



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ciencias Naturales y Matemática

Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales

“EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS CEMENTOS A PARTIR DE LA
CORRELACIÓN DE SUS PROPIEDADES ASOCIADAS CON LA
PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN”

PROYECTO DE GRADUACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentado por:

ALICIA CONSUELO GARÓFALO MERO

GUAYAQUIL – ECUADOR

AÑO

2015

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser la luz que guía mi vida.

A mi madre, hermana y familia por su amor y apoyo incondicional.

Al Centro Técnico del Hormigón, especialmente al Ing. Cristian Velasco por su valiosa contribución en el desarrollo de este proyecto.

A mi directora de tesis la PhD. Olga González por su aporte y colaboración en este trabajo.

A mis amigos y todos aquellos quienes han estado junto a mí en esta etapa importante de mi vida.

DEDICATORIA

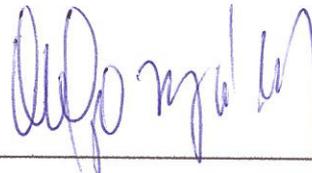
A Dios por ser mi guía y Salvador.

A mi abuelo Pedro Mero, por
haberme enseñado la riqueza de
un corazón humilde.

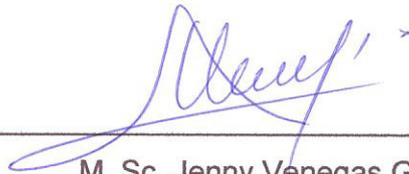
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



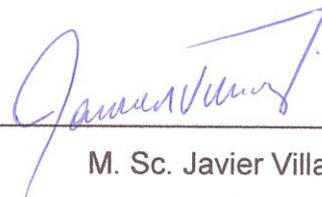
Ph.D. David Matamoros
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ph. D. Olga González
DIRECTORA DE TESIS



M. Sc. Jenny Venegas Gallo
VOCAL PRINCIPAL



M. Sc. Javier Villacís
VOCAL ALTERNO

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Proyecto de Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Alicia Consuelo Garófalo Mero

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo analizar las propiedades químicas y físicas de ocho variedades de cementos, mediante ensayos de laboratorio, valorar su incidencia en el desempeño del hormigón.

La primera parte del estudio consistió en el muestreo de cada tipo de cemento a analizar.

En la segunda parte del estudio se llevaron a cabo ensayos químicos y físicos de cada tipo de cemento. Para el análisis de la composición química de cada cemento, se utilizó el espectrómetro de rayos X ARL9800, aplicando la técnica de fluorescencia de rayos X. Los ensayos físicos se desarrollaron según procedimientos estandarizados en normas nacionales como internacionales.

Dentro de los ensayos físicos a realizados están el módulo de finura, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión de cubos de mortero, desarrollo de temperatura de hidratación y trabajabilidad. Para analizar la durabilidad del hormigón se elaboraron barras de mortero, con el propósito de estudiar el potencial de la reacción álcali-sílice entre el cemento y el agregado.

Se elaboraron lotes de hormigón, tomando como única variable el tipo de cemento; para de esta manera observar el desarrollo de las resistencias a la compresión a edades de 1, 3, 7, 28 días.

Los resultados obtenidos de cada ensayo tanto físicos como químicos permitieron evaluar cada tipo de cemento en la elaboración de hormigón.

Los cementos A, B y C obtuvieron los mejores resultados en cuanto a su desempeño físico, químico y aspectos de durabilidad.

ABREVIATURAS

INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
CEMBUREAU	The European Cement Association
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
FICEM	Federación interamericana del Cemento
INECYC	Instituto Ecuatoriano de Cemento y del Hormigón
CTH	Centro Técnico del Hormigón
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
DCQA	Departamento de Ciencias Químicas y Ambientales
C	Óxido de Calcio
S	Óxido de silicio
A	Óxido de aluminio
F	Óxido de hierro
CH	Hidróxido de calcio o portlandita
C-S-H	Silicato de calcio hidratado
H	Agua
RAS	Reacción álcali-sílice
C-N-S-H	Silicato de calcio-sodio hidratado

C-K-S-H Silicato de calcio-potasio hidratado

SIMBOLOGÍA

$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	Silicato tricálcico
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	Aluminato tricálcico
C_4AF	Aluminoferrita tetracálcico
SiO_2	Dióxido de silicio
Al_2O_3	Óxido de aluminio
Fe_2O_3	Óxido férrico
CaO	Óxido de calcio
CO_2	Dióxido de carbono
MgO	Óxido de magnesio
SO_3	Trióxido de azufre
K_2O	Óxido de potasio
Na_2O	Óxido de sodio
Ti_2O	Dióxido de Titanio
P_2O_5	Óxido de fósforo

$\text{SO}_4 \text{ Ca. } 1/2\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de calcio hidratado
CaCO_3	Carbonato de calcio
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Hidróxido de calcio
NaOH	Hidróxido de sodio
KOH	Hidróxido de potasio
OH^-	Ion hidroxilo
Na^+	Catión sodio
K^+	Catión potasio
Ca^+	Catión calcio
H_2O	Agua
MPa	Mega Pascal
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
ml	Mililitros
l	Litros
In.	Inches ó pulgadas
g	Gramos

pH	Potencial de hidrógeno
f _c	Esfuerzo máximo de compresión
mm	Milímetros
μm	Micra
%	Porcentaje
°C	Grados Centígrados
kJ	Kilojoules
N	Normalidad
CO ₂	Dióxido de Carbono

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA.....	III
DECLARACIÓN EXPRESA	V
RESUMEN	VI
ABREVIATURAS	VIII
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	16
ÍNDICE DE TABLAS	18
CAPÍTULO 1.....	19
1. INTRODUCCIÓN.....	20
1.1.Generalidades	20
1.1.1. Generalidades sobre cemento a nivel mundial	20
1.1.2. Generalidades del cemento en el Ecuador	24
1.2.Definición de Problema	27
1.3.Objetivos	29
1.3.1. Objetivo General.....	29
1.3.2. Objetivos específicos.....	29
1.4.Metodología General.....	30

CAPÍTULO 2.....	36
2. MARCO TEÓRICO.....	37
2.1. Cemento Portland	37
2.1.1. Definición de cemento	37
2.1.2. Materia Prima para la fabricación del cemento Portland	37
2.1.3. Fabricación del cemento Portland	38
2.1.4. Composición química del cemento Portland.....	40
2.1.5. Hidratación del cemento	47
2.1.6. Clasificación de los tipos de cementos en Ecuador.....	49
2.2. Propiedades físicas del cemento	50
2.2.1. Finura	51
2.2.2. Tiempo de fraguado.....	52
2.2.3. Calor de Hidratación	53
2.2.4. Resistencia a la compresión	54
2.3. Hormigón.....	55
2.3.1. Definición de hormigón	55
2.3.2. Componentes del hormigón.....	55
2.3.2.1. Agua.....	55
2.3.2.2. Agregados.....	57

2.3.3.	Estados del hormigón	60
2.3.4.	Propiedades del hormigón	61
2.3.5.	Resistencia a la compresión del hormigón	62
2.3.6.	Diseño de hormigón.....	62
CAPÍTULO 3.....		64
3. PROCEDIMIENTO		65
3.1.	Ubicación	65
3.2.	Análisis químico	65
	Reactivos y muestras	66
	Procedimiento	66
3.3.	Análisis físicos.....	67
3.3.1.	Módulo de finura	67
3.3.2.	Fraguado	67
3.3.3.	Resistencia a la compresión en cubos de mortero	68
3.3.4.	Trabajabilidad- Holcim Cone.....	68
	Reactivos y muestras	68
	Procedimiento	70
3.3.5.	Temperatura de hidratación Holcim Heat	72
3.3.6.	Reacción Álcali-Sílice	75

3.4. Análisis en Hormigón	75
3.4.1. Revenimiento de Hormigón	75
3.4.2. Medición de temperatura en hormigón fresco.....	76
3.4.3. Determinación del contenido de aire en el hormigón fresco	76
3.4.4. Elaboración y curado en obra de especímenes de hormigón	76
3.4.5. Resistencia a la compresión en cilindros.....	76
CAPÍTULO 4.....	77
4. RESULTADOS	78
4.1. Análisis químico en cemento.....	78
4.2. Análisis físicos en cemento	80
4.2.1. Módulo de finura	81
4.2.2. Fraguado	82
4.2.3. Resistencia a la compresión en cubos de mortero	83
4.2.4. Trabajabilidad Holcim Cone.....	87
4.2.5. Desarrollo de temperatura de hidratación Holcim Heat	89
4.2.6. Reacción Álcali-Sílice	91
4.3. Análisis en Hormigón	95
4.3.1. Resistencia a la compresión en cilindros.....	95
CAPÍTULO 5.....	99

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
5.1.CONCLUSIONES.....	100
5.2.RECOMENDACIONES	104
ANEXOS.....	106
BIBLIOGRAFÍA.....	16

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución de la Producción de cemento en el mundo por región 2001-2012 (Millones de toneladas, Base 2001=100).....	21
Figura 1.2: Capacidades de cemento por productores líderes en el mundo 2012 (Millones de toneladas métricas).	23
Figura 1.3: Mapa de las plantas cementeras en el Ecuador.	25
Figura 1.4: Composición del mercado del cemento en el Ecuador (%).	26
Figura 1.5: Esquema de metodología de trabajo para las distintas fases del proyecto de graduación.	31
Figura 2.1: Alita con su zona estructural.....	431
Figura 2.2: Silicato de calcio hidratado.	318
Figura 2.3: Portlandita.....	49
Figura 3.1: HolcimCone y materiales de laboratorio, Centro Técnico del Hormigón (CTH), Holcim, Planta San Eduardo.....	31
Figura 3.2: HolcimHeat, Centro Técnico del Hormigón (CTH), Holcim, Planta San Eduardo.....	7431
Figura 4.1: Aspecto visual de los cementos analizados.....	31
Figura 4.2: Superficie específica de los distintos cementos $m^2.kg^{-1}$	31
Figura 4.3: Fraguado inicial y final de los distintos cementos.	8231

Figura 4.4: Resistencia a la compresión de cubos de mortero de los distintos cementos a 1, 3, 7, 28 días de edad.....	8531
Figura 4.5: Resistencia a la compresión de cubos de mortero de los distintos cementos a 1, 3, 7, 28 días de edad.....	86
Figura 4.6: Pérdida de flujo de los cementos.	88
Figura 4.7: Curvas semiadiabáticas de temperatura de hidratación de cada tipo de	90
Figura 4.8: Crecimiento Acumulativo de temperatura durante 28h.	91
Figura 4.9: Deformación de barras de mortero por reacción álcali-silice.	93
Figura 4.10: Deformación de barras de mortero por reacción álcali-silice, sin cemento H.....	94
Figura 4.11: Desarrollo de resistencias a la compresión en hormigón con cada tipo de cemento.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Lista de Principales productores de cemento a nivel mundial.	22
Tabla 2: Lista de marcas de cemento más utilizadas en el país.	30
Tabla 3: Fases y sus compuestos del cemento portland.	42
Tabla 4: Calores de hidratación de los compuestos puros.	53
Tabla 5: Contenido de clinker en cementos Contenido de clinker en cementos	79
Tabla 6: Resistencia a la compresión en cubos de mortero de los cementos.	84
Tabla 7: Flujo a 10 y 45 minutos de los cementos.	87
Tabla 8: Temperaturas de los cementos.	89
Tabla 9: Deformación de barras de mortero de los diferentes cementos.	92

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El consumo del cemento está relacionado directamente con el aumento de la población mundial y con el progreso de los países, además su uso ha crecido durante las últimas décadas debido al desarrollo de la construcción.

El hormigón es una mezcla de cemento, agua, agregados finos agregados gruesos y en algunas ocasiones aditivos. Siendo el hormigón el medio más común para construir y el cemento su compuesto activo, se ha convertido en un material de mucha importancia.

A pesar que el hormigón está constituido desde un 60 a un 75% de agregado, el papel que desempeña la pasta de cemento es relevante ya que aporta con las características de resistencia, estabilidad, resistencia química, durabilidad, entre otras.

1.1.1. Generalidades sobre cemento a nivel mundial

Una de las regiones que tiene la mayor producción de cemento es Asia, debido al crecimiento poblacional de China. A continuación se muestra en la **Figura 1.1.** tendencias

comparativas de la producción mundial de cemento, por regiones [1].

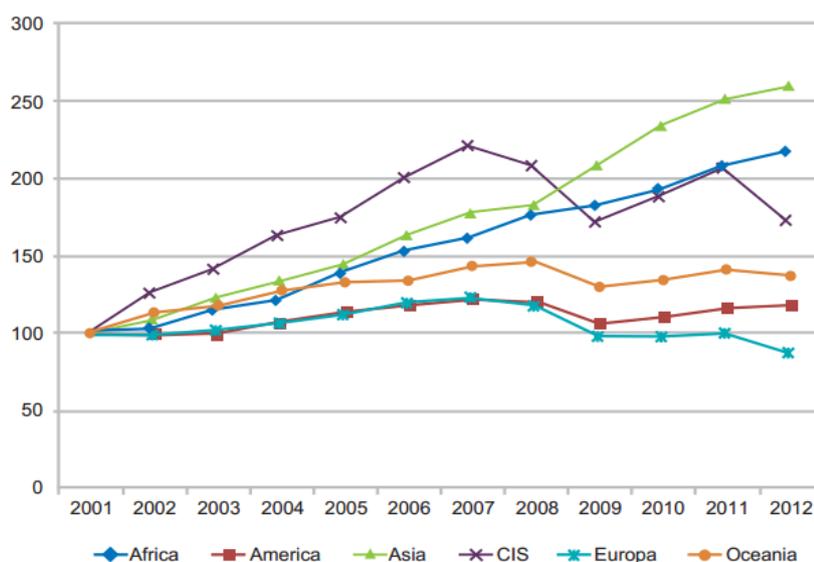


Figura 1.1: Evolución de la Producción de cemento en el mundo por región 2001-1012 (Millones de toneladas, Base 2001=100).

Fuente: The European Cement Association (CEMBUREAU).

La demanda mundial de cemento en el año 2011 alcanzó la cifra de 3.577 millones de toneladas. Cabe recalcar que se ha mantenido una tendencia creciente en el periodo 2002-2011, a una tasa de variación promedio anual del 7.7% [2].

Tabla 1: Lista de Principales productores de cemento a nivel mundial.

Principales Productores de Cemento		
No.	País	Producción en Millones de Toneladas
1	China	2.058
2	India	221
3	Irán	66
4	Estados Unidos	66
5	Brasil	64
6	Turquía	63
7	Japón	56
8	Rusia	56
9	Vietnam	52
10	Indonesia	49
11	Egipto	49
12	Arabia Saudita	48
13	Corea del Sur	48
14	México	35
15	Alemania	34

Fuente: International Cement Review - Global cement industry trends -2012.

Existen empresas cementeras posicionadas en el mercado mundial, en la **Figura 1.2** se muestran 18 industrias y sus respectivas capacidades de producción.

**Cement capacities of leading producers, 2012
(Mta)**

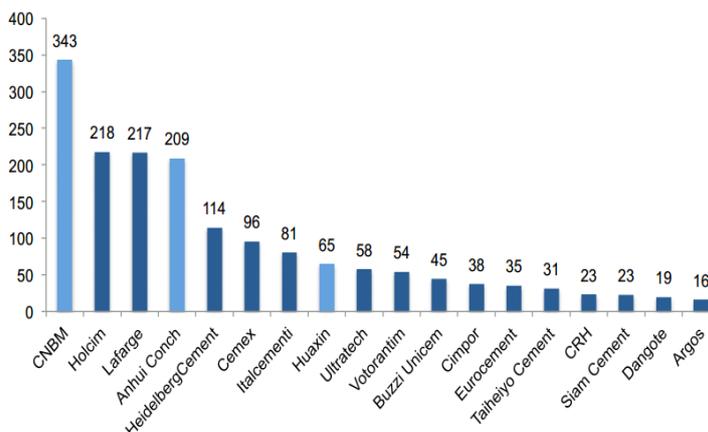


Figura 1.2: Capacidades de cemento por productores líderes en el mundo 2012 (Millones de toneladas métricas).

Fuente: The European Cement Association (CEMBUREAU)

Para el hormigón utilizado en construcción de infraestructuras, es muy importante tener en cuenta su resistencia a la compresión, que se ha relacionado principalmente a la porosidad total de la matriz de pasta de cemento y la cantidad de los agregados.

El término durabilidad del hormigón se define como su capacidad para resistir la acción del intemperismo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro a la cual una estructura se encuentra expuesta. [3].

Recientemente, se ha reconocido que gran parte del hormigón endurecido en la infraestructura en los EE.UU, Europa y en otras

partes se ha ido deteriorando más rápido de lo esperado, gran parte de este deterioro es debido a la corrosión del acero de refuerzo procedente de la entrada de agentes corrosivos a la estructura. También se han presentado fisuras por reacción álcali-sílice.

