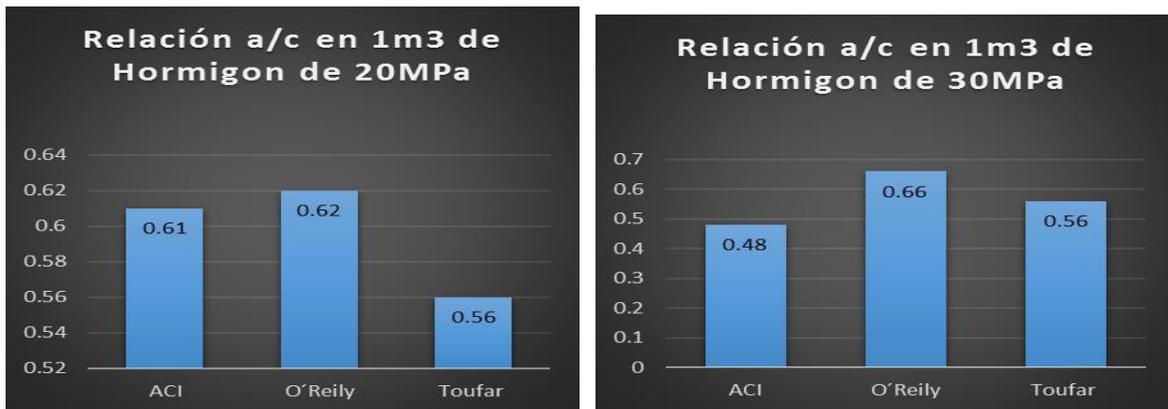


Grafico 3.5: Relación agua/cemento

Tabla 3.3: Resistencia a los 28 días y respectivas relaciones a/c

Mezcla	A/C	Resistencia
F	0.42	40.83
D	0.55	23.78
H	0.6	33.08
E	0.61	39.66
G	0.61	20.7
A	0.62	28.07
B	0.66	27.17
C	0.77	18.68



Gráfico 3.6: Influencia de la relación A/C en la resistencia.

Al analizar los resultados de resistencia de las mezclas diseñadas a los 28 días una vez más se puede comprobar el hecho de que a una mayor relación agua cemento menor es la resistencia, aunque en algunos de los casos los valores de resistencia se dispersan de la tendencia eso es un caso que se explica por el uso de aditivo, pues en que, aunque sea “grande” la relación agua cemento esta no afecta la resistencia debido al efecto del aditivo.

3.4. Resultados de resistencias del Hormigón.

3.1.1.1. Dosificación según O'Reilly

Probetas elaboradas con P-35 para una resistencia mecánica estimada de 20 MPa

Tabla 3.4: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 20MPa elaborado con Cemento portland simples.

Identificación	Edad	Resistencia
A1	3	13
A2	7	20.52
A3	28	

Probetas elaboradas con P-35 para una resistencia mecánica estimada de 30 MPa

Tabla 3.5: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 30 MPa elaborado con Cemento Portland.

Identificación	Edad	Resistencia
B1	3	14.24
B2	7	17.93
B3	28	

Probetas elaboradas con P-35+LC-2 para una resistencia mecánica estimada de 20 MPa

Tabla 3.6: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 20 MPa elaborado con Cemento Portland y LC-2.

Identificación	Edad	Resistencia
C1	3	9.39
C2	7	11.38
C3	28	

Probetas elaboradas con P-35+LC-2 con una resistencia mecánica estimada de 30 MPa

Tabla 3.7: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 30 MPa elaborado con Cemento Portland y LC-2.

Identificación	Edad	Resistencia
D1	3	10,76
D2	7	13,16
D3	28	

Probetas elaboradas con P-35+ Aditivo con una resistencia mecánica estimada de 20 MPa

Tabla 3.8: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 20 MPa elaborado con Cemento Portland y 1.2 % de aditivo retardador de fraguado.

Identificación	Edad	Resistencia
E1	3	17,27
E2	7	21,42
E3	28	

Probetas elaboradas con P-35 + Aditivo con una resistencia mecánica estimada de 30 MPa

Tabla 3.9: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 30 MPa elaborado con Cemento Portland y 1.2 % de aditivo retardador de fraguado.

Identificación	Edad	Resistencia
F1	3	18,4
F2	7	26,04
F3	28	

3.1.1.2. Probetas dosificadas según ACI

Probetas elaboradas con P-35 con una resistencia mecánica estimada de 20 MPa

Tabla 3.10: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 20 MPa elaborado con Cemento portland.

Identificación	Edad	Resistencia
G1	3	6.04
G2	7	7.88
G3	28	

Probetas elaboradas con P-35 con una resistencia mecánica estimada de 30 MPa

Tabla 3.11: Resistencias a diferentes edades de las muestras de hormigón de 2 MPa elaborado con Cemento portland y 1.2 % de aditivo retardador del fraguado.

