



**UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**“UTILIZACIÓN DE LA ADICIÓN DE ARCILLA CALCINADA MÁS
CALIZA (LC2) EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGONES DE
ALTAS PRESTACIONES”**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO(A) CIVIL

AUTORES:

PRUDENTE MERCHÁN MARÍA ALEJANDRA

VALLEJO SALGUERO RAFAEL JOSUÉ

TUTOR:

ING. GARCÉS VARGAS JUAN FRANCISCO

La Libertad, Ecuador

2019

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por **Prudente Merchán María Alejandra y Vallejo Salguero Rafael Josué**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero (a) Civil**.

TUTOR

f. 

Ing. Garcés Vargas Juan Francisco

DIRECTORA DE LA CARRERA

f. 

Arq. Rubira Gómez Gilda

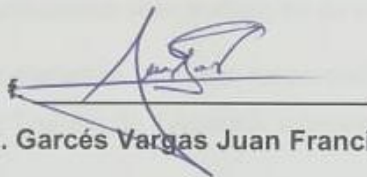
La Libertad, a los dieciocho días del mes de enero del año 2019



APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación "UTILIZACIÓN DE LA ADICIÓN DE ARCILLA CALCINADA MÁS CALIZA (LC2) EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES", elaborado por la Srta. PRUDENTE MERCHÁN MARÍA ALEJANDRA y el Sr. VALLEJO SALGUERO RAFAEL JOSUÉ, egresado de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingenieros Civiles, me permito declarar que luego de haberla dirigido, estudiado y revisado, la apruebo en su totalidad.

TUTOR



Ing. Garcés Vargas Juan Francisco

La Libertad, a los dieciocho días del mes de enero del año 2019



RECIBIDO 01 MAR 2019

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Prudente Merchán María Alejandra y Vallejo Salguero Rafael Josué**

DECLARAMOS QUE:


El Trabajo de Titulación, **Utilización de la adición de arcilla calcinada más caliza (LC2) en la producción de hormigones de altas prestaciones**, previo a la obtención del título de **Ingeniero (a) Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi/nuestra total autoría.

En virtud de esta declaración, me/nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

La Libertad, a los dieciocho días del mes de enero del año 2019

AUTORES

f. 
Prudente Merchán María Alejandra

f. 
Vallejo Salguero Rafael Josué



RECIBIDO 01 MAR 2019

AUTORIZACIÓN


Nosotros, **Prudente Merchán María Alejandra y Vallejo Salguero Rafael Josué**

Autorizamos a la Universidad Península de Santa Elena a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Utilización de la adición de arcilla calcinada más caliza (LC2) en la producción de hormigones de altas prestaciones**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los dieciocho días del mes de enero del año 2019

AUTORES:

f. 
Prudente Merchán María Alejandra

f. 
Vallejo Salguero Rafael Josué

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO



Universidad Estatal
Península de Santa Elena

Facultad de
Ciencias de la Ingeniería

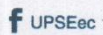
La Libertad, 18 de enero de 2019

CERTIFICADO ANTIPLAGIO 001-TUTOR JFGV-2019

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado "UTILIZACIÓN DE LA ADICIÓN DE ARCILLA CALCINADA MÁS CALIZA (LC2) EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES", elaborado por los (las) estudiante Prudente Merchán María Alejandra y Vallejo Salguero Rafael Josué, egresados (as) de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio URKUND, luego de haber cumplido los requerimientos exigidos de valoración, el presente proyecto ejecutado, se encuentra con **2%** de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe. Adjunto reporte de similitud.

Atentamente,

Ing. Juan Garcés Vargas Mgp.
C.I. 0913140216
DOCENTE TUTOR



UPSEec



@UPSE_ec



UPSE_ec



UPSE Santa Elena



UPSE noticias



flickr.com/upse

www.upse.edu.ec / jgarces@upse.edu.ec

juangarcesvargas@yahoo.com.mx

(04) 2-781732

Vía La Libertad – Santa Elena

AGRADECIMIENTO

A Dios por poner en mí la fortaleza y la perseverancia permitiendo que jamás me rindiera ante la adversidad.

A mi bella madre, Elvira, que sin ella no estaría cumpliendo esta meta que ha sido suya también.

A mi familia en general, pero especialmente a mis hermanos, Franklin, Tania, Rocío, Alicia, Eduardo y Omar, porque cada uno de ellos me ha brindado su apoyo incondicional y su confianza.

A mi tutor Ing. Juan Garcés por sus conocimientos, su guía, su apoyo y por haber depositado su confianza en mí para este proyecto.

Al Ing. Marlon Espinoza de Cementos Atenas e Ing. Flavio Morocho de Hormicrete; ambos del Grupo Industrial Graiman por permitirnos la realización de los ensayos necesarios en sus instalaciones y por sus enseñanzas.

A los docentes por brindarme sus conocimientos, contribuyendo en mi formación profesional.

A mi gran compañero especial y amigo, Edwin, que siempre estuvo allí para mí, por su ayuda incondicional y desinteresada durante nuestra etapa de formación profesional.

A mi compañero, Rafael, por su confianza para este proyecto, que, aunque fue un poco complicado coordinar nuestro tiempo, buscamos y encontramos la manera de trabajar juntos y cumplir nuestro objetivo.

A todos mis compañeros y amigos que de una u otra forma me apoyaron para el cumplimiento de esta meta.

María Alejandra Prudente Merchán

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi Padre Celestial por su amor infinito y a mi hermano mayor Jesucristo por su sacrificio expiatorio y su maravilloso ejemplo, ya que es por medio él que logramos todo cuanto pedimos a Dios si es justo y correcto.

Además, doy infinitas gracias a mis padres o como yo les llamo, mis viejitos, Rafael y Betty, por todos aquellos sacrificios que por amor han hecho y aun hacen por ver felices a sus hijos, por su ejemplo y guía que me brindan día a día, gracias les doy ya que es debido a sus enseñanzas que hoy en día he llegado a ser una persona de bien.

A mis hermanos y hermanas, Eva, Lisbeth, Jared y Samir, por el ánimo y amor que me brindan a diario con el fin de que pueda cumplir mis metas, les agradezco porque hemos creado lazos profundos de amistad y hermandad.

Agradezco al Ing. Juan Garcés por confianza, apoyo, conocimiento y guía durante el tiempo que impartió cátedra a lo largo de mi carrera y durante la preparación de la presente tesis de grado.

Al Grupo industrial Graiman, a la empresa Hormicreteo y Cemento Atenas por permitir realizar todos y cada uno de los ensayos necesarios para llevar a cabo nuestro proyecto de investigación.

A mi compañera de tesis María por su ayuda constante para llevar a cabo este proyecto.

Finalmente quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi Eli, mi hermosa esposa eterna, que con su amor, paciencia y dedicación ha hecho de mí una mejor persona.

Rafael Josué Vallejo Salguero

DEDICATORIA

A Dios y a mi familia, pero en especial a mi Madre porque el cumplimiento de esta meta toda se la debo a ella por su apoyo incondicional, su confianza, por su anhelo de verme convertida en una gran profesional, por hacer de mí la persona que soy, por tomar el rol de padre y madre para mí, por ser el pilar fundamental de mi vida y por muchas cosas más.

María Alejandra Prudente Merchán

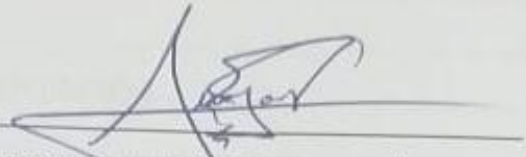
DEDICATORIA

Esta meta alcanzada quiero dedicársela a mis padres, a mis hermanos y a mi Eli, ya que es debido a todos los esfuerzos que hacen por mí, que he logrado llegar a una meta trazada y estoy seguro que ellos estarán para mí en todas y cada una de las metas que me proponga de aquí en adelante, es por ello que les dedico el presente proyecto de investigación.

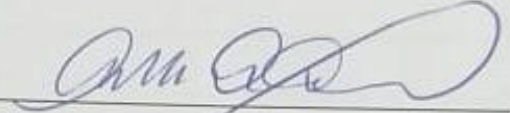
Rafael Josué Vallejo Salguero

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

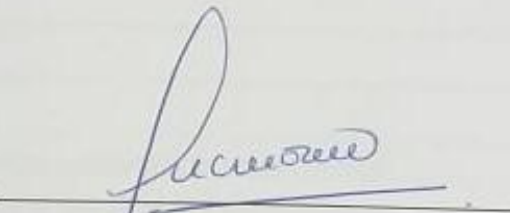
f.


ING. JUAN FRANCISCO GARCÉS VARGAS
DECANO DE LA FACULTAD

f.


ARQ. GILDA RUBIRA GÓMEZ
DIRECTOR DE CARRERA

f.


ING. LUCRECIA CRISTINA MORENO ALCÍVAR
COORDINADOR O DOCENTE DEL ÁREA

f.