1.1.2. Generalidades del cemento en el Ecuador

Según el Banco Central del Ecuador en el 2013 la industria de la construcción fue la que más aportó al crecimiento económico debido a que incluye las obras públicas y el sector privado. Entre los años 2010-2011 la comercialización de cemento en el Ecuador creció 7.91%, al pasar de 5.28 a 5.70 millones de toneladas. [2].

En los últimos veinte y dos años en Ecuador, el número de permisos de construcción presenta una tendencia creciente [4]. Según International Cement Review–Global Cement Industries, en el año 2012 el consumo per cápita del Ecuador fue el más alto de Latinoamérica con 388 kg. [5]. El país tiene cementeras ubicadas en las provincias de Azuay, Cotopaxi, Imbabura, Chimborazo y Guayas, como se muestra en la **Figura 1.3** siguiente:



Figura 1.3: Mapa de las plantas cementeras en el Ecuador.

Fuente: Garófalo A., 2015.

La industria del cemento en el Ecuador está liderada por la Multinacional Holcim S.A que empezó sus funciones en el año 2004 desde que compró a la empresa La Cemento Nacional, misma que surgió desde inicios de los años 20 del siglo pasado.

Otros de los líderes en este campo son la Compañía Industrias Guapán S.A, en funciones desde el año 1962; también está Lafarge empresa estadounidense presente en el país desde el año 2004 cuando adquirió la empresa Cementos Selva Alegre y Cementos Chimborazo, que empezó sus actividades en el año 1951.

Cabe puntualizar que actualmente las compañías Industrias Guapán y Cementos Chimborazo se han fusionado para formar La Compañía de Economía Mixta Unión Cementera Nacional, con siglas UCEM C.E.M, la creación se encuentra sustentada en escritura pública e inscrita en el Registro Mercantil del Cantón Riobamba el 18 de noviembre de 2013.

Además se analizará el cemento Cemex (de uso general) de la empresa con el mismo nombre, producido en Colombia, se ha considerado este cemento debido a su consumo en el norte del Ecuador. A continuación se muestra la composición del mercado de cemento en el país.

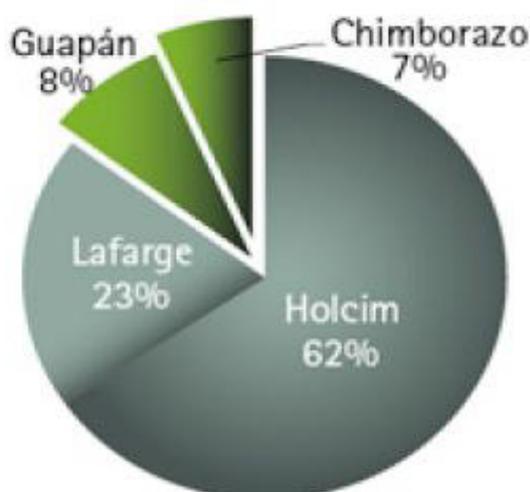


Figura 1.4: Composición del mercado del cemento en el Ecuador (%).

Fuente: Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón.

1.2. Definición de Problema

En la actualidad la producción de cemento a nivel mundial ha tenido un crecimiento importante debido al desarrollo de la construcción, debido a que forma parte de la composición del hormigón. En el 2011 la producción de cemento en Latinoamérica alcanzó el 4.7 % de los 3.6 mil millones de toneladas, correspondientes a la producción mundial. En el 2012 Argentina, Brasil y Colombia alcanzaron una producción mayor a 10 millones de toneladas y un consumo por habitante superior a los 200 kg [4].

Según una publicación en el 2013 de la Federación Interamericana de cemento, los últimos años en el Ecuador se ha apreciado que la producción de cemento ha tenido un crecimiento importante alcanzando una producción superior a los 6 millones de toneladas en el 2012 [4].

En las construcciones de infraestructuras en ocasiones se presentan problemas con la relación a la calidad del hormigón e inmediatamente se lo relaciona con el cemento. El desempeño del hormigón está dado por diversos aspectos, pero una de las principales variables es el cemento utilizado y la calidad del mismo. El uso de cementos de mala calidad o con propiedades físicas o químicas fuera de especificaciones

afectan directamente a la funcionalidad de una infraestructura frente a los agentes ambientales.

En trabajos anteriores se plantea el estudio comparativo de las características físico-mecánicas de ciertos cementos, además hay estudios que tratan diferentes propiedades sin relacionar la incidencia química en la durabilidad del hormigón [6].

Desde el origen de la industria cementera en el Ecuador hasta la actualidad no se han realizado estudios comparativos de las características tanto químicas como físicas de los cementos comercializados en el país.

Hoy en día en Ecuador existen diferentes cementeras, las cuales cubren la demanda del país. Cada Cementera tiene su propia materia prima, sus procesos industriales y su infraestructura; por ello se plantea el análisis de las propiedades tanto físicas como químicas de los distintos tipos de cementos y su incidencia en la durabilidad del hormigón.

El alcance de este trabajo de investigación no se limita al análisis del comportamiento del cemento, sino también del comportamiento de una mezcla de hormigón, para lo cual se llevará a cabo un diseño para cada cemento, tomando al mismo como única variable de control.

El presente proyecto constituiría un aporte y referencia para futuros estudios sobre adiciones para cementos, caracterización de sus propiedades, modificaciones en el proceso de fabricación, sus variaciones en la composición química y la posible evaluación de otros tipos de cementos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Analizar las propiedades químicas y físicas de ocho variedades de cementos producidos por las cementeras en el Ecuador y mediante ensayos de laboratorio, valorar su incidencia en el desempeño del hormigón.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Analizar la composición química de los cementos objeto de este estudio.
2. Realizar los ensayos físicos en mortero¹ y hormigón.
3. Ejecutar un diseño de hormigón con los distintos tipos de cemento
4. Realizar un análisis comparativo de las propiedades de los cementos y de sus correlaciones.

¹ Mortero es una mezcla de pasta de cemento y agregado fino (arena)

1.4. Metodología General

De acuerdo a los objetivos planteados para el presente proyecto de graduación, se procederá a trabajar en las fases presentadas en la **Figura 1.5**, las cuales se llevarán a cabo en su totalidad.

Los análisis y ensayos serán realizados en el laboratorio del Centro técnico del Hormigón (CTH).

A continuación se describe las fases a desarrollar a lo largo del presente estudio:

Fase I: Muestreo de cementos

Esta fase consiste en la recolección y muestreo de los diferentes cementos comercializados y producidos en el país.

Tabla 2: Lista de marcas de cemento más utilizadas en el país.

No.	Marca	Cementera
1	Armadero	Lafarge
2	Campeón	Lafarge
3	Chimborazo	Unión Cementera Nacional
4	Guapán	Unión Cementera Nacional
5	Fuerte	Holcim-Ecuador
6	Fuerte	Holcim-Ecuador
7	Selva Alegre	Lafarge
8	Cemex	Cemex

Fuente: Garófalo A., 2015.

Fase II: Evaluación química y física

Los ensayos químicos consisten en la preparación de las muestras de cada tipo de cemento y el análisis de su composición química, por medio de fluorescencia de rayos X.

Para los ensayos físicos en cemento se llevarán a cabo procedimientos para la determinación de módulo de finura, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión de cubos de mortero, calor de hidratación y trabajabilidad.

El módulo de finura se determina por el método de Blaine que consiste en hacer pasar una cantidad determinada de cemento de porosidad definida. El tamaño y la cantidad de los poros existentes en la capa, son función del tamaño de las partículas y determinan el gasto del aire a través de la capa.

Para la determinación del tiempo de fraguado se aplica el método de Vicat, en donde se prepara una pasta (cemento y agua) de cemento, que se debe almacenar en un cuarto de curado donde inicie el proceso de fraguado. Se realizan penetraciones periódicas en la pasta utilizando la aguja de Vicat. Se considera tiempo de fraguado inicial, al tiempo transcurrido entre el contacto inicial del agua con el cemento y el instante en que la lectura de penetración es de 25mm. El fraguado final, es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del agua con el

cemento y el momento en que la aguja no deja una impresión en la superficie de la pasta.

La determinación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero, consiste en elaborar un mortero (agua, cemento y arena estandarizada) para obtener una fluidez de 110 ± 5 en 25 caídas de la mesa de fluidez. Los cubos de ensayo de 50 mm serán compactados por apisonado en dos capas. Los cubos en sus moldes serán curados por un día, posteriormente se desencofran, se sumergen en agua saturada con cal hasta ser ensayados y finalmente, mediante la aplicación de una carga progresiva de compresión se determinará su resistencia máxima.

El ensayo de trabajabilidad consiste en el uso de la herramienta HolcimCone, que permite evaluar el desempeño reológico² en morteros. La mezcla de agua, cemento y arena fina (Retenida en el tamiz No. 4), es colocada en un cono sobre una placa de vidrio graduada. El cono es llenado y apisonado en dos capas. Posteriormente se levanta el cono y con ayuda de un calibrador Vernier, se realizan las mediciones de flujo se a 10 y 45 min, a partir del instante en que se pone en contacto el agua con el cemento.

² *Reología*.- permite comprender plenamente los conceptos de la fluidez y la estabilidad de las mezclas de concreto, La reología es el estudio de las deformaciones del material y de flujo

El monitoreo de temperatura en la hidratación de la pasta de cemento en un mortero, se llevará a cabo en el equipo HolcimHeat. Las temperaturas generadas por cada muestra, serán registradas en tiempo real en el software ThermoCal, el mismo que genera una curva de temperatura Vs. Tiempo.

La preparación del mortero es la misma usada en el método HolcimCone.

Para el análisis de durabilidad se ensayará un método por medio del cual se determina durante 16 días, las deformaciones provocadas por la reacción álcali-sílice entre el cemento y agregado. Para este método se prepararán barras de mortero con cada tipo de cemento, más agregado retenido en diferentes tamices; los especímenes deben ser curados, desencofrados y sometidos a una solución de NaOH, por un período de 14 días a una temperatura de $80 \pm 2,0$ °C. Durante los 14 días se realizarán lecturas de las expansiones que sufrirán los especímenes.

Al finalizar el ensayo se podrá observar la deformación de los especímenes de cada tipo de cemento y comparar su potencial de reactividad álcali-sílice.

El análisis que se realizará en hormigón es el ensayo de resistencia a la compresión en probetas cilíndricas, de 200 cm de largo X100 cm de diámetro. Los especímenes serán curados, desencofrados, sometidos en agua saturada con cal hasta ser sometidos a cargas progresivas de compresión para determinar su resistencia máxima. Los cilindros serán ensayados a edades de 3, 7 y 28 días.

Fase III: Análisis de resultados

En esta fase se presentarán los resultados detallados para cada tipo de cemento y también se realizarán comparativos entre cementos; se analizarán sus propiedades y su incidencia en la producción de hormigón.

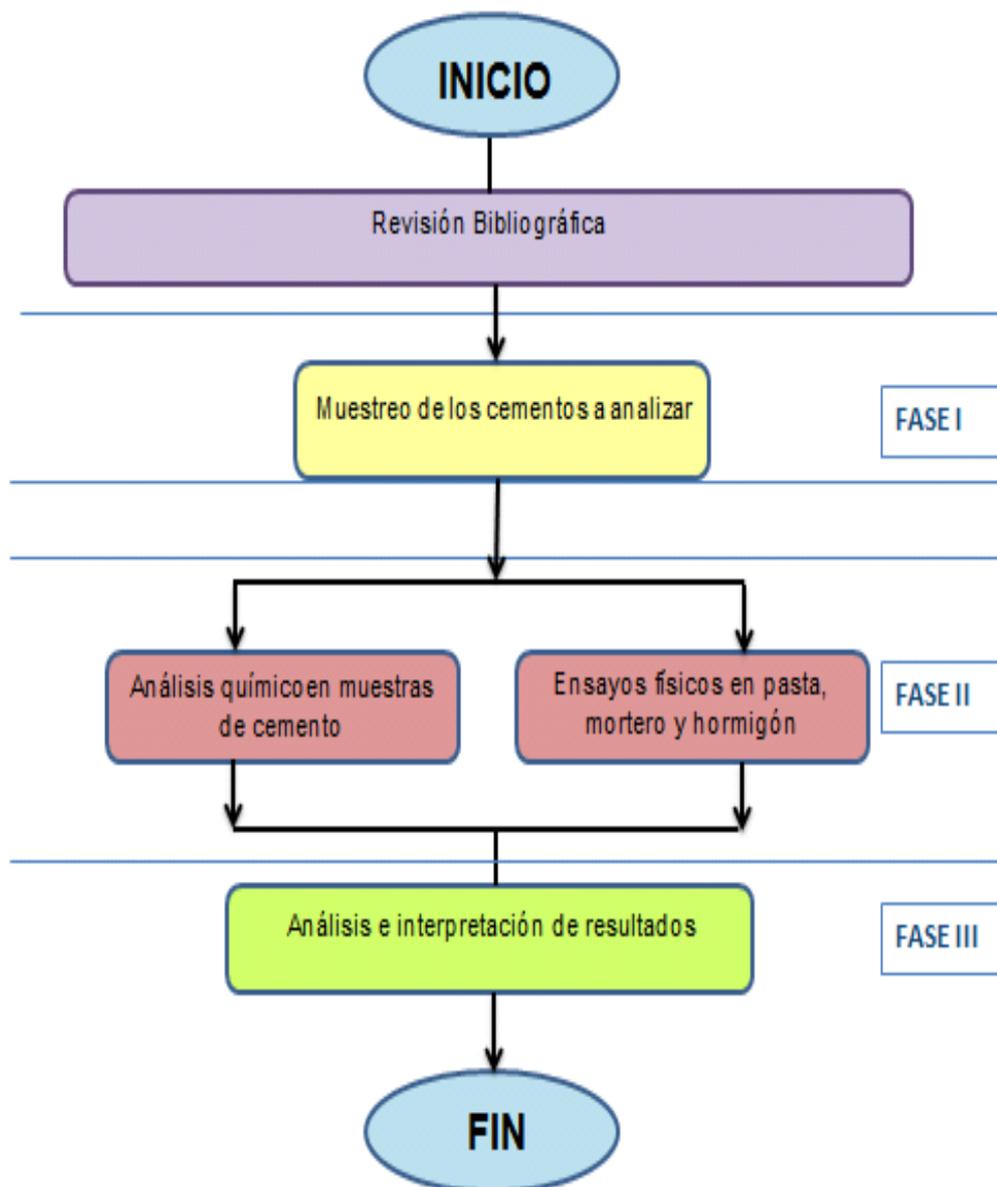


Figura 1.5: Esquema de metodología de trabajo para las distintas fases del proyecto de graduación.

Fuente: Garófalo A., 2015.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento Portland

2.1.1. Definición de cemento

El cemento puede ser descrito como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le proporcionan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto,[7] estos fragmentos pueden ser piedras, arena, ladrillos, etc.

En el mundo de la construcción, puntualmente en la elaboración del hormigón para infraestructuras, es importante mencionar que se utiliza cemento hidráulico el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecerse bajo el agua, ya que experimentan una reacción química con ésta; [8] la composición de los cementos hidráulicos está dada por silicatos y por aluminatos de cal.

Generalmente se clasifica a los cementos hidráulicos como cementos naturales, cementos portland y cementos de alta alúmina.

2.1.2. Materia Prima para la fabricación del cemento Portland

La materia prima está formada por calizas con 85% en CaCO_3 y por productos aportadores de sílice, como margas y las arcillas

que también contienen alúmina, hierro en su composición y componentes minoritarios como Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O y otros. Los compuestos de sílice ayudan al fraguado lento y endurecimiento del cemento [9,10].

El SiO_2 está presente en mayoría de rocas en formas cristalinas, cuando está en forma de cuarcita, arena de cuarzo, arenisca, se encuentra bajo una forma no reactiva, insoluble en agua y resistente al ataque de los ácidos.

El SiO_2 en la calcedonia, ópalo y en la tierra de diatomáceas, se presenta de forma reactiva; algunas puzolanas presentan sílice naturalmente reactiva.

El Al_2O_3 , presente en la mayoría de las arcillas como la bauxita, mezclada con sílice y Fe_2O_3 .

2.1.3. Fabricación del cemento Portland

La fabricación del cemento parte de la extracción en cantera de la materia prima que es la piedra caliza, estas piedras de gran tamaño son transportadas para ser trituradas, la caliza se muele junto con componentes minoritarios para formar un polvo muy fino más conocido como crudo o harina cruda.

El crudo se homogeniza en silos y posteriormente pasa por una torre de intercambio de calor y desciende por la misma iniciándose los procesos de deshidratación y descarbonatación (desprendimiento de CO_2) y la formación de óxido de calcio (CaO) a partir de carbonato de calcio (CaCO_3).