Identificación	Edad	Resistencia
H1	3	11,84
H2	7	16,33
H3	28	

3.4.1. Valoración de la influencia del uso de aditivos y adiciones en la resistencia del hormigón a diferentes edades.

En las siguientes gráficas se observan los resultados de los ensayos de resistencia, en ello se puede ver que el uso de aditivo ejerce una influencia de forma positiva respecto a la resistencia ya que esta aumenta, y al haber usado un aditivo retardador de fraguado se observa que la resistencia de los 3 a los 7 días no se desarrolla tanto como de los 7 a los 28 días lo que es normal en ese tipo de aditivo.

Se observa además que los valores de resistencia más bajos son los de los especímenes donde se le añadió LC-2 lo que se explica debido a la reducción del cemento.

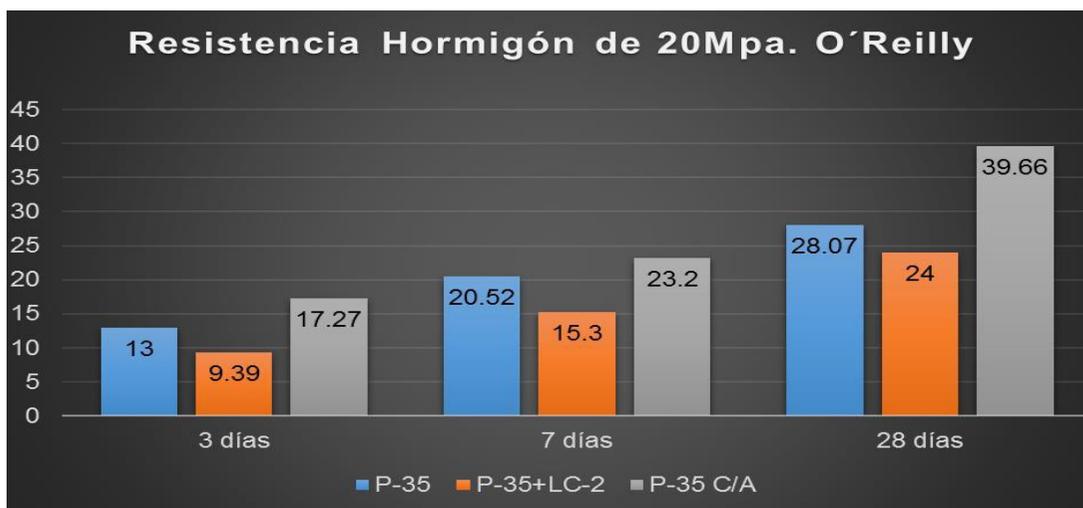


Grafico 3.7: Resistencia a los 3, 7 y 28 días, de hormigones de 20 MPa con diferentes materiales, diseñados por el método O'Reilly.

Se muestra en el gráfico las resistencias de hormigones diseñados por el método O'Reilly obtenidas a los 3, 7 y 28 días de elaboradas las mezclas con cemento portland simple, añadiendo al cemento simple un 20% de la adición LC-2 y empleando un aditivo retardador de fraguado. Lo que se observa es que se obtienen mayores resultados al utilizar aditivos y se obtienen resultados menores al utilizar adiciones.

Pasados los siete días para el caso de la mezcla elabora con cemento simple y en la que se utiliza aditivo se logra llegar a la resistencia de proyecto, mientras que la mezcla de cemento con un 20% de adición aun no llega a la resistencia de proyecto.

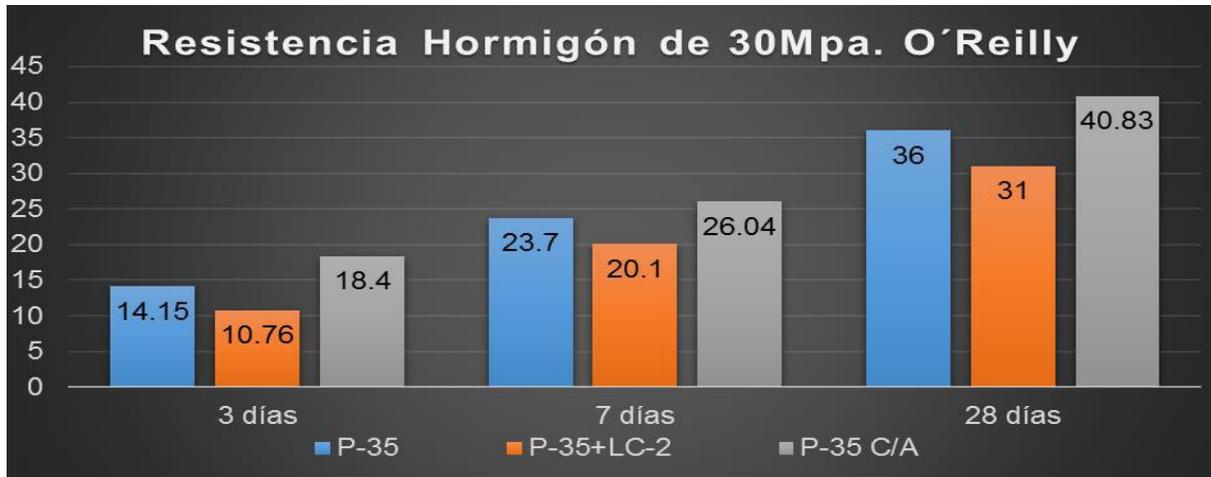


Grafico 3.8: Resistencia a los 3, 7 y 28 días, de hormigones de 30 MPa con diferentes materiales, diseñados por el método O'Reilly.