ABG. VICTOR CORONEL
SECRETARIO GENERAL

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	IX
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INDICE GENERAL	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
CAPÍTULO 1	2
INTRODUCCIÓN	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.3 ALCANCE	4
CAPÍTULO 2	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 CEMENTO	5
2.1.1 <i>Cemento como material de construcción</i>	5
2.1.2 <i>Generalidades: Historia del cemento</i>	7
2.1.3 <i>Datos históricos de producción (énfasis en Ecuador)</i>	8
2.1.4 <i>Impactos ambientales de la producción de cemento</i>	17
2.2 PUZOLANAS.....	17
2.2.1 <i>Origen y concepto de puzolanas</i>	17
2.2.2 <i>Tipos de puzolanas empleadas</i>	18
2.2.3 <i>Uso de puzolanas como adición mineral</i>	22
2.2.4 <i>Caracterización de la reactividad de puzolanas</i>	23
2.3 ARCILLAS CALCINADAS.....	23
2.3.1 <i>Geología y mineralogía de las arcillas calcinadas</i>	24
2.3.2 <i>Activación térmica de arcillas de origen caoliníticas</i>	24
2.3.3 <i>Utilización de arcillas calcinadas como adición puzolánica</i>	25
2.3.4 <i>Sinergia entre arcillas calcinadas y calizas. El cemento ternario LC3.</i> 25	
2.4 CEMENTOS MEZCLADOS	26
2.4.1 <i>Hidratación de cementos portland con adiciones minerales puzolánicas</i>	26
2.4.1.1 <i>Ceniza Volante</i>	27
2.4.1.2 <i>Escorias de alto horno</i>	27
2.4.1.3 <i>Humo de sílice</i>	27
2.4.2 <i>Impacto de la molienda de cementos. Distribución de tamaño de partículas vs Reología vs propiedades mecánicas</i>	28

2.4.2.1	<i>Efecto de los intensificadores de molienda</i>	28
2.4.2.2	<i>Molienda separada vs intermolienda</i>	28
2.5	HORMIGÓN (CONCRETO)	29
2.5.1	Generalidades	29
2.5.1.1	<i>El hormigón y el desarrollo de la sociedad moderna</i>	29
2.5.1.2	<i>Impacto ambiental de la producción y uso del hormigón</i>	29
2.5.2	<i>El hormigón como material de construcción</i>	30
2.5.2.1	Áridos	30
2.5.2.2	Aglomerante	32
2.5.2.3	Aditivos y adiciones	33
2.5.2.4	Agua	34
2.5.2.5	Dosificación del concreto.....	35
2.6	EL USO DE ADICIONES MINERALES EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGONES	36
2.6.1	<i>Concepto de adición mineral</i>	36
2.6.2	<i>Criterios para la adición en obra</i>	36
2.6.3	<i>Experiencia con adiciones minerales</i>	37
2.6.3.1	<i>Ceniza Volante</i>	37
2.6.3.2	<i>Escorias de alto horno</i>	38
2.6.3.3	<i>Humo de Sílice</i>	39
CAPÍTULO 3		41
EMPLEO DE LA ADICIÓN MINERAL LC2, HUMO DE SÍLICE Y CEMENTO LC3 EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES		41
3.1	GENERALIDADES	41
3.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	41
3.3	METODOLOGÍA DEL DISEÑO	42
3.4	OBTENCIÓN, PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS ..	43
3.4.1	Áridos	43
3.4.1.1	<i>Determinación del material más fino que pasa el tamiz con abertura de 75µm (No. 200), mediante lavado – INEN 697</i>	43
3.4.1.2	<i>Análisis Granulométrico - NTE INEN 696</i>	45
3.4.1.3	<i>Determinación de la densidad y absorción de los áridos</i>	51
3.4.1.4	<i>Determinación de contenido total de humedad NTE INEN 862</i>	57
3.4.1.5	<i>Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) NTE INEN 858</i> 59	
3.4.2	Cemento	62
3.4.3	LC2 (Arcilla, caliza y el yeso)	63
3.4.3.1	<i>Caracterización de la arcilla utilizada</i>	63
3.4.3.2	Caliza	65
3.4.3.3	Yeso	66
3.4.3.4	<i>Intensificador de molienda HEA-2</i>	66
3.4.4	Cemento LC3.....	67
3.4.5	Humo de Sílice	68
3.4.6	Agua	69
3.4.7	Aditivo MASTERHEOBUILD 1050	69
3.5	PREPARACIÓN DE LA ADICIÓN MINERAL LC2 Y LC3	70
3.5.1	<i>Molino de Bolas</i>	71

3.5.2	<i>Proporciones de la adición LC2 y cemento LC3</i>	73
3.6	FABRICACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN	74
3.7	ENSAYO AL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO	75
3.8	PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS.....	76
3.9	ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS A PROBETAS DE HORMIGÓN. PROCEDIMIENTOS	77
3.9.1	<i>Asentamiento mediante el cono de Abrams</i>	77
3.9.2	<i>Resistencia a la compresión</i>	78
3.9.3	<i>Contenido de aire del hormigón fresco - Método de presión</i>	79
3.9.3.1	<i>Equipos</i>	79
3.9.3.2	<i>Muestra</i>	80
3.9.3.3	<i>Procedimiento</i>	80
CAPÍTULO 4	83
ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES CON CONTENIDO DE LC2, HUMO DE SÍLICE Y CEMENTO LC3		83
4.1	GENERALIDADES.....	83
4.2	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE ASENTAMIENTO	83
4.3	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN	85
CAPÍTULO 5	89
ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU'S) Y RELACIÓN COSTO / BENEFICIO		89
5.1	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS	89
5.1.1	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con 100% de cemento Atenas</i>	90
5.1.2	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con 10% de humo de sílice</i> 91	
5.1.3	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC3</i>	92
5.1.4	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-15%</i>	93
5.1.5	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-30%</i>	94
5.1.6	<i>Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-45%</i>	95
5.2	RELACIÓN COSTO / BENEFICIO	96
CAPÍTULO 6	98
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		98
6.1	CONCLUSIONES	98
6.2	RECOMENDACIONES.....	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		100
ANEXOS		103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comercialización mensual y anual del cemento gris en toneladas métricas	9
Tabla 2.....	12
Tabla 3 Importaciones de Cemento y Clinker-Toneladas Métricas.....	13
Tabla 4 Consumo de Cemento Gris Per Cápite.....	15
Tabla 5 Comercialización Anual del Cemento Gris por Empresa-Toneladas Métricas	16
Tabla 6 Clasificación de la Actividad Puzolanica según ATSM.....	20
Tabla 7 Clasificación por Rendimiento.....	21
Tabla 8 Límites para los Materiales Cementantes en concretos asignados a la Clase de Exposición F3	37
Tabla 9 Tipos de muestras de Hormigón y sus diferentes porcentajes de adiciones.....	42
Tabla 10 Determinación del material más fino que pasa el tamiz de 75 um del árido grueso	45
Tabla 11 Determinación del material más fino que pasa el tamiz de 75 um del árido fino	45
Tabla 12 Análisis granulométrico del árido grueso	49
Tabla 13 Análisis granulométrico del árido fino	50
Tabla 14 Determinación de densidades y porcentaje de absorción del árido grueso.....	53
Tabla 15 Determinación de densidades y porcentaje de absorción del árido fino	57
Tabla 16 Determinación del contenido total de humedad del árido grueso .	59
Tabla 17 Determinación del contenido total de humedad del árido fino.....	59
Tabla 18 Determinación del peso volumétrico suelto del árido grueso	61
Tabla 19 Determinación del peso volumétrico suelto del árido fino	61
Tabla 20 Determinación del peso volumétrico compactado del árido grueso	62
Tabla 21 Determinación del peso volumétrico compactado del árido fino ...	62
Tabla 22 Composición química del cemento Portland	63
Tabla 23 Composición química de la Arcilla proveniente del área minera La Pirámide.....	64
Tabla 24 Composición química de la Caliza	65
Tabla 25 Composición química del Yeso	66
Tabla 26 Proporciones de materia prima para la obtención de la adición mineral LC2.....	73
Tabla 27 Proporciones de materia prima para la obtención del cemento LC3	73
Tabla 28 Dosificación para hormigones con una resistencia de diseño de 35 MPA (para 80 L).....	75
Tabla 29 Detalle de la cantidad de agua requerida en el diseño de hormigón, su relación con el cemento y aglomerante y porcentaje de aditivo superplastificante	75