El material es llevado al horno rotatorio donde es transformado en Clinker, a medida que se incrementa la temperatura hasta llegar aproximadamente a los 1450°C es ahí cuando paulatinamente se dan las reacciones químicas de clinkerización que implica la transformación de los óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro en los minerales de clinker. Los minerales formados son los responsables de las propiedades hidráulicas del cemento.

A la salida del horno el clinker tiene un tamaño máximo entre 3 y 30 mm, con una temperatura alrededor de 1300°C ; el proceso de enfriamiento debe ser inmediato ya que si se enfría lentamente se presenta óxido de magnesio (MgO) en forma cristalina, el cual al hidratarse aumenta su volumen y puede ocasionar problemas de desintegración cuando se utilice en hormigón.

El clinker pasa por un proceso de enfriamiento para bajar su temperatura a 100 °C, asegurando el estado vítreo. El clinker adquiere un color generalmente negro, centellante y duro se muele con yeso del 2 al 5 %, con el objetivo de impedir el fraguado relámpago del cemento [11] y regular la velocidad de endurecimiento del mismo. Es importante agregar yeso debido a que si sólo se muele el clinker, al mezclarlo con agua fraguaría de manera inmediata y no permitiría su manipulación. El proceso de molienda se da en un molino de bolas hasta que el cemento alcance 1.1×10^{12} partículas por kg para luego ser llevado a un silo de almacenamiento.

Se han desarrollado cementos como, el cemento portland siderúrgico que se obtiene de mezclar clinker de cemento portland, yeso y un 15 a 65% escorias de alto horno. Otro tipo de cemento es el portland puzolánico con adiciones que contienen en su composición sílice en forma reactiva tales como ceniza volante, arcilla calcinada; el contenido de puzolanas varía entre el 15 y el 50% del peso total [12]

2.1.4. Composición química del cemento Portland

En el horno todos los compuestos como cal, sílice, alúmina y óxido de hierro reaccionan para formar productos más complejos

hasta alcanzar un estado de equilibrio químico. Los compuestos, no se presentan aislados sino que se habla de fases que los contienen en una gran proporción junto con algunas impurezas.

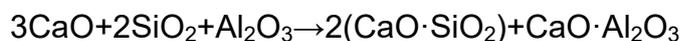
En la fabricación del clinker se presentan ciertas reacciones químicas que son divididas en tres grupos, tal como sigue:

Reacciones por debajo de 1300 °C, de los cuales las más importantes son:

- Secado. Eliminación del agua libre, temperatura menor a 200 °C.
- Eliminación del agua adsorbida, temperatura entre 100 y 400 °C.
- Descomposición de la arcilla con formación de metacaolinita, temperatura entre 400 y 750 °C.



- Descomposición de la caliza.



Ecuación 2.3

Las reacciones de clinkerización que se dan a 1300-1450 °C. La masa fundida se forma, principalmente de aluminato y ferrita; a los 1450 °C el 20 a 30% de la mezcla es líquida. Gran parte de la

belita y casi toda la cal reacciona en presencia de la masa fundida para dar alita.

Reacciones durante el enfriamiento. El líquido cristaliza, dando principalmente aluminato y ferrita. Ocurren transiciones polimórficas de la alita y belita.

El clinker típicamente tiene una composición de 67% CaO, 22% SiO₂, 5%Al₂O₃, 3% Fe₂O₃ y 3% otros componentes; normalmente contenidos en alita, belita, aluminato y ferrita. Existen otras fases minoritarias tal como álcalis-sulfato u óxido de calcio [13].

Las cuatro fases con sus componentes principales, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3: Fases y sus compuestos del cemento portland.

Fase	Compuesto	Fórmula Química	Abreviatura
Alita	Silicato tricalcico	3CaO. SiO ₂	C ₃ S
Belita	Silicato dicalcico	2CaO. SiO ₂	C ₂ S
Alumina to	Aluminato tricalcico	3CaO. Al ₂ O ₃	C ₃ A
Ferrita	Alumino ferrito tetracalcico	4CaO. Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

Fuente: Garófalo A., 2015

Los silicatos en el cemento no son puros pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Los óxidos influyen de manera importante en las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de los silicatos.

El principal constituyente en el clinker del cemento portland es la alita (C_3S), se encuentra alrededor del 50 al 70%.

El C_3S modificado en su composición y su estructura cristalina por sustituciones iónicas, reacciona relativamente rápido con agua. En el cemento portland esta fase es la más importante para el desarrollo de la resistencia a edades de 28 días.



Figura 2.1: Alita con su zona estructural.

Fuente: S.N. Ghosh, Cement and Concrete Science & Technology, 1991.

Belita constituye el 15 al 30% del clinker, Su compuesto mayoritario es el C_2S modificado por sus sustituciones iónicas

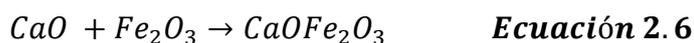
presentes como en su β polimorfo. Este reacciona lentamente con el agua, tiene una pequeña contribución a la resistencia durante los 28 primeros días pero crece en sus edades posteriores [14].

Aluminato constituye 5 al 10% del clinker, su compuesto mayoritario es el C_3A , sustancialmente modificado en composición y a veces también en estructura por sustituciones iónicas; el aluminato tricálcico reacciona inmediatamente con el agua y causa un fraguado indeseable, por ellos se debe agregar yeso como un factor de control del fraguado [15].

Ferrita conforma el 5 al 15% del clinker. Esto es la aluminoferrita tetracálcico sustancialmente modificada en composición por variación en relación Al/Fe y sustituciones iónicas [16].

La tasa con la que reacciona con el agua parece ser algo variable, talvez debido a las diferencias en composición, pero es alta inicialmente y baja en edades posteriores.

En la formación del clinker, las reacciones, por fases de temperatura, son:

De 1000 a 1100 C**De 1100 a 1200°C****De 1250 a 1480°C**

La composición final será:

51% $CaOSiO_2$, 26% $CaOSiO_2$, 11% $CaOAl_2O_3$, 12% $CaOAl_2O_3FeO_3$

Entre los componentes no volátiles se encuentra la sílice libre (SiO_2) en diferentes formas), el cual provoca una alta temperatura de salida del gas del horno. El óxido de magnesio (MgO) aumenta la movilidad iónica favoreciendo la disolución de C_2S y CaO ; mientras aumenta la temperatura y permite que se forme C_3S de forma más rápida [17].

El óxido de titanio (TiO_2) influye en la reducción del contenido de C_3S con igual ganancia en el contenido de C_2S y variaciones apreciables en otras fases. También reduce el tamaño de grano de alita y belita, además le da la coloración oscura al Clinker.

Los óxidos de sodio (Na_2O) y potasio (K_2O) llamados también álcalis se presentan en pequeños porcentajes reduciendo la solubilidad de CaO en la masa fundida y descompone alita. Su contenido en cemento es restringido a un 0.6% por peso en forma combinada debido a que estos reaccionan en forma expansiva con algunos agregados de origen volcánico, provocando la desintegración del hormigón [18].

Los compuestos de azufre S^{2-} , SO_3^{2-} con un mayor contenido de azufre actúan como un mineralizador modificando la recirculación de los álcalis provocando la formación de menos volátiles (N, K). Cuando $\text{SO}_3 > 2,5-4\%$ provoca la expansión de los sulfatos.

La formación del pentaóxido de fósforo (P_2O_5) provoca la aceleración de la reacción de clinkerización, reduciendo la intensidad de reciclado interno y también incide en la reducción de la resistencia inicial [19].

2.1.5. Hidratación del cemento

El cemento se forma en un agente de enlace mediante la reacción con el agua, donde los silicatos y aluminatos se convierten en productos hidratados. Los principales hidratos son los silicatos de calcio y aluminato tricálcico.

El mecanismo que se presenta en la hidratación empieza con los compuestos más solubles que pasan a una fase acuosa iónica y luego se precipitan para formar los compuestos hidratados cristalinos. En otras palabras es una conversión química del agua libre o líquida en agua enlazada estructuralmente, convirtiéndose en un hidrato.

La hidratación de silicatos de calcio tienen casi el mismo proceso de hidratación, solo se diferencian por la cantidad de Ca(OH)_2 (también llamada portlandita), que se forma y por la cantidad de calor de hidratación liberado durante la siguiente reacción:



Ecuación 2.9

El producto principal de la hidratación es silicato de calcio hidratado ($3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) en forma de gel silicato de calcio hidratado (C-S-H) y portlandita (Ca(OH)_2). El C-S-H es

responsable del desarrollo de la resistencia, mientras El Hidróxido de calcio o portlandita es responsable de mantener un alto pH y por lo tanto proteger el refuerzo de acero en una estructura.

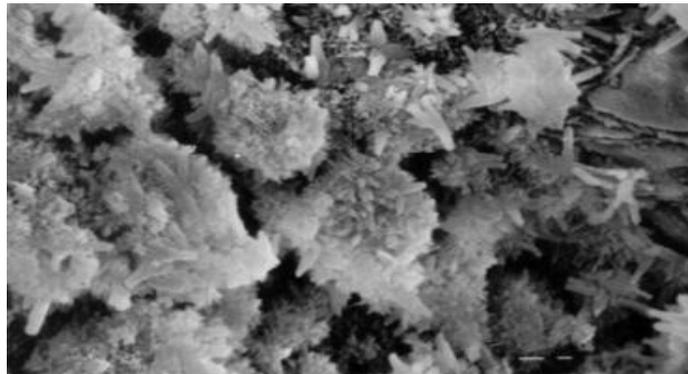


Figura 2.2: Silicato de calcio hidratado.

Fuente: S.N Ghosh, Cement and Concrete science and technology, 1991.

El C_3A reacciona con el yeso para formar un sulfoaluminato insoluble de calcio conocido como etringuita.



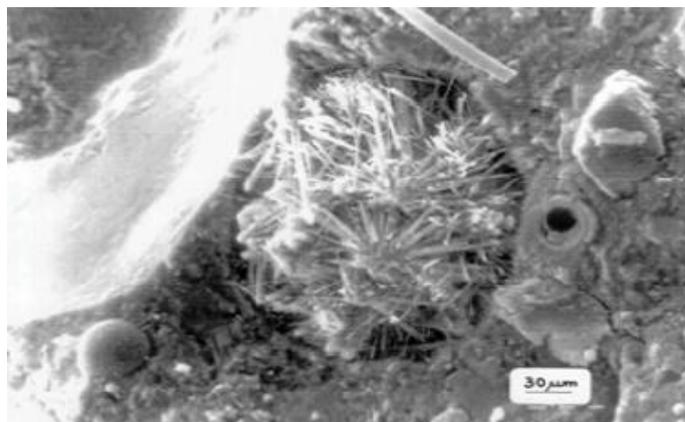


Figura 2.3: Portlandita.

Fuente: S.N Ghosh, Cement and Concret science and technology, 1991.

La reacción del C₄AF es similar al C₃A pero es mucho más lenta y actúa como fundente. El yeso no solo reacciona con el C₄AF forma sulfoferrita cálcica al igual que sulfoaluminato cálcico y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos [20].

2.1.6. Clasificación de los tipos de cementos en Ecuador

Como se ha mencionada anteriormente, durante el proceso de molienda, pueden agregarse ciertas adiciones como: puzolanas, cenizas volantes, escorias siderúrgicas, la incorporación de estas adiciones dan lugar a los diferentes tipos de cemento.

En Ecuador, existen normas técnicas referentes a cemento, según la norma NTE INEN 490 del Instituto Ecuatoriano de

Normalización, clasifica los cementos hidráulicos compuestos, según los siguientes usos [21]

- Tipo IS. Cemento Portland de escoria de altos hornos.
- Tipo IP. Cemento portland puzolánico.
- Tipo IT. Cemento compuesto ternario.

Según la norma NTE INEN 2380 está basada en atributos del cemento hidráulico relacionado con el desempeño del hormigón y están clasificados como: [22].

- Tipo GU. Para construcciones en general
- Tipo HE. Alta resistencia Inicial.
- Tipo HS. Alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH. Moderado calor de hidratación.
- Tipo LH. Bajo calor de hidratación.

2.2. Propiedades físicas del cemento

En la Universidad Militar de Nueva Granada de Colombia se han realizado estudios relacionados con el análisis de las propiedades físicas de ciertos cementos locales, sin analizar la composición química de cada uno de los cementos estudiados [23]. Las pruebas realizadas en este proyecto se realizaron en base a distintas normas, especificadas en el capítulo 3.

2.2.1. Finura

La rapidez de hidratación del cemento depende de la finura de las partículas, para un desarrollo de la resistencia se necesita un grado de finura elevado, una rapidez de hidratación temprana más alta significa una rapidez más alta de evolución temprana de calor, los cuales son perjudiciales para la durabilidad debido a la fisuración que se pueden presentar.

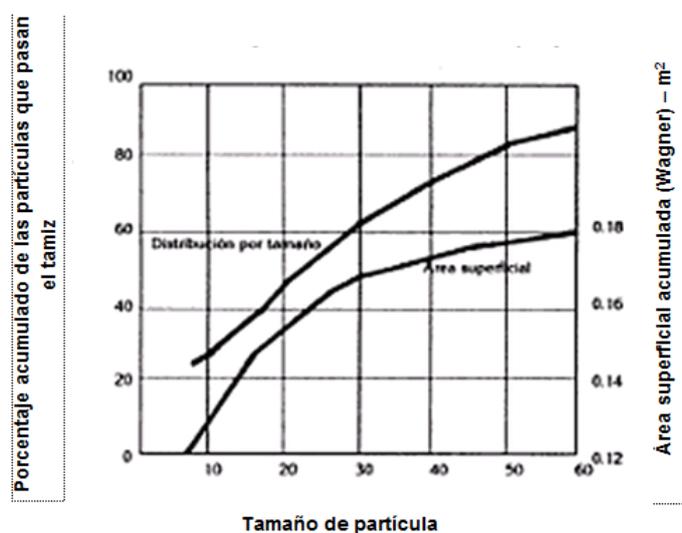


Figura 2.4: Distribución típica del cemento de las partículas de cemento.

Fuente: Tecnología del concreto y Mortero. Sanchez, D., 2001.

En cementos más finos existe más C_3A libre para una hidratación temprana por lo que un aumento en la finura del cemento requiere más cantidad de yeso.

Otro punto importante es que los cementos más finos experimentan una reacción más fuerte con agregados reactivos.

Los efectos que se presentan por una mayor finura sobre la resistencias se manifiestan los primeros siete días. El procedimiento más utilizado es el método de Blaine para determinar la superficie específica del cemento.

2.2.2. Tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado describe el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento. El endurecimiento se refiere al incremento de resistencia de una pasta de cemento ya fraguada.

Para describir las etapas del fraguado se utiliza el término de fraguado inicial y fraguado final. Cuando la pasta de cemento pierde su viscosidad y aumenta la temperatura, el tiempo transcurrido desde la adición del agua se denomina fraguado inicial e indica que el cemento está parcialmente hidratado. Cuando la pasta deja de deformarse con cargas pequeñas y se vuelve rígida; el tiempo transcurrido desde la mezcla con el agua hasta ese punto se denomina fraguado final [24].

El fraguado se da por la hidratación del C_3A y el C_3S pero con el efecto del yeso se retrasa la formación del hidrato del aluminato de calcio. La existencia de poca cantidad de SO_3 produce cristales de sulfato de calcio hidratado que causa el fraguado relámpago.

2.2.3. Calor de Hidratación

El calor de hidratación, se compone de los calores químicos de las reacciones de hidratación y del calor de adsorción del agua sobre la superficie del gel que se ha formado por el proceso de hidratación.

Tabla 4: Calores de hidratación de los compuestos puros

Compuestos	Calor de hidratación	
	cal/g.	J/g.
C_3S	120	502
C_2S	62	260
C_3A	207	867
$C_4 AF$	100	419

Fuente: Tecnología del Concreto, Neville. A, 1999.

El calor de hidratación del cemento, se expresa en cal/g. El calor total es aproximado a la suma de los calores parciales de los componentes del Clinker.

Durante las primeras etapas de hidratación los diferentes compuestos se hidratan a distintas velocidades. Como se muestra en la **Tabla 4**, los compuestos con el mayor calor de hidratación son C_3A y C_3S , en base a ello se puede deducir que disminuyendo sus proporciones se puede reducir la velocidad de liberación de calor en la edad temprana del hormigón [25]. Para algunas aplicaciones en hormigón se han desarrollado diversos tipos de cemento con el objetivo de controlar su calor de hidratación.

2.2.4. Resistencia a la compresión

Esta propiedad es la más importante del cemento ya que influye de manera importante en la elaboración de morteros y es una característica establecida como requisitos para usos estructurales.

La resistencia de la pasta de cemento en el hormigón depende mucho de la calidad y de la composición química del mismo. La resistencia en cualquier edad es función tanto de la relación a/c como del grado de hidratación del cemento.

Es preciso aclarar que los resultados de resistencias a la compresión evaluadas en cubos de mortero no se pueden utilizar para predecir la resistencia en hormigón, ya que existen

más variables de control como características de los agregados, mezclado del hormigón, procedimientos de construcción, condiciones ambientales en obra, etc.