En las muestras de hormigón de 30 MPa todos los valores de resistencia a los 7 días son mayores que el 75% de resistencia esperada y a los 28 días se logra la resistencia esperada.

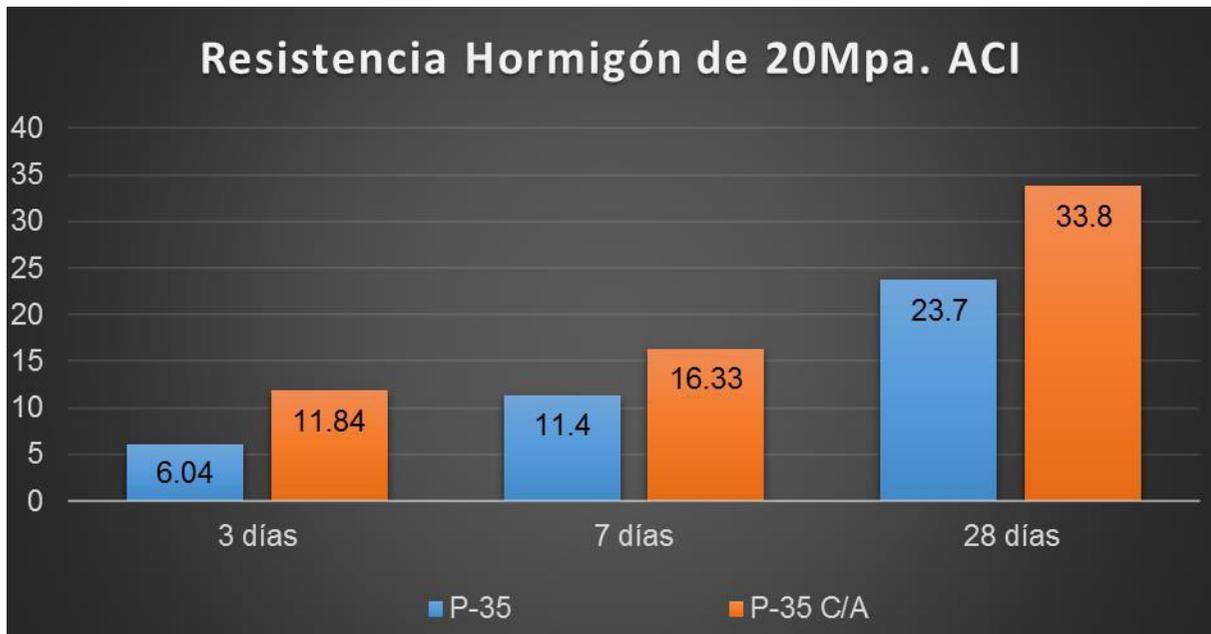


Grafico 3.9: Resistencia a los 3, 7 y 28 días, de hormigones de 20 MPa con diferentes materiales, diseñados por el método ACI.

Los hormigones obtenidos por este método, aunque alcanzan la resistencia esperada son inferiores a los que se obtuvieron en el método anterior.

3.4.2. Comparación de la resistencia en los dos métodos analizados, O'Reilly y ACI.



Grafico 3.10: Comparación de las resistencias de los hormigones obtenidas en 3 días por el ACI y por O'Reilly