Tabla 30 Resultado de asentamientos, densidad y aire ocluido de todas las muestras de hormigón	83
Tabla 31 Resistencias a la compresión de las mezclas de hormigón	85
Tabla 32 Porcentaje de incremento en la resistencia a la compresión y contenido de clínker	88
Tabla 33 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-100%Cemento Atenas.....	90
Tabla 34 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-10% Humo de Sílice	91
Tabla 35 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-LC3	92
Tabla 36 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-15%LC2	93
Tabla 37 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-30%LC2	94
Tabla 38 Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-45%LC2	95
Tabla 39 Relación Costo/Beneficio	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Construcción de Bahareque en Centroamérica: paredes de arcilla con tiras de madera	7
Figura 2 Variación Anual del Consumo del Cemento Gris	10
Figura 3 Comercialización del cemento gris durante el año 2012.....	11
Figura 4 Total de Importaciones de Cemento y Clinker entre los años 200 y 2015.....	14
Figura 5 Consumo Per Cápita de Cemento Gris entre los años 2000 y 2015	14
Figura 6 Comercialización Total del Cemento Gris por Empresa entre los años 2000 y 2015	16
Figura 7 Curva granulométrica del árido grueso	49
Figura 8 Curva granulométrica del árido fino	50
Figura 9 Limpieza de arcilla calcinada con el uso de imanes	70
Figura 10 Determinación de la finura del material molido (Ensayo DTP).....	70
Figura 11 Anotación de pesos de Clinker	71
Figura 12 Trituración del Clinker para la molienda de LC3	71
Figura 13 Vaciado del material para la molienda de LC3	71
Figura 14 Cuerpos esféricos de acero que contiene el molino de bolas en su interior.....	72
Figura 15 Limpieza del molido mediante aire a presión.....	72
Figura 16 Colocación de material en la mezcladora	74
Figura 17 Vaciado de mezcla en carretilla para el respectivo llenado de probetas.....	74
Figura 18 Elaboración de probetas de hormigón de 10x20 cm.....	76
Figura 19 Probetas de hormigón con diferentes mezclas a ensayar	77
Figura 20 Curado de especímenes.....	77
Figura 21 Ensayo de asentamiento por medio del cono de Abrams.....	78
Figura 22 Medida del asentamiento de las mezclas de hormigón	78
Figura 23 Ruptura de cilindros mediante el uso de la prensa Hidráulica	79
Figura 24 Ensayo de aire ocluido mediante método de presión	82
Figura 25 Asentamientos obtenidos en muestras de hormigón	84
Figura 26 Densidades obtenidas en las mezclas de hormigón	84
Figura 27 Porcentajes de aire ocluido obtenido en las mezclas de hormigón	85
Figura 28 Resistencias a la compresión de las probetas de hormigón	86
Figura 29 Relación Resistencia vs Tiempo de las probetas de hormigón....	87
Figura 30 Comparación de los % de resistencias a la compresión vs el contenido de Clinker de cada mezcla	88

“UTILIZACIÓN DE LA ADICIÓN DE ARCILLA CALCINADA MÁS CALIZA (LC2) EN LA PRODUCCIÓN DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES”

Autores: Prudente Merchán María Alejandra

Vallejo Salguero Rafael Josué

Tutor: Ing. Juan Francisco Garcés Vargas

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se evalúa el comportamiento de las propiedades físico mecánicas de hormigones de altas prestaciones, empleando la utilización de la adición mineral de arcilla calcinada más caliza (LC2) en proporciones de 15%, 30% y 45%, humo de sílice en un 10% y cemento LC3 en 100% de su contenido.

Se describe la obtención de la adición mineral LC2 y el cemento LC3, el desarrollo de los ensayos necesarios para la elaboración de los hormigones, el proceso de preparación de las mezclas, la dosificación adecuada por la variación del contenido de cada espécimen. Se presentan los análisis de resultados de los ensayos que determinan las propiedades que se obtienen con cada tipo de hormigón que se realiza, comparándolos con una muestra patrón elaborada con cemento Portland diseñada para proporcionar una resistencia de 35 MPa.

Además, se efectúa una relación costo/beneficio realizando un análisis de precio unitario para la fabricación de 1 m³ de hormigón simple de cada tipo, y una breve evaluación de las emisiones de CO₂ que se generan en la producción de cada espécimen.

Palabras claves: LC2, LC3, humo de sílice, espécimen.

“USE OF THE ADDITION OF CALCINED CLAY MORE LIME- STONE (LC2) IN THE PRODUCTION OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE”

Authors: Prudente Merchán María Alejandra

Vallejo Salguero Rafael Josué

Tutor: Ing. Juan Francisco Garcés Vargas

ABSTRACT

In the present work of investigation the behavior of the physical and mechanical properties of high performance concretes is evaluated, using the mineral addition of calcinated clay more limestone (LC2) in proportions of 15%, 30% and 45%, silica fume by 10% and LC3 cement in 100% of its content.

It describes the obtaining of the LC2 mineral addition and the LC3 cement, the development of the necessary tests for the elaboration of the concretes, the process of preparation of the mixtures, the adequate dosage for the variation of the content of each specimen. It shows the analysis of the test's results that determine the properties obtained with each type of concrete is presented, comparing them with a standard sample made with Portland cement designed to provide a strength of 35 MPa.

In addition, a cost / benefit relation is made by performing a unit price analysis for the manufacture of 1 m³ of simple concrete of each type, and a brief evaluation of the CO₂ emissions that are generated in the production of each specimen.

Keywords: LC2, LC3, silica fume, specimen.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El cemento es un producto de mucha importancia para el desarrollo económico nacional debido a su incidencia como materia prima en la actividad de la construcción, actualmente es el cuarto sector de mayor importancia en la contribución al PIB del país. (EPCE-Empresa Pública Cementera del Ecuador).

El consumo y la producción de este producto van desarrollándose a través del tiempo, motivo por el cual la producción del cemento es un tema de mucha discusión, específicamente el factor de la alta emisión de CO₂ que se produce, puesto que para una tonelada de cemento se genera una emisión de 620 a 970 kg de CO₂ [1]. En este proceso las emisiones de CO₂ tiene la característica de que el 60 % está asociada con la descomposición de la piedra caliza, actividad que ocurre cuando se calienta la piedra caliza por encima de 900⁰ liberando CO₂. El 40% restante ocurre en los hornos (electricidad, combustible, etc.) los cuales tienen un nivel de eficiencia del 80% del límite termodinámico. Puesto que no hay muchas opciones en cuanto a disposición de los recursos en la corteza terrestre es necesario seguir con la química del Cemento Portland, por tanto, para la reducción de estas emisiones y del empleo de energías no renovables la mejora más apropiada se encuentra en la reducción del clínker mediante el uso de materiales cementicios suplementarios.

Actualmente se conoce que el uso de materiales cementicios suplementarios (SCM) para sustituir parte del cemento, tiene ventajas económicas y además es una vía atractiva para reducir las emisiones de CO₂ de las industrias del cemento.

Las arcillas calcinadas son uno de los posibles candidatos para que los SCM produzcan cementos verdes, debido a su amplia disponibilidad al estar considerablemente diseminados por toda la corteza terrestre, relativa facilidad

de tratamiento al ser activadas mediante procesos térmicos que requieren mucho menos energía que la demandada por la elaboración del clínker y demostradas propiedades puzolánicas una vez calcinadas bajo condiciones específicas. El tratamiento térmico de las arcillas caoliníticas a una temperatura igual o superior a la deshidroxilación ($570^{\circ}\text{C} - 700^{\circ}\text{C}$ [2]) activa sus propiedades puzolánicas y da como resultado el mejor rendimiento en el cemento.

La caolinita calcinada óptimamente tiene actividad puzolánica igual o superior a las puzolanas artificiales conocidas (por ejemplo, ceniza volante y humo de sílice).

Las arcillas calcinadas en forma de meta caolín han recibido por ejemplo especial atención en años recientes pues se conoce que estas adiciones, cuando se añaden a morteros y hormigones, mejoran tanto su resistencia mecánica como su durabilidad.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el comportamiento de las propiedades físico-mecánicas en hormigones de altas prestaciones, empleando la adición de arcillas calcinadas y caliza (LC2) como material sustituyente en peso del cemento Portland.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar antecedentes teóricos sobre el empleo de adiciones de arcilla calcinada y caliza en hormigones de altas prestaciones (igual o superior a 35 MPA).
- Evaluar las propiedades físico-mecánicas en las mezclas de hormigón de altas prestaciones a las 24 h, 3, 7 y 28 días con adiciones de LC2 al 0%, 15%, 30% y 45%.
- Evaluar las propiedades físico-mecánicas descritas en el inciso anterior vs las propiedades físico-mecánicas de hormigones de altas prestaciones con un 10% de humo de sílice y un 100% de contenido de LC3.

- Analizar los resultados obtenidos de los ensayos a hormigones de altas prestaciones.

1.3 Alcance

Se analizará los antecedentes teóricos en cuanto al empleo de adiciones de arcilla calcinada y caliza en la elaboración de hormigones de altas prestaciones. Se evaluarán las propiedades físico-mecánicas de las mezclas de hormigón de altas prestaciones con adiciones de LC2 al 0%, 15%, 30% y 45%, además, se evaluarán dichos resultados con los obtenidos de las muestras de hormigón de alta prestación con un contenido del 10% de humo de sílice y las muestras con un contenido del 100% de LC3.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Cemento

Cuando se habla del cemento, se hace referencia a un material de características aglomerantes y que cuenta con propiedades de adherencia y cohesión, además, se puede mencionar que el cemento es un material inorgánico que mezclado con una cantidad adecuada de agua, arena y piedra llega a endurecerse obteniendo de esta manera una mezcla maciza con una resistencia apropiada para las condiciones a las cuales se encontrará sometida.