2.3. Hormigón

2.3.1. Definición de hormigón

El hormigón es un material utilizado en construcción, está conformado por un aglomerante que generalmente es cemento al cual se añade agua, agregado (arena y grava o piedra triturada).

La durabilidad del hormigón depende de algunos factores incluyendo la calidad y naturaleza del cemento y del agregado, la mano de obra, el diseño del concreto y el curado.

2.3.2. Componentes del hormigón

Generalmente el cemento constituye el 25% de la composición del hormigón mientras que al agregado se le atribuye el 65%, esto puede variar según el uso y destino del hormigón.

2.3.2.1. Agua

El agua de mezclado se define como cantidad de agua por volumen unitario de hormigón que requiere el cemento contenido en ese volumen unitario, para

producir una pasta eficientemente hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados cuando la mezcla se encuentra en estado plástico.

El agua de mezclado no debe contener cantidades indeseables de sustancias inorgánicas ni orgánicas en proporciones excesivas. Aunque el agua de mezclado generalmente es el agua potable, se debe tener cuidado ya que en ciertas áreas áridas, el agua potable puede contener cantidades de carbonatos y bicarbonatos indeseables que pueden afectar al fraguado del cemento.

La presencia de cloruros en el hormigón que contiene acero ahogado puede conducir a su corrosión. Algunas pruebas sugieren que el agua del mar acelera ligeramente el tiempo de fraguado del cemento [26].

Las aguas naturales que son ligeramente ácidas son inofensivas, pero se debe tomar en cuenta que el agua con ácidos de humus u otros ácidos orgánicos pueden afectar adversamente al endurecimiento del hormigón [27].

El agua de hidratación es la parte del agua que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar la parte sólida del gel.

El agua libre es aquella que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de superficie, de manera que puede evaporarse con facilidad.

El agua de curado se define como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate y el hormigón alcance sus propiedades potenciales.

2.3.2.2. Agregados

Los agregados ocupan la mayor parte en volumen del hormigón, por lo que su calidad es un factor de importancia ya que no sólo afecta a su fortaleza sino también a la durabilidad y su resistencia a ataques químicos.

Los agregados como, arena, grava, piedra triturada de peso normal, para producir hormigón fresco tienen una densidad de $2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

a $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ La distribución de las partículas según su tamaño se llama granulometría.

Para la elaboración de hormigón generalmente se utiliza agregado fino como arena no mayor de 5 mm [28].

Las propiedades químicas, composición mineral, la densidad, dureza, resistencia, estabilidad física y química de los agregados dependen de las rocas originarias.

La adherencia entre el cemento y el agregado es un factor importante para la resistencia del concreto y se debe a la aspereza de la superficie del agregado.

La durabilidad de las estructuras de hormigón se ve afectada por ataques químicos como físicos. La reacción álcali-sílice (RAS) produce un gel que debido a la absorción de agua genera expansiones en el interior del hormigón que posteriormente provocan fisuras aportando con el deterioro de la estructura.

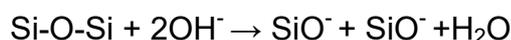
Los iones alcalinos (K^+ y Na^+) presentes en el cemento y los iones hidroxilos en la disolución presente en los poros del hormigón reaccionan con el agregado que contiene iones reactivos ácidos como el sílice, produciendo silicato

de calcio hidratado (C-S-H), silicato de calcio-sodio hidratado (C-N-S-H), silicato de calcio-potasio hidratado (C-K-S-H).

El mecanismo de reacción del gel es el siguiente:

Se forma la disolución alcalina de C-S-H y CH, debido a la hidratación del cemento, la disolución presente en los poros está formada por NaOH y KOH que son hidróxidos alcalinos [29].

El SiO₂ cristalino se disuelve en el medio alcalino del hormigón, en dos etapas. La primera es la rotura de un enlace siloxano³ por ataque del ion OH⁻.

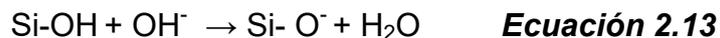


Ecuación 2.12

La segunda etapa es la disolución de la sílice para formar ion silicato y pequeños polímeros. Los cationes Na⁺, K⁺, Ca⁺ son atraídos por la carga negativa del Si-O⁻.

Además se produce una reacción de neutralización entre los grupos silanol⁴ y los iones OH⁻ [30].

³ Siloxano es cualquier compuesto químico compuesto de unidades de la forma R₂SiO, donde R es un átomo de hidrógeno o un grupo de hidrocarburo.



Los cationes se precipitan los iones silicato promoviendo la formación del gel silicato cálcico-alcálico hidratado.



Ecuación 2.14

2.3.3. Estados del hormigón

El hormigón tiene tres estados que son: plástico, fraguado y endurecido

El Hormigón en *estado fresco o plástico* al principio es blando, puede ser moldeado en diferentes formas y de esa forma se mantiene hasta su colocación y compactación. Las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco son: trabajabilidad y cohesividad.

El estado fraguado es cuando el hormigón empieza a ponerse rígido, el fraguado se desarrolla después de la compactación y durante el acabado.

⁴ Un grupo silanol es un grupo funcional en la química de silicio con la conectividad de Si-O-H

Después que el hormigón ha fraguado se *endurecerse* y empieza a ganar resistencia. Las propiedades de la etapa de endurecimiento son la resistencia y durabilidad.

2.3.4. Propiedades del hormigón

La calidad del hormigón posee propiedades principales que son:

- *Consistencia*- Habilidad de fluir
- *Estabilidad*- Resistencia a la segregación.
- *Uniformidad*- Mezcla homogénea
- *Trabajabilidad*- Facilidad de colocación, compactación y acabado.

Para el endurecimiento del concreto incluye

- *Fuerza*- Resistencia a la ruptura inducida por fuerzas externas (compresión, flexión, tensión, torsión).
- *Durabilidad*- Resistencia a la inclemencia ambiental, los ataques químicos, abrasión y otras condiciones.

La trabajabilidad se refiere a la facilidad de colocación, la consolidación, y acabado de hormigón recién mezclado y el grado en que se resiste a la segregación [31]. Propiedades concretas relacionadas con la trabajabilidad incluyen la consistencia (flujo) y estabilidad (resistencia a la segregación).

2.3.5. Resistencia a la compresión del hormigón

La resistencia del hormigón a cualquier edad está en función de la relación a/c y el grado de hidratación de la pasta de cemento. Para una relación a/c establecida, la resistencia del hormigón se verá afectada por las características del agregado, calidad del cemento, uso de aditivos, contenido de aire y la duración del curado.

Una mayor relación a/c dará como resultado una resistencia menor, es decir a una cantidad mayor de agua se obtendrá una resistencia baja.

2.3.6. Diseño de hormigón

El diseño de mezcla es el proceso por el que el hormigón de diseño de mezcla que parámetros como el contenido de aire, trabajabilidad, y la fuerza requerida se establecen. Estos parámetros son impulsados por factores tales como el método de construcción y los requisitos estructurales. Una vez establecidos los parámetros del diseño de mezcla, los materiales característicos y tecnología de producción se identifican y determinan. Entonces, las proporciones de la mezcla de concreto se pueden desarrollar utilizando relaciones establecidas, ya sea a través de la investigación o de la experiencia pasada.

Para diseñar se toma referencia a la norma ASTM, AASHTO, ACI, o una variedad de normas y especificaciones de la agencia pública.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA

3. PROCEDIMIENTO

3.1. Ubicación

La fase experimental del presente estudio se realizó en las instalaciones del Centro Técnico del Hormigón (CTH), de la planta San Eduardo.

3.2. Análisis químico

En esta etapa se aplicará la técnica de fluorescencia de rayos X, que consiste en cargar la muestra en la cámara de medida del espectrómetro y excitarla a través de un haz de rayos x primario proveniente del tubo de rayos X. La muestra emite un haz de rayos X secundarios policromático, las longitudes de onda de los fotones del haz dependen de los elementos que lo componen. El haz de rayos secundarios es enviado hacia los sistemas dispersivos llamados monocromadores y goniómetro.

Estos sistemas producen un espectro de líneas, característico de cada elemento contenido en la muestra, que luego es cuantificado en porcentaje de concentración.

Los óxidos que se analizan son aquellos que se encuentran descritos en la norma ASTM C114 "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement" o en la norma ecuatoriana NTE INEN

160 “Cemento Hidráulico. Métodos de ensayo para el Análisis Químico”

Reactivos y muestras

Muestra de cada tipo de cemento

Equipos de laboratorio

Espectrómetro de rayos X ARL 9800.

Procedimiento

- Preparación de la tableta con cada tipo de cemento.
- Colocar la tableta de la muestra a analizar en un porta muestras.
El polvo adherido en la parte posterior de la tableta debe ser eliminado con una brocha, antes de colocarla en el porta muestra.
- Ubicar la muestra en uno de las ubicaciones de la bandeja porta muestra del equipo.
- Programar la muestra.
- Ver resultados

3.3. Análisis físicos

Condiciones Experimentales Generales

La temperatura a la que se debe llevar a cabo el ensayo debe ser igual a la del cuarto de curado donde la temperatura es de $23.0^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. y la humedad relativa no debe ser inferior de 50%. El agua de mezcla a $23.0^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

3.3.1. Módulo de finura

Para la determinación del módulo de finura se aplicó el procedimiento detallado en la norma ASTM C204 “Standard test methods for fineness of hydraulic cement by air-permeability” o en la norma ecuatoriana NTE INEN 196 “Cemento hidráulico- Determinación de la finura mediante el aparato de permeabilidad al aire”.

3.3.2. Fraguado

El tiempo de fraguado tanto inicial como final se determinan en base a la norma ASTM C “Standard test methods for time of setting of hydraulic cement by Vicat needle” o en la norma ecuatoriana NTE INEN 158 “Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat”.

3.3.3. Resistencia a la compresión en cubos de mortero

Este ensayo se realizó en base al procedimiento detallado en la norma ASTM C109/C109M “Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens” o la norma ecuatoriana, NTE INEN 488 “Cemento hidráulico. Determinación de resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista”.

3.3.4. Trabajabilidad- Holcim Cone

Esta herramienta ayuda a controlar y evaluar las características intrínsecas de los materiales cementicios y la evaluación de mezcla con el mejor desempeño del hormigón.

Los diseños de mezcla de mortero con Holcim Cone no considera los agregados grandes que 4 / 4.75 mm. La arena usada para la preparación del mortero debe ser caracterizada en términos de tamaño de la partícula, densidad y absorción.

Para el ensayo de Holcim Cone se utiliza el mismo diseño que para Holcim Heat, los detalles de diseño se encuentran en el

Anexo 2.

Reactivos y muestras

- Agua de mezcla, agua grado tipo IV.

Arena natural de río- La arena debe pasar por un proceso de secado en horno por un período de 24 horas a una temperatura de 105 °C, posteriormente debe ser tamizada (Usar tamiz No4), con un tamaño de 4mm en condiciones secas. Después se agrega agua para obtiene una humedad del 2.3%

- Muestra de cemento, cantidad según diseño establecido

Materiales de laboratorio

- Calibrador digital
- Termómetro
- Espátula de goma
- Cucharón
- Vaso de precipitación de 1000 ml.
- Pisón
- Cronómetro

Equipos de laboratorio

- Mezcladora Hobart, olla de mezclado y paleta
- Holcim Cone; consta de un plato de vidrio graduado, un cono un tamper o apisonador.
- Balanza analítica.

Procedimiento

Para la preparación del mortero se siguió el siguiente procedimiento:

- Colocar la cantidad de agua (según el diseño establecido), el tiempo del ensayo empieza a correr desde que se agrega el cemento al agua que se encuentra en la mezcladora.
- Después de haber transcurrido 2 min. del ensayo se debe apagar la mezcladora por 1 min. usar la espátula de goma para recoger y limpiar la pasta de las paredes de la mezcladora.
- Encender nuevamente el equipo para el mezclado de la pasta, en el min. 4 agregar la arena por un tiempo de 1 min.
- En el min. 6 apagar la mezcladora para remover el material pegado y dejar mezclar hasta el min. 9.
- Tomar la temperatura de la mezcla y registrar.
- Una vez terminado el procedimiento ya antes descrito se procede a registrar el flujo con el Holcim Cone. El procedimiento a seguir es el siguiente:
- Colocar de forma centrada el Cono en la marca del plato graduado.
- Llenar el cucharón con la mezcla y colocarlo dentro del cono, sin dejar que este se mueva de la marca del plato graduado.

- Llenar el cono en dos partes, en cada llenado apisonar con el tamper 10 veces en forma espiral hacia adentro
- Enrazar superficie de la mezcla.
- Alzar el cono en tres segundos, medir dos veces el diámetro que forma la mezcla en el plato graduado con el calibrador digital y tomar un valor promedio y registrar.
- Devolver parte de la mezcla usada al recipiente, taparlo, repetir el procedimiento a los 45 min. después de la hora inicial de mezclado, es decir desde q se agregó el cemento al agua de mezcla.
- Tomar la temperatura de la mezcla a los 45 min. y registrar.



Figura 3.1: HolcimCone y materiales, Laboratorio de Ensayos Especiales, Centro Técnico del Hormigón (CTH), Holcim-Planta San Eduardo.

Fuente: Folleto Holcim Cone, 2015.

3.3.5. Temperatura de hidratación Holcim Heat

El análisis de este ensayo permite analizar el desarrollo de temperatura en la primera etapa de hidratación de la pasta de cemento.

Reactivos y muestras

- Agua de mezcla, agua grado tipo IV.
- Arena natural de río- La arena debe pasar por un proceso de secado en horno por un período de 24 horas a una temperatura de 105 °C, posteriormente debe ser tamizada (Usar tamiz No4), con un tamaño de 4mm en condiciones secas. Después se agrega agua para obtiene una humedad del 2.3%
- Muestra de cemento, cantidad según diseño establecido

Materiales de laboratorio

- Termómetro
- Cucharón
- Vaso de precipitación de 1000 ml.
- Moldes de mortero y cubiertas ASTM 3x6 in., para recolectar muestras.
- Pisón
- Cronometro

Equipos de laboratorio

- Mezcladora Hobart, olla de mezclado y paleta
- Holcim Heat,- Equipo para el monitoreo semiadiabático del calor de hidratación; consta de una caja con un USB TC-08 logger (grabación de la temperatura medida por sensores), 6 canales para muestras.
- Balanza analítica marca.

Procedimiento

En esta etapa se sigue el procedimiento descrito para el mortero utilizado en el ensayo de Holcim Cone.

- Luego de ser preparado el mortero, se procede a preparar la muestra de referencia, colocando en un molde de mortero 1000g. de arena y 300 g. de agua; tapar la muestra y colocarla en la celda referencia del Holcim Heat
- Registrar la referencia en el software ThermoCal y activar la lectura de la celda activa.
- Colocar en un molde de mortero 1400 g. de la muestra, taparla y colocarla en el Holcim Heat, Ingresar los datos en el software y dar inicio a la lectura de temperatura.
- Para cada tipo de cemento repetir los pasos de moldeo de muestras.

- Las mediciones se detendrán automáticamente Después de 48 h después de haber sido ingresadas al equipo.
- Se genera un informe con las curvas de temperatura Vs. Tiempo de cada muestra de cemento para analizar su comportamiento en el desprendimiento de calor.
- Con el resto de la mezcla se procede a realizar cubos de mortero para realizar un seguimiento de la resistencia a la compresión que tendrán las muestras a edades de 1, 3, 7 y 28 días.

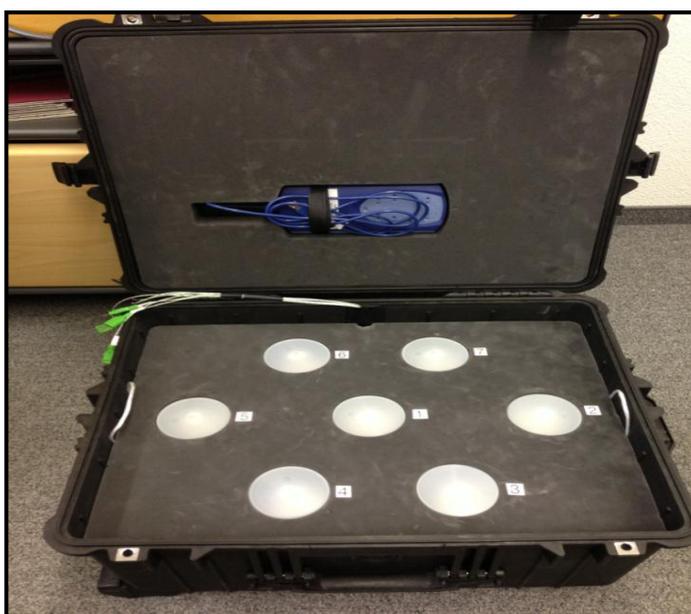


Figura 3.2: HolcimHeat Laboratorio de Ensayos Especiales, Centro Técnico del Hormigón (CTH), Holcim-Planta San Eduardo.