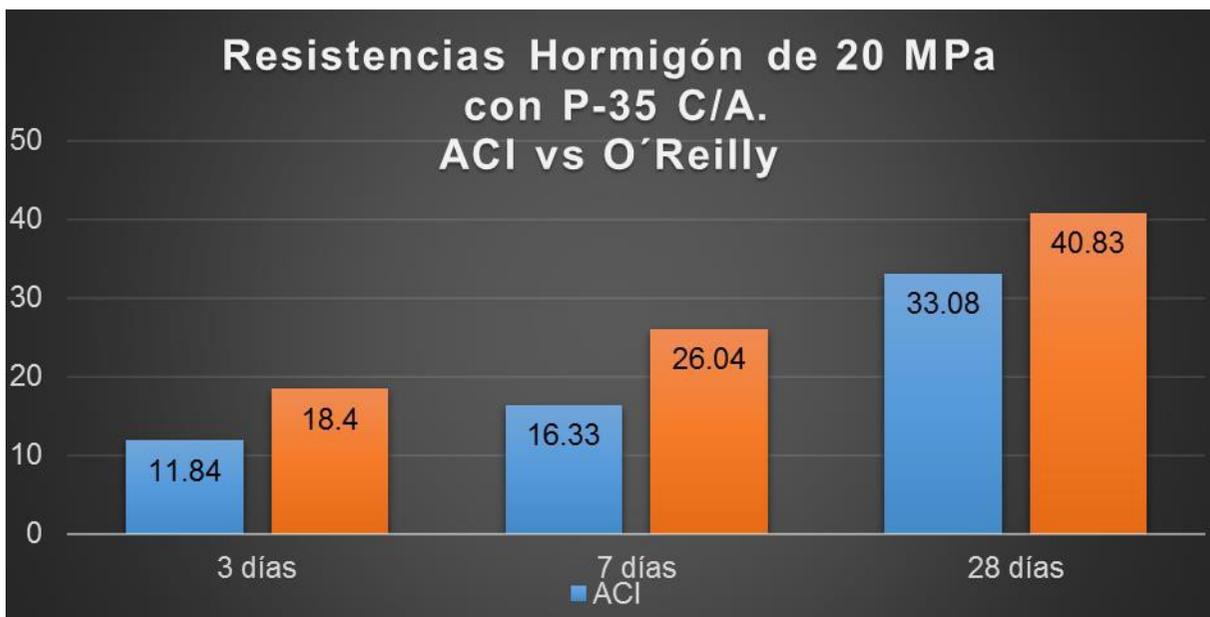


Grafico 3.11: Comparación de las resistencias de los hormigones obtenidas en 7 días por el ACI y por O'Reilly

Se observa en los gráficos que la diferencia de resistencia de hormigón con y sin aditivo es mayor en el método del ACI, aunque este de menores resultados que en el de O'Reilly

Se muestra en los gráficos 3.1. y 3.11, que la diferencia de resistencia de hormigón con y el sin aditivo al pasar 7 días sigue mayor en el método del ACI, y que en el metodo ACI la

resistencia continua con menores resultados que en el método de O'Reilly tanto que en este se logra ya en esta edad la resistencia de diseño tanto con o sin aditivo.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las mezclas diseñadas el método del ACI nos proporciona menores resistencias que el método de O'Reilly, esto se debe a que el método de ACI no considera la forma de los áridos como lo hace O'Reilly, al no tener en cuenta de forma tan detallada las características del árido, la cantidad de los mismos y el contenido de cemento son menores que lo que necesita realmente la mezcla.

3.5. Conclusiones parciales

- ✓ Se pudo realizar pruebas experimentales solo para el método ACI y el de O'Reilly debido a la carencia de materiales para continuar los experimentos.
- ✓ De la evaluación realizada se comprobó una vez más que para los hormigones de la región central de Cuba es preferible dosificar por el método de O'Reilly que, por el ACI, aunque este último sea recomendado debido a los resultados obtenidos internacionalmente.
- ✓ Por las características de los áridos de Cuba es de extrema importancia ya que se les podría llamar a los áridos de esta región como especiales por sus condiciones de explotación su origen y tantos otros factores que afectan a la calidad de este material que, a su vez afecta grandemente la resistencia del hormigón.
- ✓ Es importante que se utilicen métodos que garanticen menores valores de la relación agua cemento por ser un parámetro que afecta a todas las propiedades del hormigón, principalmente en estado fresco, en combinación con el uso de aditivos retardadores de fraguado que son de extrema importancia en Cuba debido a las condiciones climáticas del país, de formas a no condicionar la calidad de las obras.
- ✓ Aun teniendo menores resultados en los hormigones con adiciones es importante referir que las probetas a las que se añadió LC-2 presentan superficies con una mejor apariencia, pues presentan menos oquedades.
- ✓ Aunque no se hayan realizado pruebas con la dosificación por el método Toufar por la relación agua/cemento obtenida se puede intuir que los hormigones dosificados por este método garantizan mayores resistencias.

Conclusiones generales

- ✓ Al analizar las bibliografías ya existentes se ha podido constatar que existen distintos métodos. Para su utilización importa conocer los materiales que tenemos, las condiciones en que nos encontramos, así como los recursos que se tienen.
- ✓ Con la caracterización de los materiales usados en la presente investigación se verifica que todos los componentes del hormigón son de extrema importancia pues que cada uno aporta en la calidad del mismo, desde la utilización de cantidades correctas y teniendo en cuenta que los áridos de la región central se caracterizan por una angularidad muy alta debido a que mayoritariamente son procedentes del proceso de trituración de rocas en canteras, lo que obliga un estudio más detallado de los mismo.
- ✓ Se valoró el empleo de los 3 métodos O'Reilly, ACI y Toufar, en el diseño de mezclas de hormigón en diferentes condiciones, se ha constatado que es de extrema importancia el conocimiento de las condiciones reales de trabajo para decidir el método idóneo para el diseño de una mezcla de hormigón. A todo eso se le suma la importancia de cumplir los parámetros establecidos en las normas nacionales e internacionales.