El cemento es el material más importante en la fabricación de hormigones, ya que contribuye a una correcta aglomeración de los demás componentes del hormigón y a su vez proporciona resistencia mecánica y una adecuada protección del acero en las estructuras de hormigón armado lo que ayuda a un total aislamiento de los agentes corrosivos y oxidantes que puedan llegar a afectar las estructuras, debilitándolas hasta su posterior colapso.

2.1.1 Cemento como material de construcción

De acuerdo a las características y propiedades que el cemento aporta, es indispensable su uso en la elaboración de hormigones los cuales son utilizados generalmente en la construcción de obras civiles, razón por la cual es de vital importancia que el cemento cumpla con los requisitos contemplados en las siguientes normas:

1. Cemento Portland de los tipos I a V, incluyendo los subtipos IA, IIA y IIIA, que cumplan con los requisitos contemplados en la norma NTE INEN 152 (ASTM C 150);
2. Cemento compuesto tipo IP cumplirá con los requisitos de la norma NTE INEN 490 (ASTM C 595);

3. Cementos clasificados de acuerdo a requisitos de desempeño, según los requerimientos establecidos en la norma NTE INEN 2380 (ASTM C 1157);
4. Cementos para mampostería de acuerdo a los requerimientos establecidos en la norma NTE INEN 1806 (ASTM C 91).

Además, el cemento hidráulico se puede proveer envasado en fundas de papel, fundas de plástico, bolsas grandes (big bags), al granel o en la forma que acuerden proveedor y usuario en el contrato de pedido.

El cemento en fundas debe cumplir con la norma NTE INEN 1902. Para las otras modalidades de envasado, se establecerán las condiciones en el contrato de compra-venta y la descripción mínima que debe contener con claridad, será: el tipo de cemento envasado, la masa neta en kilogramos contenida en el recipiente, la fecha de envasado en planta, el nombre y marca del fabricante y la norma INEN bajo la cual se fabricó el producto. Igual información deberá consignarse en la guía de despacho que acompaña a los vehículos que transportan a granel.

Los ensayos para verificación de cumplimiento de especificaciones deben ser realizados por laboratorios acreditados por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano OAE. Las normas que contienen los procedimientos de ensayos a utilizar son:

1. NTE INEN 153 (ASTM C 183): Cemento hidráulico. Muestreo y ensayos.
2. NTE INEN 156 (ASTM C 188): Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.
3. NTE INEN 157 (ASTM C 187): Cemento hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método de Vicat.
4. NTE INEN 158 (ASTM C 191): Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.
5. NTE INEN 488 (ASTM C 109): Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista.

6. NTE INEN 957 (ASTM C 430): μm (No. 325) Determinación de la finura mediante el tamiz de $45\ \mu\text{m}$ (micrómetros) (No. 325).

Se prohíbe el uso de los cementos para albañilería o para mampostería en la fabricación de hormigón estructural.

2.1.2 Generalidades: Historia del cemento

El uso de aglomerantes data desde hace más de 10000 años en el periodo conocido como Neolítico y es debido a los asentamientos de pequeños grupos de personas que se vieron en la necesidad de radicarse en un sitio específico debido a las actividades en las cuales ellos se desempeñaban, las mismas que tenían que ver con el arado de la tierra para sus cultivos y la domesticación y crianza de animales, es así que empezaron con la construcción de viviendas utilizando aglomerantes naturales de la época. Un claro ejemplo de este tipo de construcciones es Catal Huyuk ubicado en la península de Anatolia en Turkia y debido a que es una de las civilizaciones que constructivamente hablando se ha preservado al pasar de los años, se puede indicar que el uso de aglomerantes naturales tales como: arcillas, cenizas y huesos, han sido los causantes para que las construcciones de aquella época perduren [3].

Es importante reconocer que uno de los primeros aglomerantes utilizados por el ser humano es la arcilla ya que debido a su fácil uso y aplicación se convirtió en un material ideal y apropiado en la construcción de pisos, paredes y revestimientos, es por esta razón que hoy en día aún se utiliza la arcilla para la elaboración de cerámicas, cementos, entre otros.



Figura 1 Construcción de Bahareque en Centroamérica: paredes de arcilla con tiras de madera

Fuente: Notas Técnicas Breve Historia de los Aglomerantes

Aproximadamente 4000 años A.C hacen su aparición grandes civilizaciones que surgieron en Mesopotamia (Babilonia, Asiria, Nínive) y Egipto, sus habitantes fueron los creadores de grandes ciudades con palacios, templos y una diversidad de edificaciones de ingeniería tales como: la puerta de ingreso a la Ciudad de Nínive, las Pirámides Egipcias, los jardines colgantes de Babilonia, entre otros, por otro lado, los sumerios aproximadamente en el año 3500 A.C crearon dos grandes ciudades reconocidas históricamente como Uruk y Ur ^[3].

Con el fin de lograr tan grandes proezas en la construcción, utilizaron piedra, madera y ladrillos, los cuales fueron aglomerados con cal, material que se convirtió en el aglomerante universal y con yeso calcinado el cual se deduce fue utilizado por los egipcios para unir los grandes bloques de piedra.

En América se extendió el uso de la cal como aglomerante, producto de ello, se construyeron grandes obras de ingeniería en los años 300 y 900 D.C, como por ejemplo: Palenque y Chichenitza, durante el siglo XVIII Joseph Aspdin redescubre después de analizar los trabajos de otros investigadores tales como: John Smeaton y Vicat, un aglomerante de características hidráulicas (cemento portland) es decir que en contacto con el agua y después de un fraguado inicial adquiría dureza ^[3].

2.1.3 Datos históricos de producción (énfasis en Ecuador)

En nuestro país, la primera fábrica que se encargó de la elaboración del cemento se creó en la Ciudad de Guayaquil en junio de 1923 y su dueño fue Industrias y Construcciones, para ese entonces, la producción en toneladas por año del cemento era de 3000 y se comercializaba con la marca Cóndor ^[3].

De acuerdo al Instituto Ecuatoriano de la Construcción, en nuestro país la mayor comercialización anual de cemento gris registrado entre los años 2006 y 2016 fue en el año 2013 con total de 6'600.421 toneladas métricas como se observa en la tabla 1.

Tabla 1
Comercialización mensual y anual del cemento gris en toneladas métricas

COMERCIALIZACION MENSUAL Y ANUAL DE CEMENTO GRIS - TONELADAS METRICAS													
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBR E	OCTUBR E	NOVIEMBR E	DICIEMBR E	TOTAL
2006	348260	267712	331856	303996	343993	345066	350554	388884	363590	379919	367757	349423	4141010
2007	362378	313640	358637	318443	349176	348233	377755	404011	382037	436845	405120	390795	4447070
2008	382261	332025	357431	397984	387899	404872	461675	449958	452312	474090	433620	457121	4991248
2009	433498	377309	454029	454029	434096	443789	484561	444122	457155	472813	436111	463208	5354720
2010	398499	356564	452696	393811	404920	444975	452407	482974	472466	492080	455378	480356	5287126
2011	433558	415083	454205	412935	455818	476055	495125	531617	498844	522916	505344	503190	5704690
2012	451300	402054	496079	433777	487767	491993	523633	557315	519920	586426	561535	520556	6032355
2013	537391	447929	499743	545440	553278	523525	584767	579080	565779	611987	594814	556688	6600421
2014	556787	511795	497601	524903	526641	502055	565689	562641	574968	602748	532009	557786	6515623
2015	486503	436287	504682	486432	477111	488777	504435	498845	524126	536875	444586	459579	5848238
2016	377308	363479	399954	389643	418661	403001	434364	484511					3270921

Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción Conforme a Oficio N° MIPRO-SC-2011-0177-SC