Fuente: Folleto Holcim Heat, 2015.

3.3.6. Reacción Álcali-Sílice

Este ensayo se base en el procedimiento detallado en la norma ASTM C1567 “Standard test method for determining the potential álcali-silica reactivity of combinations of cementitious material san aggregate (Accelerate mortar-bar method”.

El agregado utilizado en este ensayo es arena de la cantera de Pifo-San Rafael, Quito-Ecuador. Este agregado es el más reactivo al que se tuvo acceso, los datos de densidad y absorción se encuentran en el **Anexo 3**.

3.4. Análisis en Hormigón

En esta fase se analizará la resistencia del hormigón a diferentes edades; el diseño que se elaboró fue el mismo

3.4.1. Revenimiento de Hormigón

Para la determinación del revenimiento de hormigón de cemento hidráulico, se aplicó el procedimiento detallado en la norma ASTM C143 “Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete” o en la norma ecuatoriana NTE INEN 1578 “Hormigón de cemento hidráulico- Determinación de del asentamiento”.

3.4.2. Medición de temperatura en hormigón fresco

Para la medición de temperatura en hormigón fresco se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM C1064/ C1064 “Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete”.

3.4.3. Determinación del contenido de aire en el hormigón fresco

Este ensayo se realizó en base al procedimiento detallado en la norma ASTM C231/ C231M “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure”.

3.4.4. Elaboración y curado en obra de especímenes de hormigón

Para el desarrollo de este ensayo en hormigón se utilizó el procedimiento descrito en la norma NTE INEN 1 1576 “Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo

3.4.5. Resistencia a la compresión en cilindros

Para el desarrollo de este ensayo en hormigón se utilizó el procedimiento descrito en la norma ASTM C39/C39M “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.o la norma ecuatoriana NTE INEN 1573 “Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico”.

CAPÍTULO 4.
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1. Análisis químico en cemento

En esta sección se detallan los resultados obtenidos del análisis de la composición química de los cementos, por la técnica de fluorescencia de rayos X, los cuales se muestran en porcentajes (%), en el **Anexo 1**.

El análisis por fluorescencia de rayos X provee datos de composición final del cemento, incluyendo sus adiciones. Además se ha estimado el contenido de clinker del cemento, el restante corresponde a la cantidad de yeso y adiciones.

Según la Tabla del Anexo 1, el contenido más alto de sílice correspondiente a la sílice o SiO_2 corresponden al cemento A y B con 37.9% y 32.7% respectivamente; estos datos nos permiten conocer que estos cementos tendrán un desarrollo de resistencias optimas a edades mayores a los 28 días.

El CaO es aquel que en condiciones normales de endurecimiento, puede formar silicatos de calcio hidratados aluminatos de calcio hidratados por lo que es importante el contenido de óxido de calcio en el cemento.

En la tabla siguiente se muestra el porcentaje estimado de clinker en cada cemento.

Tabla 5: Contenido de clinker en cementos
Contenido de clinker en cementos

Cemento	Contenido de clinker (%)	Contenido de adiciones (%)
A	53.8	46.2
B	56.5	43.5
C	73.2	26.8
D	65.46	34.54
E	74.8	25.2
F	67.8	32.2
G	61.61	38.39
H	85.6	14.4

Fuente: Garófalo A.

El cemento con el mayor contenido de clinker es el cemento H con un 85.6%, que a su vez cuenta con menor contenido de adiciones, en comparación con los otros cementos. El menor porcentaje de contenido de clinker corresponde al cemento A, con un 53.8%.

El contenido de adiciones nos da un indicio del desarrollo de las temperaturas de hidratación en el cemento; mientras más adiciones posea, el calor de hidratación disminuye.

En el caso de los cementos A y B con 53.8% y 56.50 % de clinker respectivamente, se espera que tengan un desarrollo de temperatura

menor que los demás cementos. Existe una relación entre el contenido de adiciones y la finura del cemento, generalmente los cementos con alto contenido de adiciones tiene más finura debido a que las adiciones tienen menor superficie específica que el clinker.

Como se había mencionado el contenido de clinker incide en la generación de temperaturas y calor de hidratación del cemento; a más de afectar al desempeño de sus resistencias a la compresión a diferentes edades.

4.2. Análisis físicos en cemento

Los resultados de los análisis físicos detallados en esta sección corresponden a los ensayos de módulo de finura, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión de cubos de mortero, calor de hidratación, trabajabilidad y reacción álcali-sílice.

Los colores claros de algunos cementos puede ser producto de las adiciones que tiene, ya que los cementos portland puros tienen una coloración más acentuada debido la coloración propia del Clinker.

En la **Figura 4.1.** se puede observar la variación de la apariencia de los diferentes cementos analizados-

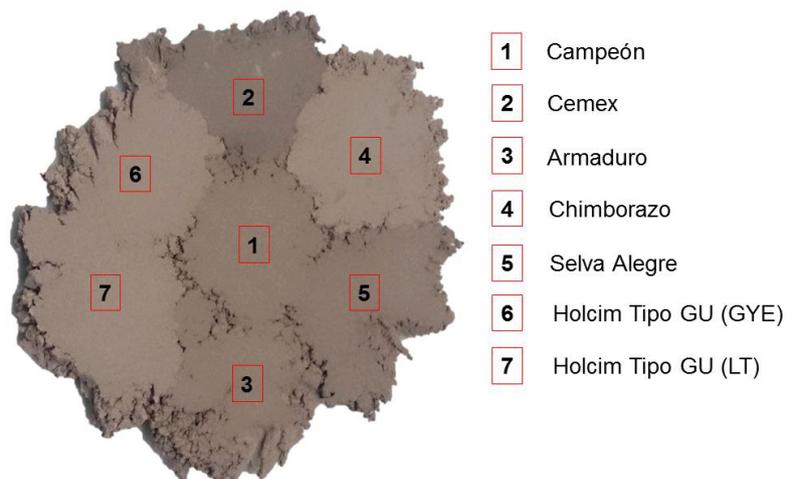


Figura 4.1: Aspecto visual de los cementos analizados.

Fuente: Garófalo A.

4.2.1. Módulo de finura

Para la determinación la finura de los diferentes cementos se utilizó el aparato de Blaine de permeabilidad al aire.

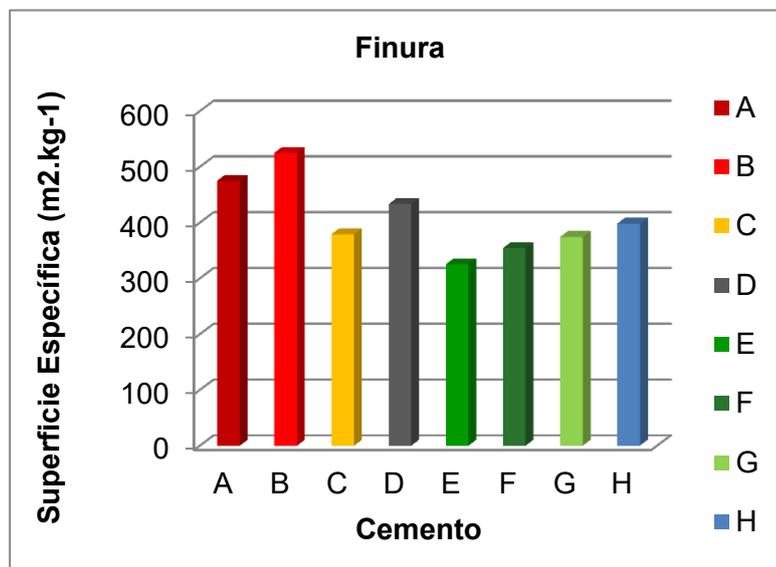


Figura 4.2: Superficie específica de los distintos cementos. m².Kg⁻¹.

Fuente: Garófalo A.

Los cementos C, E, F, G, H tienen una finura similar, mientras que los cementos A, B y D difieren con finuras más alta correspondientes a 475 , 525 y $433 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; las partículas finas en el cemento, se deben a la inclusión de adiciones, con un tamaño menor a las partículas de Clinker y yeso molidos.

4.2.2. Fraguado

Los resultados obtenidos de los tiempos de fraguado de los cementos se observan en la **Figura 4.3**.

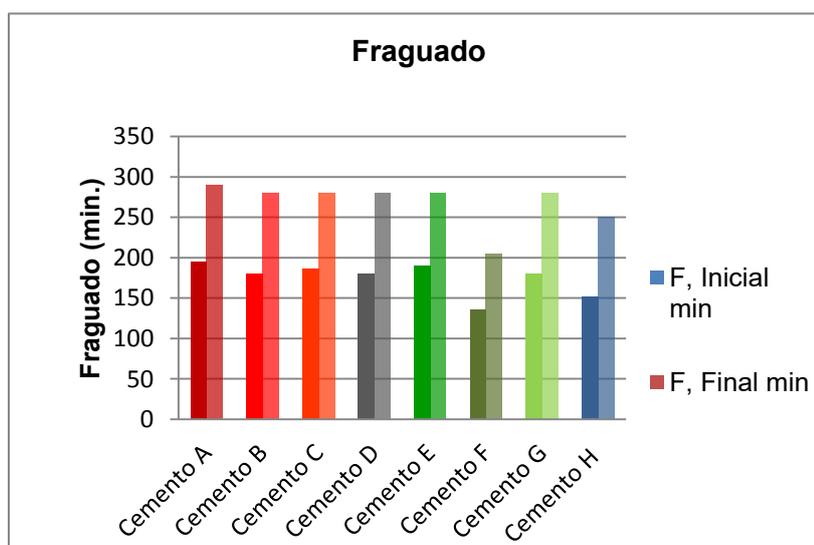


Figura 4.3: Fraguado inicial y final de los distintos cementos.

Fuente: Garófalo A.

Todos los tiempos de fraguado se encuentran dentro de los rangos establecidos en las norma NTE INEN 490 y NTE INEN

2380, en donde se detalla que el fraguado no debe ser menor a 45 mín. y no ser mayor a 420 min. El cemento F presentó los valores más bajos para fraguado inicial y final, con 135 min. y 205 min.. respectivamente; esto nos indica que este cemento presenta un menor tiempo de manejo que los demás cementos.

Este tipo de cemento es ideal para aquellas obras donde se requiere resistencia en menor tiempo y desenfrado temprano. Los cementos C, D, E y G tienen un tiempo de fraguado final muy parecido, en cuanto al cemento A se tardó más que los demás tipos de cemento, esto indica que este cemento adquiere resistencias en un mayor tiempo que lo demás.

Analizando los resultados podemos deducir que el clinker de los cementos F y H tienen mayor contenido de C_3S ya que es esta fase la que tiene mayor velocidad de hidratación.

4.2.3. Resistencia a la compresión en cubos de mortero

Para la evaluación de la consistencia del cemento se elaboraron cubos de mortero con cada tipo de cemento y arena estandarizada, los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6: Resistencia a la compresión en cubos de mortero de los cementos.

Edad	Resistencia (MPa)							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Día 1	7.6	8.8	7.4	10.8	7.8	8.6	6.8	15.0
Día 3	15.6	17.4	16.3	21.0	16.1	15.3	15.0	28.6
Día 7	20.8	24.1	23.2	26.5	23.3	20.6	21.1	32.7
Día 28	33.0	33.3	38.8	34.6	38.5	28.2	28.8	40.0

Fuente: Garófalo A

En la Figura 4.4. se puede observar que todos los cementos cumplen tanto con la norma NTE INEN 490 y NTE INEN 2380, para la edades de 3 y 7 días los valores se mantienen en 13 y 20 MPa, la variante es a los 28 días de edad donde la resistencia mínima para la norma NTE INEN 490 es de 25 MPa. Y para la norma NTE INEN 2380 es 28 MPa.

Se puede apreciar que las resistencias más altas en cubos de mortero son del cemento H. Las resistencias del resto de cementos son muy parecidas en las edad de 1, 3 y 7 días; pero al día 28 las resistencias difieren un poco. El cemento E a pesar que las resistencias a los primeros días se mantuvo muy parecida al resto de cementos, sin embargo su resistencia a los 28 días es alta, alcanzando a la resistencia del cemento H

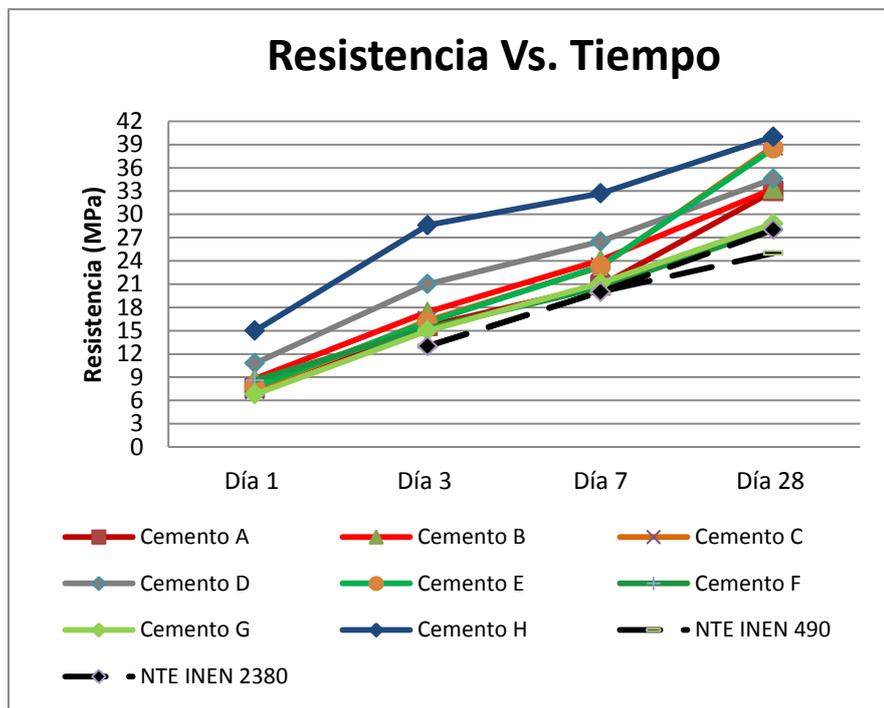


Figura 4.4: Resistencia a la compresión en cubos de mortero de los distintos cementos a 1, 3, 7 y 28 días de edad.

Fuente: Garófalo A

Como se puede apreciar en el cuadro comparativo de resistencias a los 28 días tiene un giro importante. El cemento D que se mantuvo con resistencias altas a edades tempranas, disminuye a la edad de 28 días, mientras los cementos C, E y H con resistencias de 38.8, 38.5 y 40 MPa. Respectivamente, desarrollan resistencias más altas.

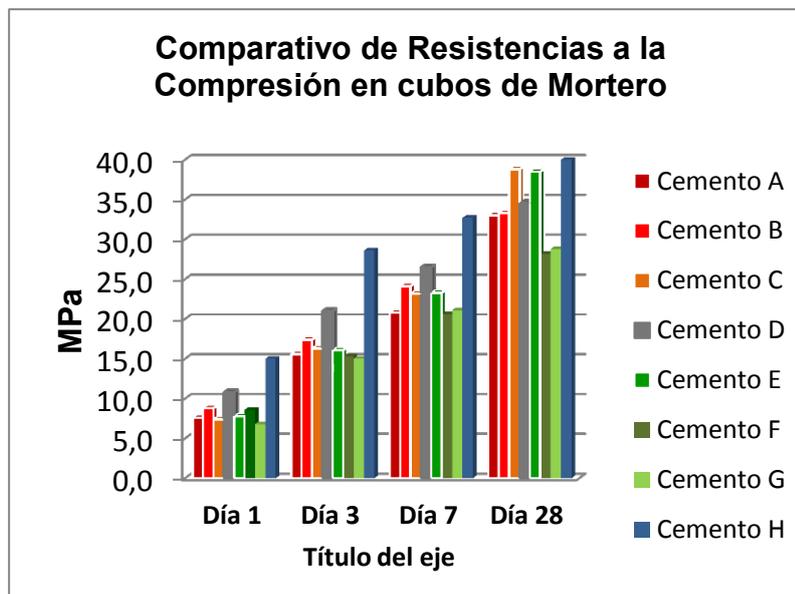


Figura 4.5: Resistencia a la compresión en cubos de mortero de los distintos cementos a 1, 3,7 y 28 días de edad.

Fuente: Garófalo A.

El desarrollo de las resistencias de los cementos A y B tienen valores muy parecidos entre ellos y su desempeño es mejor que los cementos E, F y G

Las resistencias se relacionan directamente con el contenido de clinker que posee el cemento. Mientras más alto es el contenido de clinker sus resistencias también serán altas.