Recomendaciones

- A los áridos de la región central se recomienda hacerles muchos más estudios de formas a tener una base de datos que permita la creación de un base de datos que facilite el estudio del comportamiento de este material para su uso en investigaciones futuras.
- Existe una necesidad de invertir en el desarrollo de los programas de dosificación con vista a mejorar la calidad de los hormigones ya que este parece ser aun el material número uno de la construcción por muchos más años. Por eso recomiendo seguir con la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI211.1-91. (2000). Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight, and Mass Concrete 1. EUA.
- ACI211.3-91. (2000). Guide for Selecting Proportions for No Slump Concrete. 1.
- ACI211.4-91. (2000). Guide for Selecting Proportions for High Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash
- Blanco, R. (2006). *Diseño Del Hormigon. Evolucion Y Práctica En Cuba* (C. T. P. E. Desarrollo & D. L. M. D. Construcción Eds.). Cuba: Habana.
- Bloem, D. (1961). Cement, Lim e Gravel. 172.
- Bloem, D., & Gaynor, R. (1960). Proc. Am. Concr. Inst. 1429.
- Cant, Z. (1930). Erfahrungen mit der Baukontrolle *Eissenhetonhau*.
- Cristina, A., Nicolas, P., Camila, D., & Julieth, F. (2017). *Caracterización Físico-Química, Mecánica Y Mineralogica De Areniscas Utilizadas Para Construcción De La Zona Franca De Tocancipá, En La Cantero Rodeb Y Acopios - Sector Hato Grande – Sopó* (Investigación), UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS, Bogotá.
- Chile, I. d. c. y. h. (2002). Influencia de los áridos en la calidad del hormigón Retrieved 18.03.2019, 2019, from info@emb.cl
- ENCI513. (2011). Rational Concrete Mix Design Procedures Centred on Aggregate Packing and Volumetric Analysis. Canada.
- Fallas, G., Madrigal, C., García, M., Valenciano, I., Vega, L., & Guzmán, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 80-86.
- Gámez, D., Saldaña, H., & Corral, R. (2017, 7-12/2017). Estudio de factibilidad y caracterización de áridos para hormigón estructural. *Ingeniería y Desarrollo*, 35, 284-300.
- García, J. (2004). *Diseño de Hormigones Dirigido a la Aplicación.*, Universidad Politécnica de Cataluña., España.
- Geraldo, C. (2005). Capitulo 15 Dosagem dos Concretos de Cimento Portland. *IBRACON Concreto*, 1, 450 -451.
- German, J., & Hanes, K. (2014). *Comparacion de 4 metodos diseño de mezclas* UNIVERSIDAD PERUANA UNION Perú.
- Glanville., Collins., & Matthews. (1938). Fef Zement (pp. 476).
- Herrero, D. (1968 Julio, agosto, septiembre de 1968
-). Dosificación de hormigones *Materiales de Construcción*, 18.
- Jiménez, P., García, A., & Morán, C. (1991). *Hormigón Armado* (9 ed. Vol. 1). Barcelona: España.
- José, J. (2004). *Tecnología Hormigonado*.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *PCA Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (P. C. Association Ed. 1 ed.). EE.UU: Skokie, Illinois.
- Lenhard, H. (1942). Zement. 123.
- Madrid., I. d. c. (2010). Dosificación de hormigón. Retrieved 18.03.2019, 2019, from <https://plus.google.com>
- Mapei. (2019). Dynamon SR2. 2019, from www.mapei.com
- Mehta, P., & Monteiro, P. (1998). *Concreto. Estructura, propiedades y materiales* (I. M. d. C. y. d. C. A.C Ed.). México.
- NC 120, O. N. d. N. d. C. (2014). NC Hormigón Hidráulico - Especificaciones. Habana: Cuba.
- NC 221 , O. N. d. N. d. C. (2002). Hormigón- Elaboración de probetas para ensayos. Habana Cuba.