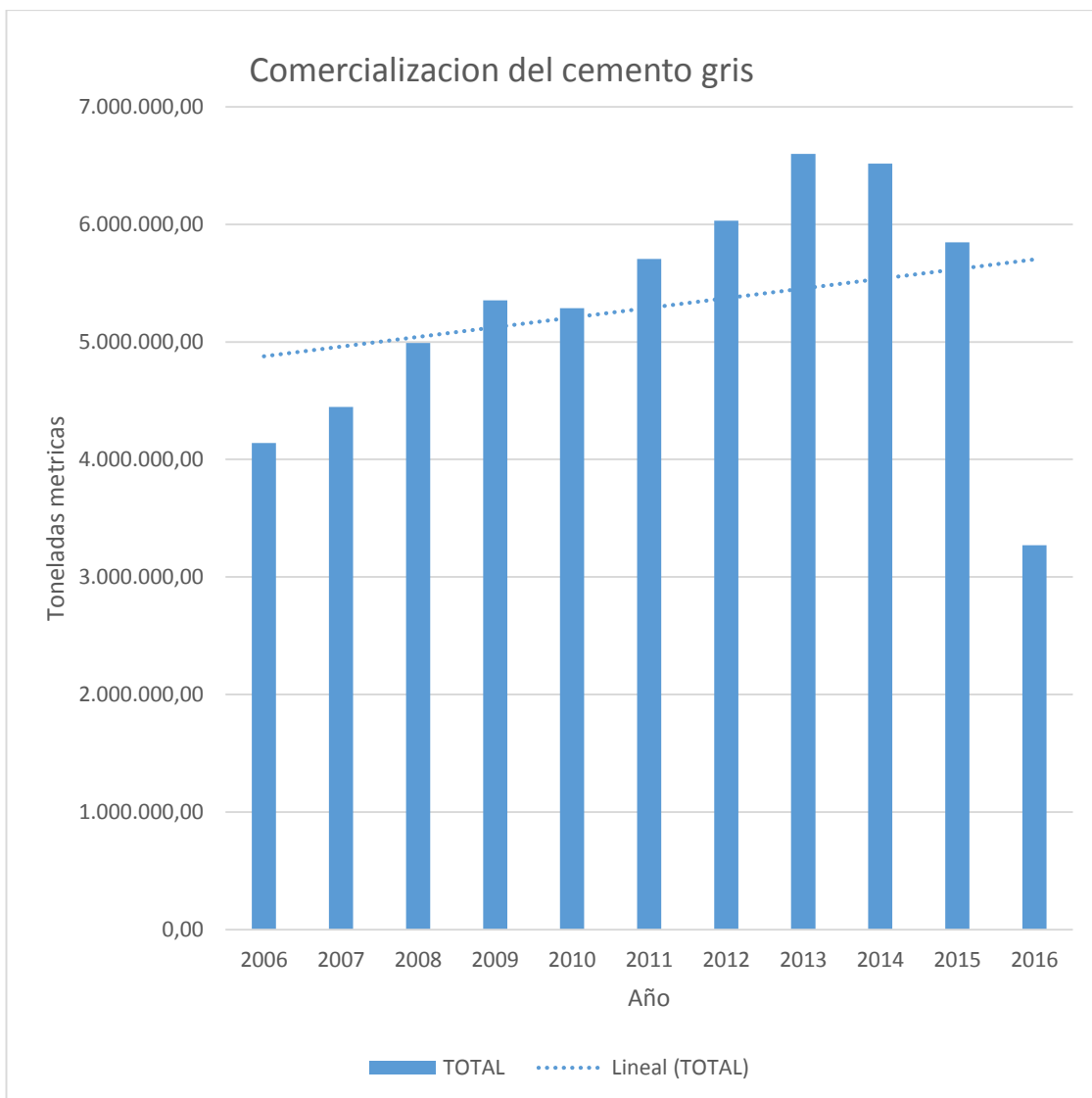


Figura 2 Variación Anual del Consumo del Cemento Gris
 Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción Conforme a Oficio N° MIPRO-SC-2011-0177-SC

En la figura 2 se puede observar gráficamente el constante incremento anual del consumo y comercialización del cemento gris en nuestro país, este suceso es debido a que por ser Ecuador un país en vías de desarrollo, se convierte en un gran consumidor del cemento, promoviendo de esta manera la expansión territorial a través de la construcción, y a su vez generando más fuentes de empleo a lo largo del territorio nacional, sin embargo todo cambio o crecimiento genera en diferentes formas un daño al medio ambiente, es por eso que es inevitable pensar en algunas variantes al cemento que cumplan su función y que generen menor daño ecológico.

Además, el consumo anual de cemento a nivel nacional se ve reflejado en el consumo de las diferentes provincias que conforman las cuatro regiones del Ecuador, Litoral (Costo), Sierra, Amazonia y Región Insular, siendo la región Sierra el mayor consumidor de cemento gris durante los años 2006 y 2012 y liderando esta lista la Provincia de Pichincha, de acuerdo al Instituto Ecuatoriano de la Construcción e Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, ver tabla 2.



Figura 3 Comercialización del cemento gris durante el año 2012
Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción e Instituto Nacional de Estadísticas y Censos Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC

Tabla 2
Comercialización anual de cemento gris por provincias y regiones – Toneladas métricas

Comercialización anual de cemento gris por provincias y regiones - Toneladas métricas								
REGION	PROVINCIA	AÑO						
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
LITORAL	El Oro	186001	209379	229140	236095	226772	257731	307596
	Esmeraldas	85748	92490	126600	145583	189523	150942	167649
	Guayas	1057082	1150138	1175250	1174373	1194422	1279599	1366784
	Los Ríos	116708	128683	162614	171266	175232	217780	185965
	Manabí	252000	300254	360089	407381	436348	446878	408609
	Santa Elena	-	-	70656	69156	80437	86345	97995
	Total	1697539	1880944	2124349	2203854	2302734	2439275	2534598
	Porcentaje de incremento		11%	13%	4%	4%	6%	4%
	Azuay	318543	332517	360407	381090	381849	346463	458694
	Bolívar	23386	25843	30913	36330	33271	40691	36825
	Cañar	126674	129394	127988	120480	105858	110895	105101
	Carchi	22713	28686	39653	49718	46965	58137	63812
	Chimborazo	113606	123862	150921	279418	163343	176271	182389
	Cotopaxi	173582	183495	202563	202697	224173	237282	262385
Imbabura	102747	112948	123339	135803	141754	142364	162668	
Loja	129743	137700	200841	245747	177533	235814	261990	
SIERRA	Pichincha	1109432	1149277	1061983	1030842	1049811	1194581	1179543
	Sto. Domingo de los	-	-	124188	144094	185319	211356	174644
	Tsáchilas							
	Tungurahua	159661	169687	177459	180274	185552	210446	225897
	Total	2280087	2393409	2600255	2806493	2695428	2964300	3113948
Porcentaje de incremento		5%	9%	8%	-4%	10%	5%	
AMAZONICA	Morona Santiago	22875	28709	36235	40412	50491	55087	57146
	Napo	32008	29966	61813	53787	37864	42191	43929
	Orellana	3816	9752	26675	51643	43758	45664	59459
	Pastaza	29135	21045	34921	41304	33233	28024	38154
	Sucumbíos	38966	44290	55710	80225	68205	75401	90513
	Zamora							
	Chinchiipe	22526	24566	28780	24778	39916	36451	35354
	Total	149326	158328	244134	292149	273467	282818	324555
	Porcentaje de incremento		6%	54%	20%	-6%	3%	15%
	Galápagos	14056	13982	16438	16440	15498	14464	16552
INSULAR	Total	14056	13982	16438	16440	15498	14464	16552
	Porcentaje de incremento		-1%	18%	0%	-6%	-7%	14%
TOTAL INDUSTRIA NACIONAL CEMENTO GRIS IMPORTADO (*)		4141008	4446663	4985176	5318936	5287127	5700857	5989653
TOTAL COMERCIALIZACION EN EL PAIS		-	409	74	-	0	-	-
Porcentaje de incremento anual nacional			7%	12%	7%	-1%	8%	5%

Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción e Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC

Tabla 3
 Importaciones de Cemento y Clinker-Toneladas Métricas

IMPORTACIONES DE CEMENTO Y CLINKER - TONELADAS METRICAS						
N° de partida ANDINA		2523300000	2523900000	25232100000		2523100000
DESCRIPCION DE PARTIDA BCE	LOS DEMAS	CEMENTOS ALUMINOSOS	LOS DEMAS CEMENTOS HIDRAULICOS	CEMENTO BLANCO	TOTAL CEMENTO	CEMENTOS SIN PULVERIZAR "CLINKER"
NOMBRE COMERCIAL	PARA POZOS PETROLEROS	ALUMINOSOS	PARA CONSTRUCCIÓN EN GENERAL			CLINKER DE CEMENTO PORTLAND
2000	6262,45	0,03	5700,00	8598,32	20560,80	0,00
2001	11840,05	2,21	21450,00	9310,36	42602,62	3,48
2002	9693,79	0,04	44782,00	9907,74	64383,57	169,01
2003	37387,05	8,76	26884,00	8213,37	72493,18	19,51
2004	4303,91	7,65	8100,00	10126,57	22538,13	8,38
2005	13403,62	15,65	0,00	10214,50	23633,77	14,38
2006	16260,26	8,79	0,02	10996,50	27265,57	117975,41
2007	11738,33	23,00	409,05	11868,33	24038,71	301475,58
2008	8278,11	25,14	73,91	9870,32	18247,48	316981,02
2009	6776,85	17,47	0,04	12048,95	18843,31	449956,37
2010	8285,57	30,65	0,00	13010,85	21327,07	92585,90
2011	15922,75	38,47	0,00	14200,50	30161,72	604951,14
2012	17177,97	30,73	0,02	15980,59	33189,31	657942,97
2013	21768,99	19,89	0,05	14368,90	36157,83	922270,64
2014	16652,28	50,02	705,87	15137,77	32545,94	890415,99
2015 (septiembre)	8216,85	15,73	2460,37	11030,40	21723,35	38700,00

Fuente: Banco Central del Ecuador Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-017

Con el fin de satisfacer la demanda de cemento en los últimos años, el Ecuador se ha visto en la necesidad de importar grandes cantidades de cemento, los cuales son utilizados en la construcción de pozos petroleros, además, la importación de cementos hidráulicos para la construcción de obras civiles en general, cementos blancos y cementos aluminosos, a su vez, entre los datos registrados entre el 2001 y septiembre de 2015, el Ecuador ha importado un total de 4'393.469,78 de toneladas métricas de Clinker, principal componen en la elaboración del cemento portland según las fuentes emitidas por el Banco Central del Ecuador.