Dentro de la composición del Clinker se encuentran las fases C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF ; la teoría nos dice que el desarrollo de las resistencias los primeros 28 días está dominado por la

hidratación del C_3S soportado por el C_3A , mientras que las fases de C_2S y C_4AF , contribuyen al desarrollo de resistencias finales.

Podemos decir que las resistencias altas en los primeros 28 días de los cementos C, E y H tienen más contenido de C_3S .

4.2.4. Trabajabilidad Holcim Cone

El Holcim Cone nos ayudó a evaluar las mezclas con el mejor desempeño del hormigón. Así mismo se utilizó un mismo diseño, con el cemento como única variable. Una de las propiedades más importantes del hormigón es la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 7: Flujo a 10 y 45 minutos de los cementos.

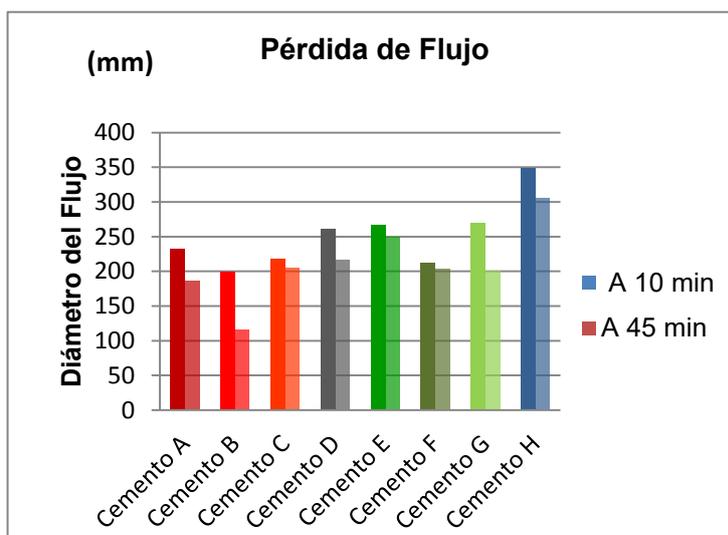
Cemento	Flujo (mm)	
	A 10 min.	A 45 min.
A	233	186
B	199	116
C	217	205
D	261	216
E	266	250
F	212	203
G	270	201
H	348	306

Fuente: Garófalo A.

En la **Tabla 7.** se muestran los resultados de flujo a los 10 y 45 minutos que se obtuvieron en el ensayo. Se tomó el flujo a los 10 min. inmediatamente después de elaborada la mezcla y se

realizó la segunda lectura a los 45 min. Para observar la pérdida de flujo que experimenta la mezcla; simulando un tiempo determinado de transporte del hormigón hasta la obra.

Figura 4.6: Pérdida de flujo de los cementos.



Fuente: Garófalo A.

Es importante mencionar que al evaluar la pérdida de flujo de los morteros en laboratorio, nos ayuda a tener una idea de la forma en que se va a compactar el hormigón en obra. Para la colocación del hormigón, si un hormigón es fluido se lo puede considerar como autonivelante o autocompactante, si el hormigón no es tan fluido se lo debe compactar con vibradores y en el caso que no sea fluido, este hormigón va a requerir máquinas especializadas como pavimentadoras o rodillos para su compactación.

Según los resultados obtenidos el cemento H es el más fluido y experimenta una pequeña pérdida de flujo, en caso de que se requiera un flujo menor para cualquier otro diseño, se puede reducir su relación a/c.

El cemento B tiene la mayor pérdida de flujo, debido a esto, al elaborar diseños de hormigón se debe considerar no reducir en gran cantidad la relación a/c y la dosificación de aditivos en obra para recuperar su fluidez.

Los cementos que no han perdido fluidez de manera notable son los cementos C, E y F.

4.2.5. Desarrollo de temperatura de hidratación Holcim Heat

El desarrollo de las temperaturas de los morteros con cada tipo de cemento se muestran en la tabla siguiente

Tabla 8: Temperaturas de los cementos.

Cemento	Temp máx.	Temp Acum. a 24h.
A	36	280
B	37	298
C	36.3	286
D	35.2	262
E	39.8	317
F	41	352
G	40	314
H	42.8	367

Fuente: Garófalo A.

Las gráficas que se generaron por cada muestra de mortero, son curvas correspondientes al monitoreo semiadiabático de la temperatura de hidratación. La duración del ensayo es de 28 horas para registrar el comportamiento de la temperatura durante el endurecimiento del hormigón.

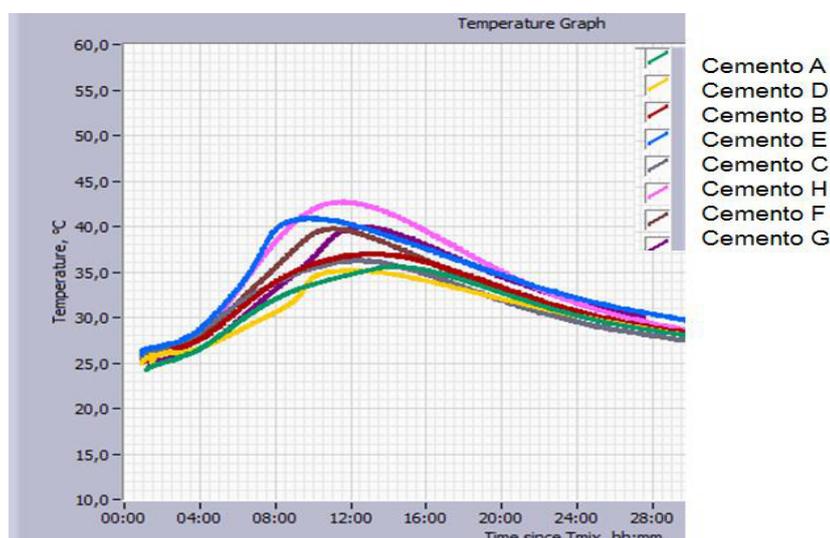


Figura 4.7: Curvas semiadiabáticas de temperatura de hidratación de cada tipo de

Fuente: Holcim Heat, ThermoCal.

Como se puede observar el cemento que generó la mayor temperatura es el cemento H, esto se debe al mayor contenido de clinker ya que al hidratarse se produce una elevación de temperatura mayor que un cemento con menor contenido de clinker. Los cementos A y B generan las temperaturas más bajas, debido al bajo contenido de clinker que poseen.

En la figura 4.8, muestra el crecimiento acumulativo de la temperatura provocada por la reacción de hidratación de cada muestra de cemento por un lapso de 28 horas.

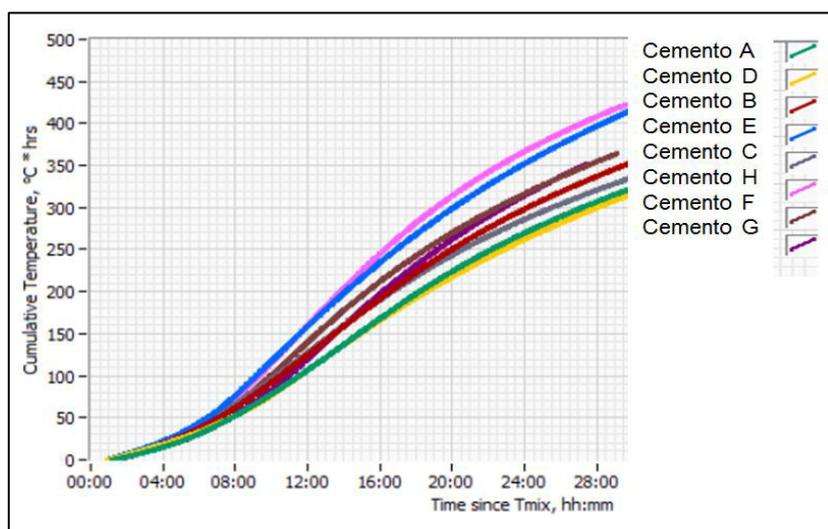


Figura 4.8: Crecimiento Acumulativo de temperatura durante 28h.

Fuente: Holcim Heat- ThermoCal.

Los cemento con el desarrollo de temperatura más elevado son el cemento H y E, mientras que el cemento D mantiene un progreso de temperatura más bajo, que todos los demás.

4.2.6. Reacción Álcali-Sílice

En esta fase, el estudio el estudio de la reacción álcali-sílice entre los agregados reactivos y los álcalis del cemento, es

importante ya que mediante este método se evalúa la durabilidad del hormigón

A un pH mayor que 9, la sílice presente en el agregado es disuelto en forma el ácido silícico, este ácido al reaccionar con los álcalis, forma el gel álcali-sílice; el mismo que provocan las expansiones dentro del hormigón.

Tabla 9: Deformación de barras de mortero de los diferentes cementos.

	Deformación (%)					
	2 días	5 días	8 días	11 días	13 días	16 días
A	0.0000	0.0152	0.0152	0.0200	0.0324	0.0372
B	0.0000	0.0073	0.0185	0.0406	0.0448	0.0473
C	0.0000	0.0272	0.0306	0.0379	0.0648	0.0683
D	0.0000	0.0133	0.0181	0.0293	0.0349	0.0389
E	0.0000	0.0131	0.0259	0.0315	0.0427	0.0429
F	0.0000	0.0336	0.0364	0.0448	0.0652	0.0683
G	0.0000	0.0091	0.0171	0.0195	0.0347	0.0613
H	0.0000	0.0715	0.0955	0.1119	0.2133	0.2400
Lim 0.1%	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000

Fuente: Garófalo A.

La Tabla 9, muestra las deformaciones promedio que sufren las barras de mortero elaborado con cada tipo de cemento, se realizaron 6 lecturas durante el ensayo.

Las deformaciones de las barras expuestas a la solución de NaOH y a una temperatura de 80°C, durante los 14 días, se observan a continuación.

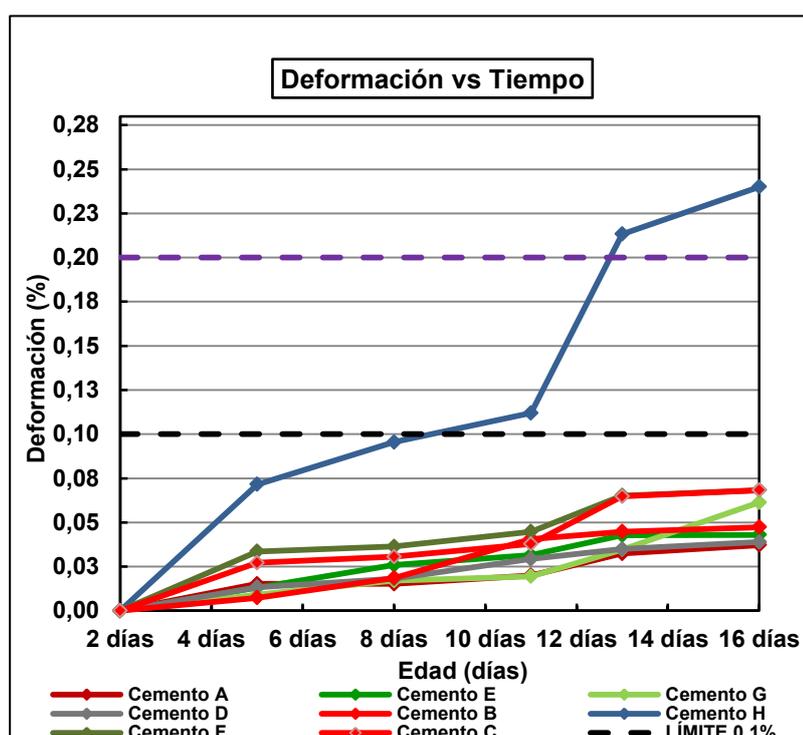


Figura 1.9: Deformación de barras de mortero por reacción álcali-silice.

Fuente: Garófalo A.

Se considera que el agregado es altamente reactivo cuando las expansiones son mayores al 0.2%, en el rango de 0.1% y 0.2%, el agregado es considerado potencialmente reactivo; mientras que si las deformaciones están debajo de 0.1% el agregado es considerado moderadamente reactivo.

Se puede apreciar que, la mayoría de los cementos están dentro del rango de 0.1% de deformación, excepto el cemento H que es altamente reactivo con un valor de deformación del 0.24%. El cemento A experimenta la menor expansión con un valor de 0.0372%.

El cemento H experimenta una alta generación del gel expansivo, que provocará la aparición de fisuras en las estructuras de hormigón elaboradas con este cemento; esto quiere decir que, en cuanto a durabilidad el cemento no tiene un buen desempeño.

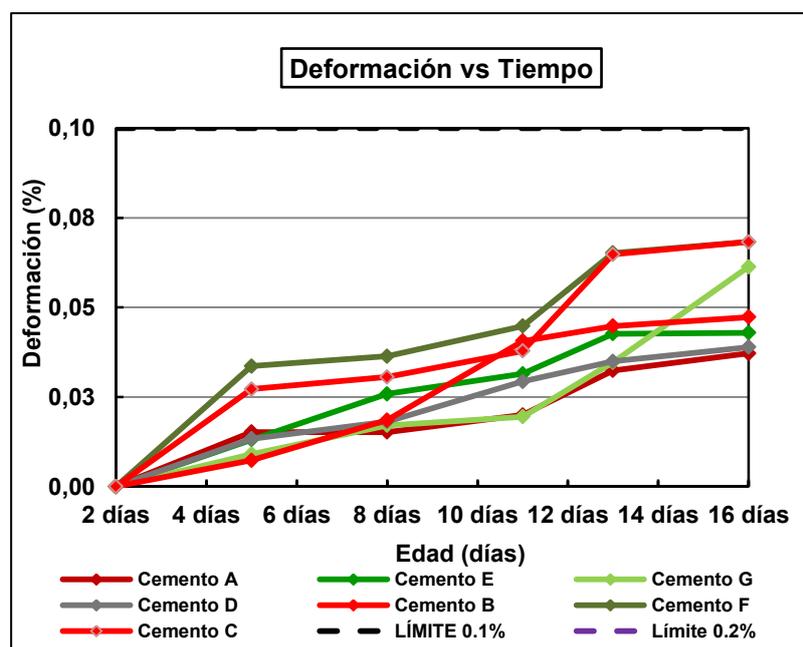


Figura 4.10: Deformación de barras de mortero por reacción álcali-silice, sin cemento H.

Fuente: Garófalo A.

Sin considerar el cemento H, la deformación de las barras de mortero, están dentro del 0.1%; sin embargo dentro de este rango, los cementos que desarrollan una reacción álcali-sílice de forma moderada son los cementos A, D, E y C, con una deformación máxima de 0.0473%; mientras que los cementos C, F y G generan más gel expansivo, provocando expansiones hasta de 0.0683%; estos cementos tienen tendencia a generar más fisuras en estructuras de hormigón.

4.3. Análisis en Hormigón

En esta fase se analizará la resistencia del hormigón a diferentes edades; el diseño que se elaboró fue el mismo

4.3.1. Resistencia a la compresión en cilindros

La resistencia a la compresión del hormigón es la medida más común de desempeño para diseñar edificios y otras estructuras. Los requerimientos de resistencia para el hormigón se realiza a la edad de 28 días, el desarrollo de las resistencias tempranas y a edades mayores de los especímenes dependen de los materiales que contiene el concreto y de su proceso constructivo.

Para la evaluación de cada cemento en la elaboración de hormigón, se trabajó con los mismos agregados en todas las muestras tomando como única variable el tipo de cemento.

En **Anexo 11**, se muestran las resistencias a la compresión obtenidas en las probetas cilíndricas de hormigón.

Las pruebas de resistencias a la compresión se emplean para determinar que la mezcla de hormigón cumpla con los requerimientos de resistencia especificada ($f'c$), y de esta manera se realiza el control de calidad del hormigón.

Para los hormigones de baja resistencia (200 Kg.cm⁻²), es frecuente que la resistencia propia de la pasta sea el factor predominante.

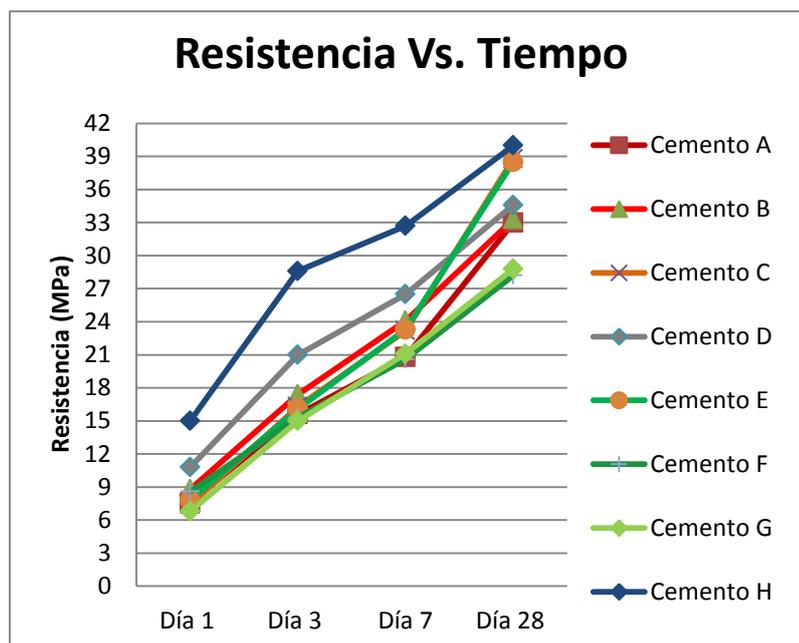


Figura 4.11: Desarrollo de resistencias a la compresión en hormigón con cada tipo de cemento.