- NC 228-1, O. N. d. N. d. C. (2005). Aditivo para hormigones-Morteros y pastas-Parte 1: Aditivos para hormigones- Requisitos. Habana: Cuba.
- NC 244, O. N. d. N. d. C. (2005). Hormigón endurecido- determinación de la resistencia a la compresión en las probetas cilíndricas. Habana: Cuba.
- NC 251, O. N. d. N. (2013). ÁRIDOS PARA HORMIGONES HIDRÁULICOS — REQUISITOS. Habana: Cuba.
- NC 293, O. N. d. N. d. C. (2005). Código de buenas prácticas para el curado del hormigón. Habana Cuba.
- NC 353, O. N. d. N. (2004). Aguas para el amasado y curado del hormigón y los morteros— especificaciones (pp. 3). Habana: Cuba.
- NC 526, O. N. d. N. d. C. (2007). Cemento hidráulico- Terminos y definiciones. Habana: Cuba.
- NC 724, O. N. d. N. d. C. (2009). Ensayos del Hormigón. Resistencia del Hormigón en estado endurecido. Habana: Cuba.
- O'Reilly, V. (2007). *Métodos para Dosificar Concretos de Elevado Desempeño* (A. C. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto Ed.). México D. F.
- Ortega, P. (2012). *Optimización del esqueleto granular mediante la utilización del método de superficies de respuestas (MSR). Diseño de mezclas*. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Pef. Graf, O. (1930). Dtsch. Auss. für Eisenheton. In C. r. n. 63 (Ed.), (pp. 14).
- ROCÍO LAPUENTE ARAGÓ. Reacciones ÁridoÁlcali *Temas de química (II) para alumnos de ITOP e ICCP*.
- Smith, W. (1998). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (C. Fernandez Ed. Tercera edición ed.). Madrid: McGraw-Hill, Inc.
- Steopoe, A. (1968). Influencia del árido soiiire la resistencia de los hormigones *Materiales de Construcción, 18*, 67-71.
- Walker, S., & Bloem, L. (1960). Effects of aggregate size on of concrete. *AC I Journ, 283*
- Zollinger, R. (1961). Der Tiefbau (pp. 114).

ANEXOS

Anexo 1: contenido aproximado de agua de amasado y aire, requerido para diferentes características y tamaños máximos de áridos.

Asentamiento mm	Volumen de agua en kg / m ³ para Tamaños Máximos indicados en mm							
	9.5	12.5	19.0	25.0	37.5	50.0	75.0	150.0
Hormigones Sin Aire Ocluido (Non Air entrained)								
25 / 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 / 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 / 175	243	228	216	202	190	178	160	-
Aire Atrapado %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2-
Hormigones Con Aire Ocluido (Air entrained)								
25 / 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 / 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 / 175	216	205	197	184	174	166	154	-
% Aire Ocluido por exposición climática (ciclos-congelación y deshielo)								
Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Anexo 2: Relación agua cemento en función de la resistencia a 28 días y al aire ocluido.

Resistencia a Compresión a 28 días. MPa	Relación Agua / Cemento (en peso)	
	Sin Aire Ocluido	Con Aire Ocluido
40	0.42	-
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.62	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

Anexo 3: Volumen de árido grueso por unidad de volumen del hormigón.

Tamaño Máximo Nominal. mm	Volumen de árido grueso compactado seco para diferentes módulos de finura de la arena por unidad de volumen de hormigón			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	0.66	0.64	0.62	0.60
25.0	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50.0	0.78	0.76	0.74	0.72
75.0	0.82	0.80	0.78	0.76
150.0	0.87	0.85	0.83	0.81

Anexo 4: Estimado preliminar del peso del hormigón fresco.

Árido Grueso Tamaño Máximo Nominal	Densidad del hormigón estimada (kg/m ³)	
	Sin Aire Ocluido	Con Aire Ocluido
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19.0	2345	2275
25.0	2380	2290
37.5	2410	2350
50.0	2445	2345
75.0	2490	2405
150.0	2530	2435