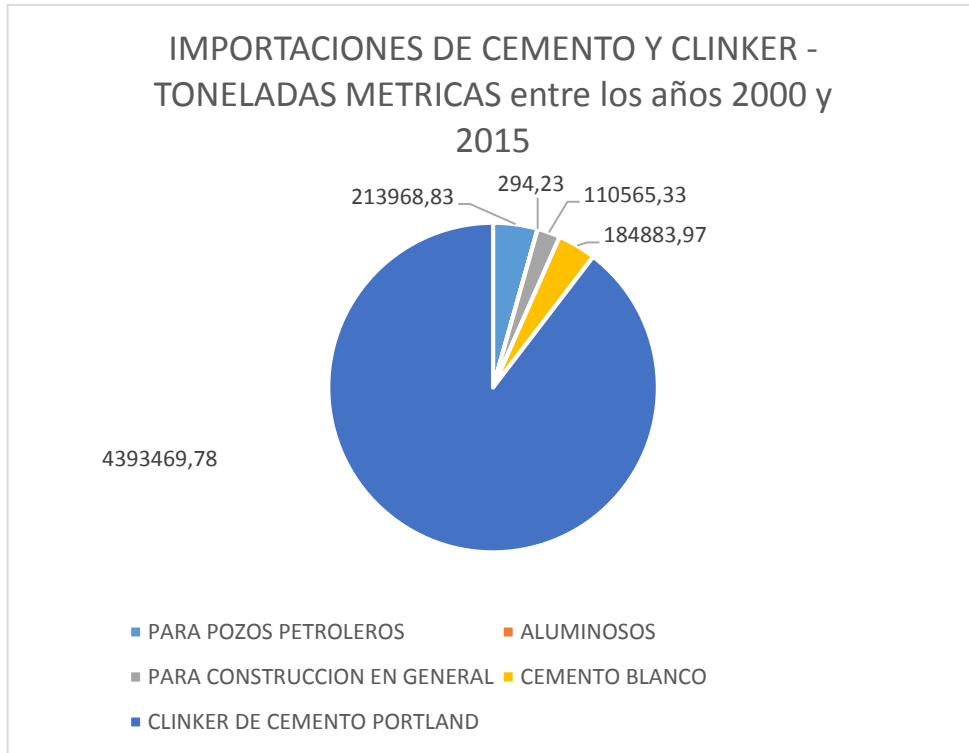


Figura 4 Total de Importaciones de Cemento y Clinker entre los años 200 y 2015
 Fuente: Banco Central del Ecuador Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC

En base a todos los datos planteados se puede estimar un consumo de cemento gris per cápita el cual se detalla a continuación:

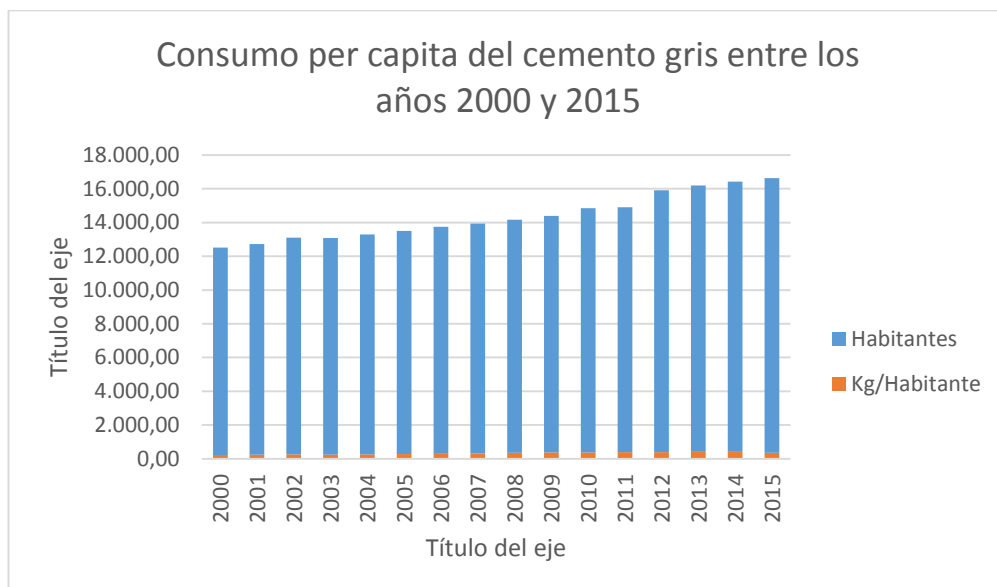


Figura 5 Consumo Per Cápita de Cemento Gris entre los años 2000 y 2015
 Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC

Tabla 4
Consumo de Cemento Gris Per Cápita

CONSUMO DE CEMENTO GRIS PER CAPITA - TONELADAS METRICAS																	
Concepto	Unidad	Año															
		2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Población	Hab.	12299120	12479924	12842578	12842578	13026891	13215089	13408270	13605485	13805095	14005095	14483499	14520973	15520973	15775749	16027466	16278844
Consumo de Cemento	Ton	2750210	3096683	3255463	3183165	3478170	3715500	4141008	4447070	4991249	5319009	5287125	5704687	6032356	6600320	6515624	5960378
Consumo per Cápita	Kg/Hab.	223,61	248,13	253,49	247,86	267,00	281,16	308,84	326,86	361,55	379,79	365,04	392,86	388,66	418,38	406,53	366,14

Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC

De acuerdo con la tabla 5, la empresa Holcim en el Ecuador lidera como el número uno en producción de cementos hidráulicos, razón por la cual entre los años 2000 y 2015 ha tenido una producción total de 47'332,545.00 de toneladas métricas, y posicionase por encima de empresas tales como Lafarge, cementos Guapan, Chimborazo y Atenas, además de colocarse por sobre los cementos importados.

Tabla 5
Comercialización Anual del Cemento Gris por Empresa-Toneladas Métricas

COMERCIALIZACION ANUAL DEL CEMENTO GRIS POR EMPRESA- - TONELADAS METRICAS							
Año	HOLCIM	UNACEM (LAFARGE)	UCE M		IMPORTADO (*)	ATENAS	TOTAL CEMENTO
			GUAPÁN	CHIMBORAZO			
2000	1657790	569288	316794	200638	5700		2750210
2001	1937572	614311	289981	233369	21450		3096683
2002	2033455	627406	302299	247521	44782		3255463
2003	1947597	634070	332028	242586	26884		3183165
2004	2192185	640866	404200	232819	8100		3478170
2005	2422542	665644	392352	234962	0,00		3715500
2006	2754605	731812	424720	229871	0,00		4141008
2007	3019218	788947	410935	227561	409,00		4447070
2008	3336146	954714	416775	283540	74,00		4991249
2009	3480298	1061221	430931	346485	74,00		5319009
2010	3328877	1176458	432966	348824	0,00		5287125
2011	3614755	1313075	430868	345989	0,00		5704687
2012	3915512	1346059	442962	327823	0,00		6032356
2013	4263969	1465164	475963	395224	0,00		6600320
2014	3993611	1452512	1069501		0,00		6515624
2015	3434413	1380785	1033040		0,00	112140	5960378
2016						116052	116052
2017						122256	122256
2018						122856	122856

Fuente: Instituto Ecuatoriano de la construcción Conforme a Oficio N-| MIPRO-SC-2011-0177-SC y Cemento Atenas.

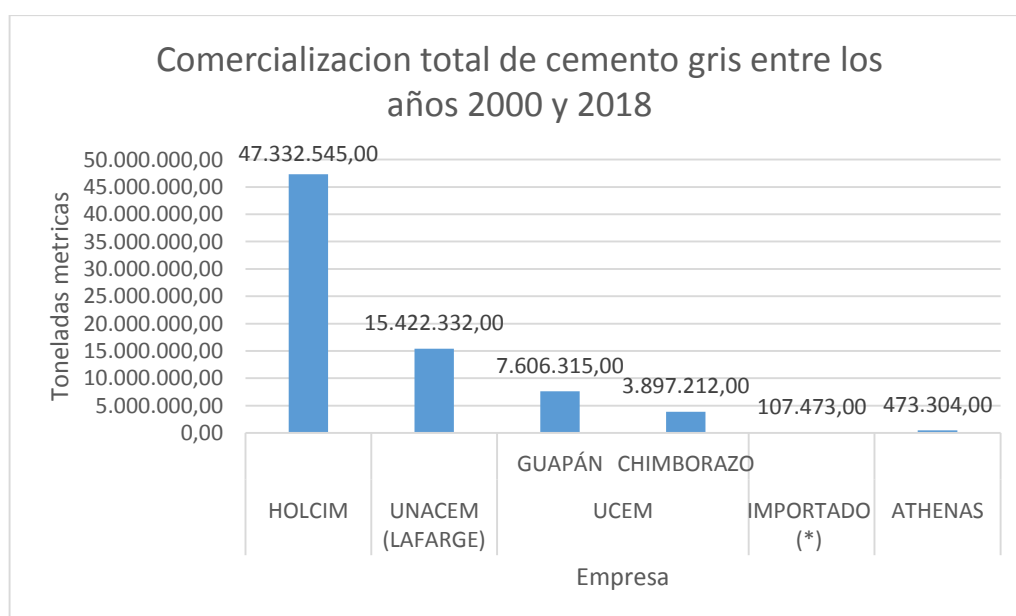


Figura 6 Comercialización Total del Cemento Gris por Empresa entre los años 2000 y 2015

Fuente: Rafael Josué Vallejo Salguero

Desde el año 2015 Cemento Atenas se colocó en el mercado, produciendo un total de 473,304.00 de toneladas métricas, siendo a su vez, una empresa cementera en el Ecuador que en busca de mejorar la producción del cemento garantizando la disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, ha invertido sus esfuerzos en la investigación para la producción del nuevo cemento ternario LC3.