Fuente: Garófalo A.

Las probetas de hormigón con el cemento H tiene un desarrollo más alto de resistencias a la compresión, seguido por el hormigón con cemento D.

Los hormigones elaborados con los demás tipos de cemento tienen una tendencia de crecimiento similar. Los cementos A, B, C, E, F y G desarrollan muy cercanas resistencias a la compresión 1 y 3 días de edad, y partir de este punto se empiezan a notar diferencias en sus resistencias ya que en algunos casos sus resistencias a la compresión mantiene su tendencia de crecimiento, como se puede notar en los cementos A y B; mientras que los cementos G y F alcanzan una resistencia

menor a los 28 días de edad ,en comparación con las demás probetas de hormigón. La resistencia desarrollada en las probetas con cemento E tiene una elevación a la edad de 28 días alcanzando a las resistencias del hormigón con cemento H.

En el Anexo 12 se puede observar un comparativo de las resistencias alcanzadas por las probetas de hormigón.

A la edad de 1 día se puede notar que las resistencias de los cementos que se mantienen cercanas; al día 3, las resistencias desarrolladas por los cementos A, D y F son mayores que los demás tipos de cementos. A pesar que el cemento C tiene un contenido de 73.2% de clinker, sus resistencias en hormigón no son tan elevadas, lo que quiere decir que la calidad del mismo no es elevada

Los cementos A y B tienen los menores contenidos de clinker, sin embargo, el desarrollo de sus resistencias a los 28 días de edad es muy parecido, sobrepasando sus resistencias a la resistencia a la compresión de las probetas de hormigón con cemento C. Se puede notar que el cemento F que primero presenta unas resistencias elevadas, al llegar a los 28 días decrece su resistencia.

CAPÍTULO 5.
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. El análisis de la composición química de los cementos por fluorescencia de rayos X, varían entre sí, debido a que sus materias primas y proceso de fabricación son diferentes. El alto contenido de SiO₂ en el cemento contribuye al desempeño de altas resistencias en el mismo. Los cementos que contienen mayor contenido de sílice son los cementos A y B.
2. El contenido de clinker de cada tipo de cemento permitió establecer una relación con ciertas propiedades físicas. El cemento con mayor contenido de clinker, genera altas temperatura durante la hidratación del cemento y desarrollo resistencias altas en cubos de mortero.
3. Los cementos con mayor contenido de clinker poseen un menor contenido de adiciones o compuestos minerales, la incidencia del mismo se pudo observar en la finura de los cementos; mientras el resultado de Blaine es más alto, el contenido de adiciones también es alta.
4. En un cemento portland, la finura del mismo es muy alta, provocando altas temperaturas y calor de hidratación; en cuanto a

los cementos analizados, no se puede aseverar esta premisa ya que los contenidos de adiciones varían en cada cemento y los cementos con mayor finura no necesariamente son los que desarrollan mayor temperatura de hidratación.

5. La resistencia a la compresión de cubos de mortero también están relacionadas con su contenido de clinker, proveyendo datos sobre las resistencias q tienen a diferentes edades. El clinker de los cementos C, E y H tienen mayor contenido de C3S comparado con el clinker de los demás cementos.
6. La generación de temperatura en la hidratación de cada cemento es dada principalmente por el contenido de Clinker, sin embargo hay que tomar en consideración la composición química y mineralógica del material de adición ya que no todas las adiciones tienen un mismo comportamiento térmico. Según el análisis de cada cemento en cuanto al desarrollo de su temperatura y contenido de adiciones, no siempre guardan relación entre sí ya que la calidad de las adiciones usadas en cada cemento no son las mismas. Los cementos A y B son los que generan menor temperatura y se debe a su bajo contenido de clinker.
7. Los resultados de la pérdida de trabajabilidad de cada uno de los cementos se manejaron con la misma relación a/c para poder

establecer un comparativo; se determinó que el cemento B presentó mayor pérdida de flujo, por lo que se tendrán que tomar ciertas medidas si el hormigón elaborado con este tipo de cemento es bombeado.

8. En estructuras de hormigón de grandes volúmenes, con espesor mayor que un metro, la cantidad de calor generado son importantes debido a que si el calor no se disipa rápidamente, puede ocurrir un aumento considerable de la temperatura del concreto, provocando fisuras.
9. La durabilidad de una estructura de hormigón es un aspecto muy importante ya que deben ser resistentes al intemperismo del ambiente a lo largo de los años. Algunos de los cementos analizados alcanzaban resistencias altas a diferentes edades pero al estudiar el potencial de reacción álcali-sílice, su deformación eran mayores; por consiguiente las estructuras son más propensas a experimentar dicha reacción. Los cementos A,B y D presentaron menor cantidad del gel expansivo.
10. La resistencia mecánica que desarrolla el hormigón depende de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida y de la adherencia entre ellos, cuando las partículas de los agregados son resistentes la resistencia mecánica del concreto

es gobernada por la pasta de cemento, por ello es importante elaborar un hormigón con un buen agregado. Las resistencias obtenidas de las probetas de hormigón ensayadas, fueron analizadas por su interacción con el mismo tipo de agregado para todas las muestras, donde la resistencia a la compresión más elevadas correspondió al cemento H, sin embargo los cementos A y B tuvieron un desarrollo de resistencias más lineal. Los resultados correspondientes a las demás muestras de hormigón generaron resistencias que inicialmente tenían cierta tendencia y posteriormente decrecían en comparación a las demás muestras

11. Al analizar durabilidad del hormigón, no se debe considerar sólo su desempeño en cuanto a sus resistencias a diferentes edades, sino la calidad del cemento, agregados, cantidad de agua, el diseño utilizado en el hormigón y su proceso constructivo.

5.2. RECOMENDACIONES

- Al realizar los ensayos es muy importante mantener las temperaturas ambientales controladas ya que pueden generar ciertas variaciones en los resultados.
- En el ensayo de trabajabilidad se debe realizar la prueba con tiempo cronometrado ya que es importante el tiempo en que se hidrata el cemento.
- Al elaborar el hormigón se debe manejar agregados con las mismas características, y de esta manera controlar cualquier tipo de variación que pueda presentarse por variación de agregado. En caso de usar otro tipo de agregado debe caracterizarse, debe tomarse en cuenta de la humedad y absorción de los mismos; evitando así errores en la relación a/c. Si la humedad de los agregados es variada para cada lote de hormigón se verán afectada su demanda de agua.
- Al realizar el ensayo de reacción álcali-sílice debe trabajarse con mucha precaución ya que se maneja una solución de NaOH, de modo que al preparar una cantidad grande de solución genera mucho más calor que manejar una cantidad de solución pequeña.

- Para la elaboración de hormigón debe evitarse en lo posible trabajar con agregado que contengan ópalo, calcedonia o rocas volcánicas vítreas ríolíticas, ya que estas son más susceptibles a reaccionar con los álcalis del cemento; debe seleccionarse un agregado con baja reactividad o colocar adiciones con el objetivo de mitigar la reacción.
- Seleccionar un hormigón de calidad debe considerarse no solo las resistencias a la compresión a diferentes edades sino su capacidad de resistir los ataques ambientales.

ANEXOS

ANEXO 1.

Cemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F	Na ₂ O EQ	TOT.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
A	37.9	8.95	2.7	37.7	0.9	2.48	1.67	1.59	0.45	0.24	3.0	2.69	97.6
B	32.7	9.45	4.22	41.9	1.44	2.52	0.67	1.21	0.62	0.24	4.0	1.65	98.9
C	27.6	5.93	3.37	52.4	1.07	2.48	0.92	0.84	0.44	0.24	3.4	1.44	98.8
D	27.6	5.93	3.09	51.2	2.41	2.38	1.28	0.87	0.29	0.24	4.9	1.71	100.1
E	27.9	7.1	3.82	51.9	1.98	2.34	0.46	1.4	0.39	0.24	1.6	1.7	99.1
F	30.8	7.98	4.14	48.4	2.06	1.98	0.48	1.54	0.46	0.24	1.2	1.85	99.1
G	30.6	7.98	4.21	48.4	2.12	1.93	0.48	1.47	0.46	0.24	2.2	1.79	100.1
H	19.1	4.23	3.31	62.2	1.75	3.45	0.56	0.48	0.22	0.24	4.4	0.85	100

Anexo 1. Composición química de los cementos analizados

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 2

HOJA DE DISEÑO HOLCIM HEAT Y HOLCIM CONO								
Agregado								
Arena Natural	Humedad [%]	2,3	Absorción [%]	2,3	Densidad [g/cm3]	2,4		
Diseño de mezcla referencial de hormigón								
Relación a/c:	0,600		Densidad de la mezcla [g/cm3]:			2,900		
Contenido de cemento [kg/m³]:	420		Volumen mortero [L/m3]			684		
Arena [kg/m³]:	690		Asentamiento deseado [mm]:			150		
MEZCLAS								
Técnico	Alicia Garófalo							
Fecha & hora	09/11/14 10:28	09/11/14 10:49	09/11/14 11:18	09/11/14 11:50	09/11/14 11:12	09/11/14 11:48	10/11/2014 10:00	10/11/14 10:28
Cemento	A	B	C	D	E	F	G	H
Dosificación [%]	2677,8	2677,8	2677,8	2677,8	2677,8	2677,8	2677,8	2677,8
Agua [g]	986,09	986,09	986,09	986,09	986,09	986,09	986,09	986,09
Total mezcla [g]	1643,48	1643,48	1643,48	1643,48	1643,48	1643,48	1643,48	1643,48
Arena Natural [g]	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700	2700

Anexo 2. Hoja de diseño para el mortero Holcim Heat y Holcim Cono

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 2

Arido Fino para Hormigón DETERMINACION DE LA DENSIDAD Y ABSORCION DE AGUA

INEN 856 - A STM C 128

INTERESADO: Alicia Garófalo
MATERIAL: Arena
PROCEDENCIA: Cantera Pifo- San Antonio- Quito

DATOS

A:	493.00	gramos
B:	677.0	gramos
S:	500.0	gramos
C:	982.5	gramos

Ds:	2535	kg/m ³
Dsss:	2571	kg/m ³
D:	2629	kg/m ³
Po:	1.42	%

$$Ds: \frac{A}{B+S-C}$$

$$Dsss: \frac{S}{B+S-C}$$

$$D: \frac{A}{B+A-C}$$

$$Po: \frac{S-A}{A} * 100$$

Nomenclatura:

- A: Peso en el aire de la muestra secada al horno
- B: Peso del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración
- S: Peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco
- C: Peso del matraz con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración
- Ds: Densidad de Volumen a 23 °C del árido fino seco
- Dsss: Densidad de Volumen a 23 °C del árido fino en estado saturado superficialmente seco
- D: Densidad aparente del árido fino a 23 °C .
- Po: Porcentaje de absorción de agua del árido fino

Anexo 2. Datos de densidad y absorción de la arena de Pifo

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 3

Laboratorio:	Centro Técnico del Hormigón	
Fecha:	07/04/2014	
MUESTRA AGREGADO FINO		
Arena de Rio		
Molde:		1
Peso del recipiente	g	567
Peso rec. + suelo húmedo	g	3215
Peso rec. + suelo seca	g	3202
Peso agua	g	13
Peso Seco	g	2622
Humedad	%	0.50%
MUESTRA AGREGADO GRUESO		
Piedra #67		
Molde:		3
Peso del recipiente	g	570
Peso rec. + suelo húmedo	g	3150
Peso rec. + suelo seca	g	3134
Peso agua	g	16
Peso Seco	g	2548
Humedad	%	0.63%

Anexo 3. Humedades de los agregados para hormigón**Fuente:** Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 4

Laboratorio: Centro Técnico del Hormigón

Fecha: 24/03/2014

Agregado: Arena zarandeada-Río Boliche

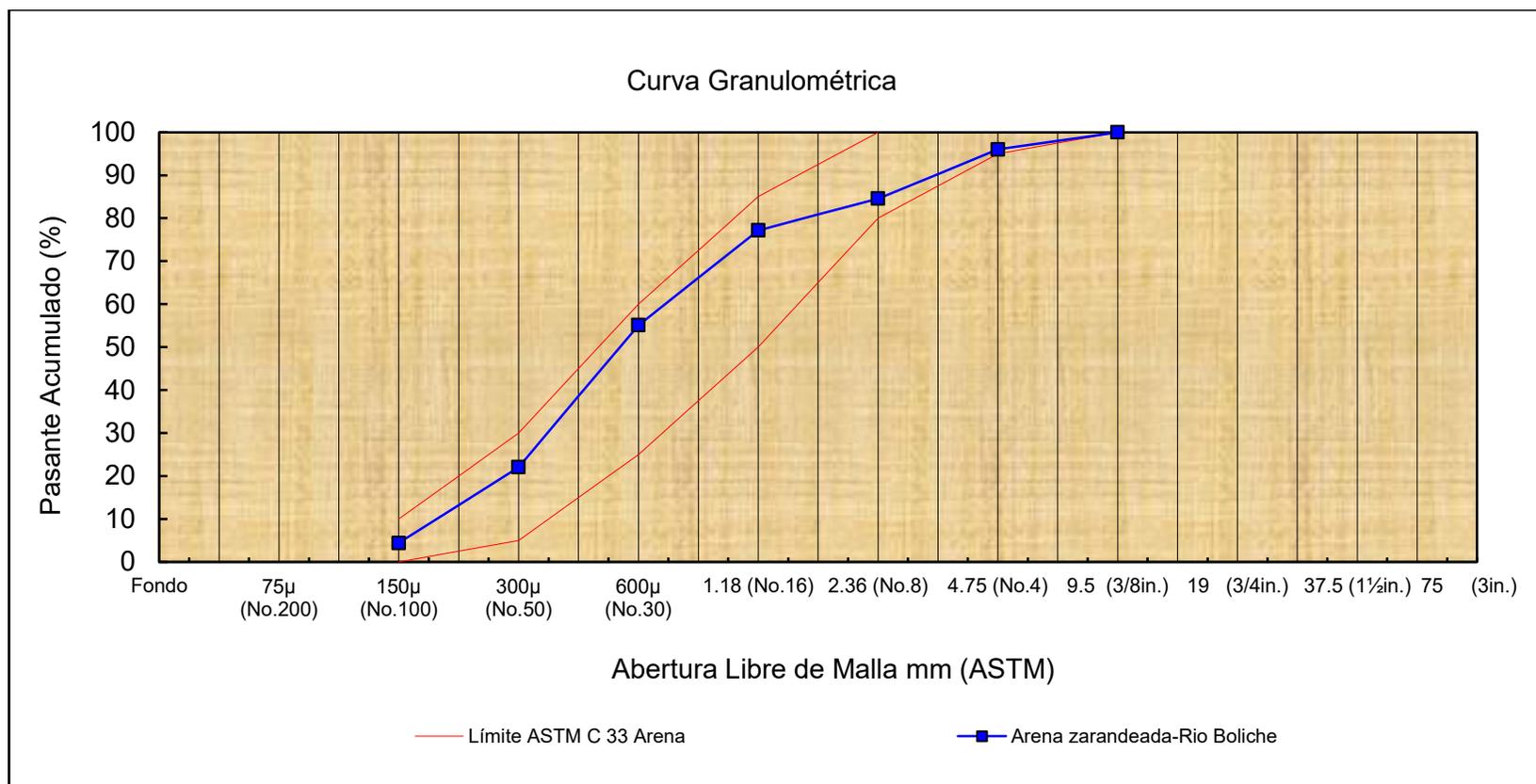
Masa inicial(g): 500

Tamiz		Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante Acumulado (%)
INEN	ASTM				
9.50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4.75 mm	No. 4	20.0	4	4	96
2.36 mm	No. 8	57.0	11	15	85
1.18 mm	No. 16	37.0	7	23	77
600 µm	No. 30	110.0	22	45	55
300 µm	No. 50	165.0	33	78	22
150 µm	No. 100	88.0	18	96	4
Bandeja		22.0	4	100	0
Masa final (g):	499.0	Módulo de Finura :		2.6	
Pérdida ≤0.3%	Ensayo válido				

Anexo 4. Granulometría del agregado fino-Río Boliche

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 5



Anexo 5. Granulometría del agregado fino-Río Boliche

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 6

Laboratorio: Centro Técnico del Hormigón
 Realizado por: Jacob Mosquera
 Agregado: Piedra N° 67-Calizas Huayco