Anexo 5: Hoja cálculo para el método Toufar

Data Local

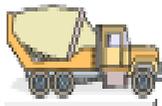
Aggregate Description

Pit1	res. intermediale 5-8 mm washed
Pit2	res. Finer 0-5 mm
Pit3	

Proceso Lab

X Planning

ASTM Equivalent	CSMA Screen Size (mm)	Bin 1	Bin 2	Bin 3
4.75"	119.0	100.0	100.0	
7.5"	190.0	100.0	100.0	
9.5"	241.0	100.0	100.0	
12.5"	318.0	100.0	100.0	
15.0"	381.0	100.0	100.0	
19.0"	483.0	100.0	100.0	
25.0"	635.0	100.0	100.0	
30.0"	762.0	100.0	100.0	
37.5"	953.0	100.0	100.0	
47.5"	1207.0	100.0	100.0	
60.0"	1524.0	100.0	100.0	
75.0"	1905.0	100.0	100.0	
90.0"	2286.0	100.0	100.0	
106.0"	2697.0	100.0	100.0	
125.0"	3175.0	100.0	100.0	
150.0"	3810.0	100.0	100.0	
180.0"	4570.0	100.0	100.0	
210.0"	5330.0	100.0	100.0	
250.0"	6350.0	100.0	100.0	
300.0"	7620.0	100.0	100.0	
360.0"	9140.0	100.0	100.0	
420.0"	10668.0	100.0	100.0	
480.0"	12200.0	100.0	100.0	
540.0"	13732.0	100.0	100.0	
600.0"	15264.0	100.0	100.0	
660.0"	16796.0	100.0	100.0	
720.0"	18328.0	100.0	100.0	
780.0"	19860.0	100.0	100.0	
840.0"	21392.0	100.0	100.0	
900.0"	22924.0	100.0	100.0	
960.0"	24456.0	100.0	100.0	
1020.0"	25988.0	100.0	100.0	
1080.0"	27520.0	100.0	100.0	
1140.0"	29052.0	100.0	100.0	
1200.0"	30584.0	100.0	100.0	
1260.0"	32116.0	100.0	100.0	
1320.0"	33648.0	100.0	100.0	
1380.0"	35180.0	100.0	100.0	
1440.0"	36712.0	100.0	100.0	
1500.0"	38244.0	100.0	100.0	
1560.0"	39776.0	100.0	100.0	
1620.0"	41308.0	100.0	100.0	
1680.0"	42840.0	100.0	100.0	
1740.0"	44372.0	100.0	100.0	
1800.0"	45904.0	100.0	100.0	
1860.0"	47436.0	100.0	100.0	
1920.0"	48968.0	100.0	100.0	
1980.0"	50500.0	100.0	100.0	
2040.0"	52032.0	100.0	100.0	
2100.0"	53564.0	100.0	100.0	
2160.0"	55096.0	100.0	100.0	
2220.0"	56628.0	100.0	100.0	
2280.0"	58160.0	100.0	100.0	
2340.0"	59692.0	100.0	100.0	
2400.0"	61224.0	100.0	100.0	
2460.0"	62756.0	100.0	100.0	
2520.0"	64288.0	100.0	100.0	
2580.0"	65820.0	100.0	100.0	
2640.0"	67352.0	100.0	100.0	
2700.0"	68884.0	100.0	100.0	
2760.0"	70416.0	100.0	100.0	
2820.0"	71948.0	100.0	100.0	
2880.0"	73480.0	100.0	100.0	
2940.0"	75012.0	100.0	100.0	
3000.0"	76544.0	100.0	100.0	
3060.0"	78076.0	100.0	100.0	
3120.0"	79608.0	100.0	100.0	
3180.0"	81140.0	100.0	100.0	
3240.0"	82672.0	100.0	100.0	
3300.0"	84204.0	100.0	100.0	
3360.0"	85736.0	100.0	100.0	
3420.0"	87268.0	100.0	100.0	
3480.0"	88800.0	100.0	100.0	
3540.0"	90332.0	100.0	100.0	
3600.0"	91864.0	100.0	100.0	
3660.0"	93396.0	100.0	100.0	
3720.0"	94928.0	100.0	100.0	
3780.0"	96460.0	100.0	100.0	
3840.0"	97992.0	100.0	100.0	
3900.0"	99524.0	100.0	100.0	
3960.0"	101056.0	100.0	100.0	
4020.0"	102588.0	100.0	100.0	
4080.0"	104120.0	100.0	100.0	
4140.0"	105652.0	100.0	100.0	
4200.0"	107184.0	100.0	100.0	
4260.0"	108716.0	100.0	100.0	
4320.0"	110248.0	100.0	100.0	
4380.0"	111780.0	100.0	100.0	
4440.0"	113312.0	100.0	100.0	
4500.0"	114844.0	100.0	100.0	
4560.0"	116376.0	100.0	100.0	
4620.0"	117908.0	100.0	100.0	
4680.0"	119440.0	100.0	100.0	
4740.0"	120972.0	100.0	100.0	
4800.0"	122504.0	100.0	100.0	
4860.0"	124036.0	100.0	100.0	
4920.0"	125568.0	100.0	100.0	
4980.0"	127100.0	100.0	100.0	
5040.0"	128632.0	100.0	100.0	
5100.0"	130164.0	100.0	100.0	
5160.0"	131696.0	100.0	100.0	
5220.0"	133228.0	100.0	100.0	
5280.0"	134760.0	100.0	100.0	
5340.0"	136292.0	100.0	100.0	
5400.0"	137824.0	100.0	100.0	
5460.0"	139356.0	100.0	100.0	
5520.0"	140888.0	100.0	100.0	
5580.0"	142420.0	100.0	100.0	
5640.0"	143952.0	100.0	100.0	