2.1.4 Impactos ambientales de la producción de cemento

Es debido a la fabricación del cemento que actualmente se emiten millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera producto del uso de energía en la molienda del Clinker y la caliza, así también como la calcinación del carbonato de calcio el cual se encuentra en la caliza, produciendo de esta manera una mayor cantidad de gases de invernadero que año a año debilita la capa de ozono.

La cantidad en toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera es variable y depende directamente con la “composición del cemento y la eficiencia en la producción” por lo que se vuelve difícil cuantificar el total producido por tonelada de cemento, sin embargo, se puede estimar que, por cada tonelada de cemento producido, se genera entre 500 y 800 kg de CO₂.

Son quizás las emisiones de CO₂ las causantes para que cementeras a nivel mundial opten por disminuir el contenido de Clinker en sus producciones de cemento y lo reemplacen por escorias “granuladas de alto horno, puzolanas naturales, cenizas volantes, caliza, arcilla calcinada, humo de sílice, entre otros”.

2.2 Puzolanas

2.2.1 Origen y concepto de puzolanas

Las puzolanas formaban parte del cemento de estructuras antiguas en Egipto, Grecia y Roma. También hay evidencia que sugiere que se usó cerámica triturada durante el período minoico temprano (3000-1500 a. C.) para hacer morteros de cal.

El nombre Puzolana proviene de las rocas también llamadas Pulvis Puteolana^[4] producidas por explosiones volcánicas o también llamas Puzzoles, en los alrededores de un pueblo llamado Puzzoli^[4], ubicado cerca del Vesubio, en Italia, de ahí el nombre de Puzolana a los materiales que posean comportamientos similares a los de las cenizas volcánicas.

Cuando se habla de puzolanas se hace referencia a diferentes tipos de materiales silíceos o silicoaluminicos los cuales de manera propia no poseen características cementantes o aglomerantes, sin embargo, gracias a la actividad puzolánica generada al entrar está en contacto con la cal a una temperatura ordinaria y con la presencia controlada del agua, es capaz de formar compuestos insolubles con propiedades cementantes o aglomerantes.

La norma C 595-08 de la American Society for Testing and Materials (ASTM) “Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos” define a las puzolanas como “un material silíceo y aluminio, el cual en sí mismo posee un pequeño o ningún valor cementicio pero que, finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas comunes, para formar compuestos que poseen propiedades cementicias”.

En Europa a las puzolanas se les da la definición citada en el Quinto Congreso Internacional de la Química del Cemento realizado en el año de 1974 el cual indica que “se define como puzolana a aquellos materiales naturales o artificiales, ricos en sílice y aluminio, capaces de reaccionar con cal en presencia de agua y formar por esta reacción compuestos con propiedades cementicias”.

2.2.2 Tipos de puzolanas empleadas

Para clasificar a las puzolanas, se considera la clasificación descrita por Robert L Day en septiembre de 1990 del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Calgary Canadá, el cual menciona que “El desarrollo de sistemas de clasificación para las puzolanas es un precursor del desarrollo de indicadores de reactividad y la determinación de la idoneidad de las puzolanas para diversas aplicaciones” por lo que “estos sistemas se pueden dividir en

dos categorías: (1) sistemas basados en la química y mineralogía del material, y (2) sistemas basados en la reactividad o características del rendimiento de la puzolana” [4]. Además, Day realiza una tercera clasificación basada en la economía de la producción.

1. Sistemas basados en la química y mineralogía del material: éste sistema de clasificación es el más común y por ende el más utilizado hoy en día a nivel mundial y consiste en dividir a las puzolanas en dos clases o tipos (puzolanas naturales y puzolanas artificiales), en adición a lo referido por Robert L. Day, la Master en Ciencias y con Especialidad en Química Analítica, Luz María Gutiérrez de la Universidad Autónoma de Nueva León de Monterrey México explica que “debido a la naturaleza y tratamiento del material puzolánico, creemos conveniente dividir a estos materiales en puzolanas naturales, semi artificiales y artificiales” [5], por consiguiente la división de las puzolanas dentro de esta categoría incluye a las puzolanas naturales semi artificiales.

- Las puzolanas naturales son aquellos materiales que no han sufrido alteraciones en su estructura química y mineralógica. Entre las puzolanas naturales se puede encontrar a la toba, las cenizas volcánicas, la pumicita riolítica, la diatomita el gaize y el tripoli.
- Las puzolanas artificiales son todos aquellos materiales producidos por diferentes procesos en los que sufrieron alteraciones en su estructura química y mineralógica y las cuales no se las puede encontrar con mucha facilidad tanto en cantidad como en calidad adecuados, dentro de las puzolanas artificiales se encuentran: cenizas volantes de las termoeléctricas, escorias de alto horno y vapores condensados de sílice que se obtienen como subproductos de la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico en la fabricación de aleación de hierro y silicio.

- Las puzolanas semi artificiales son todos los materiales a los cuales les es requerido pasar por un proceso térmico durante el cual llegan a tener cambios sustanciales en su estructura, sin embargo, no llegan a sufrir perturbación o cambio en su composición química, dentro de las puzolanas semi artificiales se encuentra a las arcillas, caolines, entre otros.

2. Sistemas basados en la reactividad o características del rendimiento de la puzolana: este sistema de clasificación podría ser más complejo que el anterior, ya que, por su alcance, este sistema requiere una amplia base de datos. En 1969 la Oficina de Minas de los Estados Unidos realizo un análisis a 530 muestras de puzolanas naturales americanas, Day menciona que “Se realizaron métodos de examen petrográfico y de prueba física ASTM y cada puzolana se colocó en una clase dependiendo de la respuesta física”.

Además, es necesario indicar que en los escritos de Day, se pudo analizar que “el rendimiento general se basa en los resultados de 4 pruebas: fuerza (actividad puzolánica), manejabilidad (requerimiento de agua), capacidad de servicio (contracción), y durabilidad (ataque álcali-agregado)”.

Es preciso indicar que, dentro de las 4 pruebas antes descritas, la ASTM cuenta con una clasificación para la actividad puzolánica:

Tabla 6
Clasificación de la Actividad Puzolanica según ATSM

ACTIVIDAD	FUERZA (MPA)
Pobre o inactiva	<2,6
Intermedia	2,6 – 5,6
Activa	>7

Fuente: Puzolanas en el uso de viviendas de bajo costo

Una vez analizado el sistema basado en la química y mineralogía del material y el sistema basado en la reactividad o características del rendimiento de la puzolana, se indica que el segundo sistema es eventualmente el más idóneo ya que es a través de ensayos y métodos científicos que se puede clasificar a las puzolanas [4].

A continuación, se detalla la tabla 7 en la que se describe el sistema de clasificación de desempeño:

Tabla 7
Clasificación por Rendimiento

CLASE	INDICE DE ACTIVIDAD PUZOLANICA CON OPC (%)	REQUERIMIENTO DE AGUA (%)	CONTRACCION POR SECADO (%)	AAR, MEJORA CON RESPECTO AL CONTROL (%)
1	>80	<112	<0.03	>75
2	75-80	112-115	0,03-0,037	65-75
3	70-75	115-118	0,037-0,045	55-65
4	<70	>118	>0,045	<55

Fuente: Puzolanas en el uso de viviendas de bajo costo

1. Clasificación basada en la economía de la producción: Al estar en un país sub desarrollado, los investigadores, políticos, profesionales, entre otros, no cuentan con un verdadero interés para saber y conocer si una puzolana es natural, artificial o semi artificial, o entre un grupo de puzolanas, cual es la que ante un proceso térmico es más reactiva que otra, ni mucho menos se han dedicado a investigar cual es origen geológico o mineralógico de cierta puzolana, todo esto con el fin de reducir los costos en la producción del cemento, disminuir la cantidad de CO2 expulsado a la atmósfera y garantizar resistencia y durabilidad en las estructuras en las que se utiliza el cemento como material [4].