Fecha: 25/03/2014

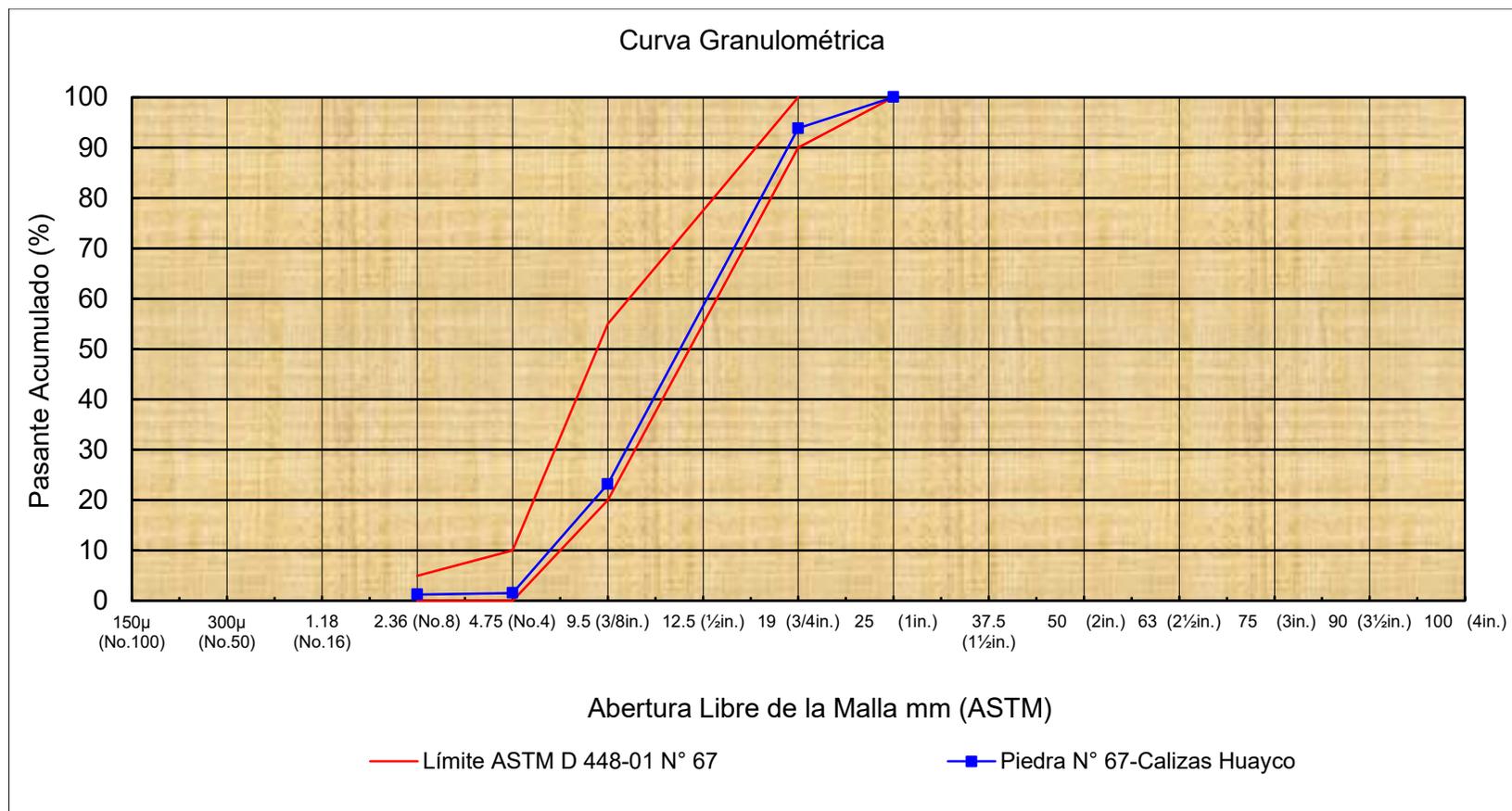
Masa inicial (g): 6.000

Tamiz		Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasante Acumulado (%)
INEN	ASTM				
50 mm	2 in.	---	---	---	---
37.5 mm	1½ in.	---	---	---	---
25 mm	1 in.	0,0	0	0	100
19 mm	¾ in.	370,0	6	6	94
12.5 mm	½ in.	---	---	---	---
9.5 mm	3/8 in.	4235,0	71	77	23
4,75 mm	No. 4	1298,0	22	98	2
2,36 mm	No. 8	18,0	0	99	1
1,18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
Bandeja		75,0	1	100	0
Masa final (g): 5996,0		Módulo de Finura:		6,8	
Pérdida ≤0.5%: Ensayo válido					

Anexo 6. Granulometría de la piedra No. 67

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 7

**Anexo 7. Granulometría de la piedra No. 67**

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 8

Arido Fino para Hormigón DETERMINACION DE LA DENSIDAD Y ABSORCION DE AGUA

INEN 856 - A STM C 128

INTERESADO: Alicia Garófalo
MATERIAL: Arena
PROCEDENCIA: Arena Zarandeada Río Boliche

DATOS

A:	488.80	gramos
B:	707.3	gramos
S:	500.0	gramos
C:	1021.1	gramos

Ds:	2625	kg/m ³
Dsss:	2685	kg/m ³
D:	2793	kg/m ³
Po:	2.29	%

$$D_s = \frac{A}{B+S-C}$$

$$D_{sss} = \frac{S}{B+S-C}$$

$$D = \frac{A}{B+A-C}$$

$$P_o = \frac{S-A}{A} * 100$$

Nomenclatura:

- A: Peso en el aire de la muestra secada al horno
- B: Peso del matraz lleno de agua hasta la marca de calibración
- S: Peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco
- C: Peso del matraz con la muestra lleno de agua hasta la marca de calibración
- Ds: Densidad de Volumen a 23 C del árido fino seco
- Dsss: Densidad de Volumen a 23 C del árido fino en estado saturado superficialmente seco
- D: Densidad aparente del árido fino a 23 C .
- Po: Porcentaje de absorción de agua del árido fino

Anexo 8. Densidad y absorción de la arena de río

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 9

**DETERMINACION DE LA DENSIDAD
Y ABSORCION DEL ARIDO GRUESO
(INEN 857)**

Interesado: Alicia Garófalo
 Procedencia: Calizas Huayco
 Agregado: Triturado N°67
 Fecha de Ensayo: 09/04/2014

DATOS

A:	3441.50	gramos
B:	3500.0	gramos
C:	2159.50	gramos

Ds:	2567.3	kg/m ³
Dsss:	2611.0	kg/m ³
D:	2684.5	kg/m ³
Po:	1.70	%

$$Ds: \frac{A}{B-C}$$

$$Dsss: \frac{B}{B-C}$$

$$D: \frac{A}{A-C}$$

$$Po: \frac{B-A}{A} * 100$$

Nomenclatura:

- A: Peso en el aire de la muestra secada al horno
 B: Peso en el aire de la muestra en estado saturado superficialmente seco
 C: Peso en el agua de la muestra en estado saturado
 Ds: Densidad de Volumen a 23 C del árido grueso seco
 Dsss: Densidad de Volumen a 23 C del árido grueso en estado saturado superficialmente seco
 D: Densidad aparente del árido a 23 C .
 Po: Porcentaje de absorción de agua del árido grueso

Anexo 9. Densidad y absorción de la piedra No. 67

Fuente: Centro Técnico del Hormigón

ANEXO 10

DISEÑO Benchmarking 210 kg/cm² , 20,6 MPa

Materiales		Pesos S.S.S x m3	Pesos secos x m3	Pesos reales x m3	Batch	
					22 lt	
		Kg	Kg	Kg	Kg	
Cemento	Cemento	420.00	420.00	420.00	9.24	Cemento
Piedra 1	No. 67	930.00	914.45	918.20	20.20	No. 67
Piedra 2	No. 78	0.00	0.00	0.00	0.00	No. 78
Piedra 3		0.00	0.00	0.00	0.00	0
Arena 1	Arena Rio	690.00	674.49	715.63	15.74	Arena Rio
Arena 2	Arena Trit	0.00	0.00	0.00	0.00	Arena Trit
Arena 3			0.00	0.00	0.00	0
	Agua	234.00	265.06	220.17	4.84	Agua
						Agua +/-

Rel a/c 0.55

Anexo 10 .Diseño de Hormigón

Fuente: Centro Técnico del Hormigón.

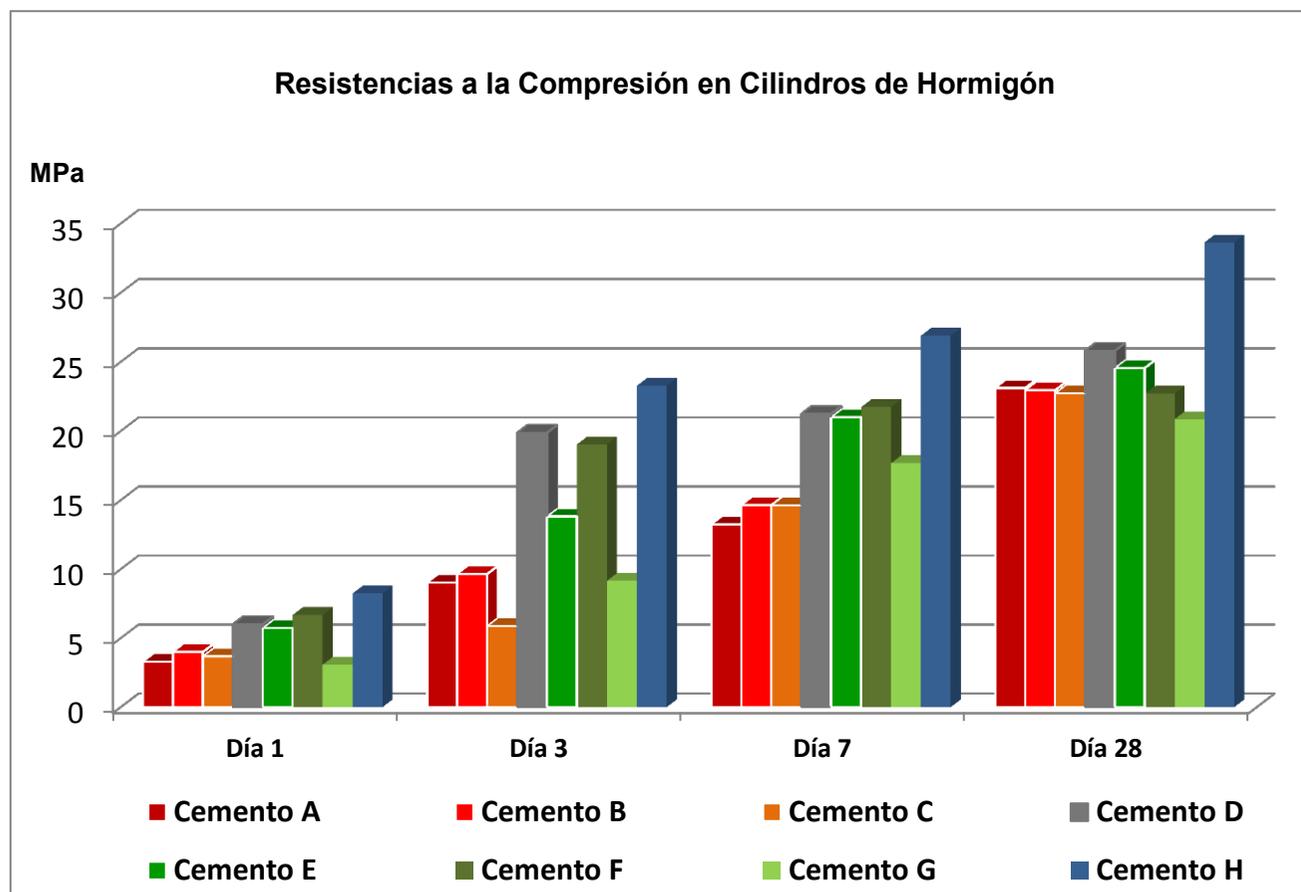
ANEXO 11

Resistencia (MPa)								
Edad	A	B	C	D	E	F	G	H
Día 1	3.29	4.01	3.70	6.01	5.74	6.684	3.08	8.24
Día 3	9.02	9.65	5.88	19.87	13.81	19.04	9.15	23.27
Día 7	13.24	14.64	14.62	21.25	21.00	21.73	17.67	26.89
Día 28	23.12	22.95	22.73	25.80	24.55	22.7	20.85	33.63

Anexo 11: Resistencia a la compresión en probetas cilíndricas de hormigón.

Fuente: Garófalo A

ANEXO 12



Anexo 12: Comparativo de resistencia a la compresión en hormigón.

Fuente: Garófalo A.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] The European Cement Association (CEMBUREAU). (1013). Statical Report 1013 FICEM. *The European Cement Association (CEMBUREAU)*, 32.
- [2] Instituto Nacinal de Estadistica y Censo. (3 de Diciembre de 2012). *INEC*.
Obtenido de InfoEconomía: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec>
- [3] Holcim. (2011). *HOLCIM - Ecuador*. Obtenido de <http://www.holcim.com.ec/productos-y-servicios/portafolio-holcim/hormigon.html>
- [4] Federación Interamericana del Cemento. (2013). *Información Estadístico 2013*. Recuperado el 25 de Enero de 2015, de <http://www.ficem.org>:
http://www.ficem.org/estadisticas/informe_estadistico_2013.pdf
- [5] Amstrong, T. (2013). *An overview of global cement sectortrends - Insights from the Global Cement Repot*. Digital, Lima - Perú.
- [6] Perilla Sastoque, J. E., & Cortés Gómez, E. A. (2014). Estudio Comparativo de las Características Físico-Mecánicas de Cuatro Cementos Comerciales Portland Tipo I. Colombia.
- [7] Neville, A. M. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto* (pág. 1). México: Arq. Heraclio Esqueda Huidobro, Ing. Raúl Huerta Martínez.

- [8] Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. En D. S. Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero* (pág. 34). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Bhandar Editores Ltda.
- [9] Blaut, H. (1979). Proceedings Quality Control of Concret. En H. Blaut, *Proceedings Quality Control of Concret* (pág. 23). Stockholm.
- [10] Chung, H. A. (1988). Concrete International. En H. A. Chung, *Concrete International* (pág. 58).
- [11] Neville, A. M. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto*. México: Arq. Heraclio Esqueda Huidobro, Ing. Raúl Huerta Martínez.
- [12] Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. En D. S. Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero* (pág. 27). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Bhandar Editores Ltda.
- [13] Taylor, 1998
- [14] Taylor, 1998
- [15] Taylor, 1998
- [16] Taylor, 1998
- [17] ASTM Manual on Presentation of data and control Chart Analysis. (1976). ASTM Manual on Presentation of data and control Chart Analysis. *ASTM Manual on Presentation of data and control Chart Analysis*.
- [18] Edwin Aberto Cortes Gomez, J. E. (2004). Estudio comparativo de las características mecánicas de cementos . *Estudio comparativo de las*

características mecánicas de cementos . Santa Fé de Bogotá, Bogotá, Colombia.

- [19] Standard, I. B. (1982). *Institution British Standard BS 3892*. London.
- [20] Neville, A. M. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto*. México: Arq. Heraclio Esqueda Huidobro, Ing. Raúl Huerta Martínez.
- [21] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 490:2011. *Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos*. Quíto, Pichincha, Ecuador.
- [22] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380:2011. *Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos*. Quito, Pichincha, Ecuador.
- [23] Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. En D. S. Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero* (pág. 27). Santa Fé de Bogotá, Colombia: Bhandar Editores Ltda.
- [24] Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del Concreto y del Mortero. En D. S. Guzmán, *Tecnología del Concreto y del Mortero* (pág. 42). Santa Fé de Bogotá, Colombia : Bhandar Editores Ltda.
- [25] Neville, A. M. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto*. México: Arq. Heraclio Esqueda Huidobro, Ing. Raúl Huerta Martínez.

- [26] Lisk, K. a. (1970). "Effect on the sea water from tropical areas on setting times of cements". *Materials and Structures*,3, 101-5.
- [27] Steniour, H. (s.f.). Concrete mix water -how impure can it be? *Cement Assoc. Research and Development Laboratories*, 32-50.
- [28] Neville, A. M. (1999). Tecnología del Concreto. En A. Neville, *Tecnología del Concreto*. México: Arq. Heraclio Esqueda Huidobro, Ing. Raúl Huerta Martínez, 75.
- [29] Bérubé, M. (2004). Laboratory assesment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, 897-899.
- [30] García Días, E. R. (2006). Mechanism of damage for the alkali-silica reaction. *Cement and concrete research* 36, 1043-1053.
- [31] Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, R. a. (2013). Desing and Control of Concrete Mixtures. The Guide to applications, methods, and, materials, 15th Edition. En R. a. Steven H. Kosmatka and Michelle L. Wilson, *Desing and Control of Concrete Mixtures. The Guide to applications, methods, and, materials*