5700.0"	145484.0	100.0	100.0	
5760.0"	147016.0	100.0	100.0	
5820.0"	148548.0	100.0	100.0	
5880.0"	150080.0	100.0	100.0	
5940.0"	151612.0	100.0	100.0	
6000.0"	153144.0	100.0	100.0	
6060.0"	154676.0	100.0	100.0	
6120.0"	156208.0	100.0	100.0	
6180.0"	157740.0	100.0	100.0	
6240.0"	159272.0	100.0	100.0	
6300.0"	160804.0	100.0	100.0	
6360.0"	162336.0	100.0	100.0	
6420.0"	163868.0	100.0	100.0	
6480.0"	165400.0	100.0	100.0	
6540.0"	166932.0	100.0	100.0	
6600.0"	168464.0	100.0	100.0	
6660.0"	170000.0	100.0	100.0	
6720.0"	171536.0	100.0	100.0	
6780.0"	173072.0	100.0	100.0	
6840.0"	174608.0	100.0	100.0	
6900.0"	176144.0	100.0	100.0	
6960.0"	177680.0	100.0	100.0	
7020.0"	179216.0	100.0	100.0	
7080.0"	180752.0	100.0	100.0	
7140.0"	182288.0	100.0	100.0	
7200.0"	183824.0	100.0	100.0	
7260.0"	185360.0	100.0	100.0	
7320.0"	186896.0	100.0	100.0	
7380.0"	188432.0	100.0	100.0	
7440.0"	189968.0	100.0	100.0	
7500.0"	191504.0	100.0	100.0	
7560.0"	193040.0	100.0	100.0	
7620.0"	194576.0	100.0	100.0	
7680.0"	196112.0	100.0	100.0	
7740.0"	197648.0	100.0	100.0	
7800.0"	199184.0	100.0	100.0	
7860.0"	200720.0	100.0	100.0	
7920.0"	202256.0	100.0	100.0	
7980.0"	203792.0	100.0	100.0	
8040.0"	205328.0	100.0	100.0	
8100.0"	206864.0	100.0	100.0	
8160.0"	208400.0	100.0	100.0	
8220.0"	209936.0	100.0	100.0	
8280.0"	211472.0	100.0	100.0	
8340.0"	213008.0	100.0	100.0	
8400.0"	214544.0	100.0	100.0	
8460.0"	216080.0	100.0	100.0	
8520.0"	217616.0	100.0	100.0	
8580.0"	219152.0	100.0	100.0	
8640.0"	220688.0	100.0	100.0	
8700.0"	222224.0	100.0	100.0	
8760.0"	223760.0	100.0	100.0	
8820.0"	225296.0	100.0	100.0	
8880.0"	226832.0	100.0	100.0	
8940.0"	228368.0	100.0	100.0	
9000.0"	229904.0	100.0	100.0	
9060.0"	231440.0	100.0	100.0	
9120.0"	232976.0	100.0	100.0	
9180.0"	234512.0	100.0	100.0	
9240.0"	236048.0	100.0	100.0	
9300.0"	237584.0	100.0	100.0	
9360.0"	239120.0	100.0	100.0	
9420.0"	240656.0	100.0	100.0	
9480.0"	242192.0	100.0	100.0	
9540.0"	243728.0	100.0	100.0	
9600.0"	245264.0	100.0	100.0	
9660.0"	246800.0	100.0	100.0	
9720.0"	248336.0	100.0	100.0	
9780.0"	249872.0	100.0	100.0	
9840.0"	251408.0	100.0	100.0	
9900.0"	252944.0	100.0	100.0	
9960.0"	254480.0	100.0	100.0	
10020.0"	256016.0	100.0	100.0	
10080.0"	257552.0	100.0	100.0	
10140.0"	259088.0	100.0	100.0	
10200.0"	260624.0	100.0	100.0	
10260.0"	262160.0	100.0	100.0	
10320.0"	263696.0	100.0	100.0	
10380.0"	265232.0	100.0	100.0	
10440.0"	266768.0	100.0	100.0	
10500.0"	268304.0	100.0	100.0	
10560.0"	269840.0	100.0	100.0	
10620.0"	271376.0	100.0	100.0	
10680.0"	272912.0	100.0	100.0	
10740.0"	274448.0	100.0	100.0	
10800.0"	275984.0	100.0	100.0	
10860.0"	277520.0	100.0	100.0	
10920.0"	279056.0	100.0	100.0	
10980.0"	280592.0	100.0	100.0	
11040.0"	282128.0	100.0	100.0	
11100.0"	283664.0	100.0	100.0	
11160.0"	285200.0	100.0	100.0	
11220.0"	286736.0	100.0	100.0	
11280.0"	288272.0	100.0	100.0	
11340.0"	289808.0	100.0	100.0	
11400.0"	291344.0	100.0	100.0	
11460.0"	292880.0	100.0	100.0	
11520.0"	294416.0	100.0	100.0	
11580.0"	295952.0	100.0	100.0	
11640.0"	297488.0	100.0	100.0	
11700.0"	299024.0	100.0	100.0	
11760.0"	300560.0	100.0	100.0	
11820.0"	302096.0	100.0	100.0	
11880.0"	303632.0	100.0	100.0	
11940.0"	305168.0	100.0	100.0	
12000.0"	306704.0	100.0	100.0	



Optimize

Final Gradation

Bin 1 + Bin 2	Combined Gradation	Final % Retained Individual	Power m/cals
100.00	100.00	0.00	100.00
100.00	100.00	0.00	100.00
100.00	100.00	0.00</	