Lo que realmente se requiere hoy en día en la fabricación del cemento son dos cosas, la primera es que la puzolana que se utilice en la fabricación del cemento cumpla con los estándares nacionales e

internaciones, y la segunda es que la puzolana elegida, garantice una reducción general del costo la producción en masa del cemento con respecto a otros cementos (cemento portland).

2.2.3 Uso de puzolanas como adición mineral

En la actualidad diferentes empresas de cemento producen cementos con adiciones minerales utilizando la puzolana como el principal sustituto del Clinker, esto ayuda a reducir la emisión de CO₂, y mejorar el comportamiento físico mecánico de las estructuras de hormigón, tal como se indicó anteriormente.

Con el fin de obtener una puzolana adecuada para la elaboración de cementos, es necesario que ésta posea una finura adecuada que garantice una mejoría en las cualidades de los hormigones que se producen con este cemento.

En hormigones de alta y ultra- altas prestaciones, el fin primario es optimizar la distribución de tamaño de partículas, especialmente las finas. El uso de plastificantes de alto poder dispersante permiten obtener mezclas con baja relación agua- aglomerante. El hormigón resultante tiene una alta resistencia, alta compacidad y por ende baja porosidad. En muchas de estas mezclas, sin embargo, la sustitución de cemento Pórtland es menos del 15% según (Malhotra y Mehta, 1996; Zhang et a.l., 1996; Aitcin, 2000) [6].

En base a los estudios realizados en la Empresa Cementos Atenas, en conjunto con los estudiantes Félix Castillo y Ronny Reyes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, se comprueba que la reacción puzolánica es considerablemente mayor después de los 7 días, reafirmando de esta manera lo publicado en “Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario” en donde se indica que: “La reacción puzolánica en muchas puzolanas es significativa después de los 7 días, cuando la mayoría de los productos de reacción del cemento ya se han formado y la concentración alcalina es considerable para romper los enlaces y facilitar la formación de productos de reacción del cemento. En muchos casos y dependiendo de la

reactividad de la puzolana, muchas de las reacciones finalizan en los primeros 60 días, citado por Shannang y Yeginobali, 1995; Jamal, 1995; Malhotra y Mehta, 1996” [6].

2.2.4 Caracterización de la reactividad de puzolanas

Con el fin de determinar la reactividad de las puzolanas, es necesario indicar que muchos autores centran sus pesquisas en la composición química, específicamente en los contenidos en SiO_2 y Al_2O_3 , pero hoy día es bien conocida la existencia de otros factores, como el nivel de molienda y la regularidad geométrica de las partículas, determinantes para que se produzcan las típicas reacciones físicas superficiales y las reacciones químicas en la interface sólido-líquido, además, es importante conocer que la reactividad de las puzolanas está ligada directamente “al grado de finura $<63 \mu$ [7].

De acuerdo a la actividad puzolánica se debe tener en cuenta tres cosas: los constituyentes químicos, el tipo de unión o enlace entre ellos y su estado físico[8].

Al referirse a los constituyentes químicos, es necesario indicar que los más importantes dentro de esta clasificación son la sílice y la alúmina, sin embargo, debido a su composición, se vuelven vulnerables frente a la cal cuando sus uniones son débiles e inestables en el material original, este suceso ocurre de igual forma en los materiales arcillosos, que en su deshidratación total por el calor relajan o incluso rompen las uniones entre la sílice y la alúmina, por otro lado, con respecto al estado físico, se puede decir que aquellos materiales zeolíticos ubicados en las tobas volcánicas debido a su estructura se atacan más rápidamente por la cal que las puzolanas vítreas, lo que le permite a la sílice y a la alúmina combinar con la cal y formar compuestos conglomerantes [8].

2.3 Arcillas Calcinadas

De acuerdo con las investigaciones relacionadas con el sucesor del Clinker por un material puzolánico cuyas características sean similares o mejores, una posible fuente son las arcillas calcinadas y su uso radica en la disponibilidad

de materiales y mejoramiento de la durabilidad del concreto ^[9], razón por la cual, los esfuerzos se han centrado en las arcillas y su calcinación a temperaturas adecuadas en las cuales se garantice una completa reactividad, además, el uso de las arcillas calcinadas permitirán a las empresas fabricantes de cementos, disminuir sus emisiones de CO₂ a la atmósfera, ya que se requerirá menor gasto energético en su producción.

2.3.1 Geología y mineralogía de las arcillas calcinadas

La disponibilidad de las arcillas a lo largo de la corteza de la tierra es amplia, sin embargo, no todas las arcillas que se encuentran disponibles son las más idóneas para convertirse en materiales puzolánicos, sino únicamente aquellas arcillas que contengan un alto contenido de sílice y alúmina, es decir, arcillas caolinitas o también llamadas caolín.

Las propiedades de las arcillas varían considerablemente y son altamente dependientes de su composición y estructura mineral. La principal característica que determina la utilidad del caolín para numerosas aplicaciones es la pureza mineralógica; teniendo en cuenta la presencia de impurezas como el cuarzo, anatasa, rutilo, pirita, siderita, feldespatos, entre otras (Mitrović y Zdujić, 2014) ^[9].

A continuación, se describen algunas de las técnicas más comúnmente utilizadas para la caracterización de las arcillas: granulometría laser, área superficial específica – BET, análisis termo gravimétrico (ATG), análisis térmico diferencial (ATD), microscopía electrónica e barrido (MEB), espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y difracción de rayos X (DRX) ^[9].

2.3.2 Activación térmica de arcillas de origen caoliníticas.

Es debido a un proceso térmico de calcinación por el cual las arcillas caoliníticas pasan, que se logra la reactividad de éstas, llegando a tener excelentes propiedades puzolánicas debido fundamentalmente a su composición química, estructura amorfa y alta superficie específica, esto se logra únicamente cuando las arcillas alcanzan una reactividad alta provocada

por la deshidroxilación del material lo que conlleva a que la estructura de la arcilla se encuentre desordenada y colapsada, La temperatura óptima de activación parece depender de la pureza del material y sus minerales acompañantes. Algunos autores han revisado ampliamente este parámetro en estudios anteriores, resumiendo que la temperatura de activación óptima para el caso del caolín se encuentra en el rango de 630-800 °C (Fernández, 2009; Sabir et al., 2001) ^[10].

Durante el proceso de calcinación, es necesario tener mucho cuidado de no someter a la arcilla a temperaturas superiores a los 800 °C ya que se corre el riesgo de que las arcillas se recristalicen, ocasionando de esta manera una pérdida o disminución considerable en su reactividad.

2.3.3 Utilización de arcillas calcinadas como adición puzolánica.

Es conocido que el uso de puzolanas es el único medio fácil y viable y con más amplias perspectivas para reducir el costo de la fabricación del cemento y con ellos las emisiones de CO₂ a la atmósfera porque esta solución incide sobre el capítulo más costoso de la producción del cemento: el horno ^[11], es así que las arcillas calcinadas se convierten en un gran potencial para formar parte del cemento como adición puzolánica.

En el presente estudio se analizarán los resultados obtenidos durante los ensayos realizados con respecto a la eficiencia del cemento con adición de arcillas calcinadas como material puzolánico en la elaboración de hormigones de altas prestaciones.

2.3.4 Sinergia entre arcillas calcinadas y calizas. El cemento ternario LC3.

El cemento ternario LC3 por sus siglas en inglés (Limestone Calcined Clay Cement) que significa cemento con arcilla calcinada más caliza representa hoy en día un avance tecnológico en el ámbito de la construcción, ya que, debido a sus características y su composición, el cemento LC3 permite alcanzar altas resistencias en hormigones elaborados en base a este cemento.

La calcinación de la arcilla y la caliza forman lo que se conoce como Clinker, el cual es el principal componente del cemento y a su vez el elemento más contaminante en las composiciones comunes, es por ello que con el fin de reducir los volúmenes de producción del Clinker es necesario que exista una correcta sinergia entre las arcillas calcinadas y la caliza, sinergia que se alcanza a través de la adecuada calcinación de la arcilla y la correcta molienda de la arcilla calcinada más la caliza hasta que éstas alcancen la granulometría deseada.

2.4 Cementos Mezclados

2.4.1 Hidratación de cementos portland con adiciones minerales puzolánicas

La utilización de adiciones minerales puzolánicas puede obedecer aislada o conjuntamente a tres razones principales de diverso orden:

Tecnológico, económico y ecológico.

- “De orden tecnológico, por cuanto que los cementos con adiciones - hablando en general- carecen de algunas de las insuficiencias o deficiencias de los cementos portland ordinarios en determinados aspectos, aportando en cambio otras ventajas y siendo por ello más recomendables que los propios cementos portland para multitud de usos específicos bien definidos (por ejemplo, los cementos puzolánicos en presas y los siderúrgicos en obras marítimas).
- De orden ecológico, ya que la utilización de escorias siderúrgicas y de cenizas volantes de centrales termoeléctricas supone la supresión o reducción de las correspondientes escombreras.
- Y de orden económico, puesto que dicha utilización, por una parte, aprovecha subproductos desechados que aún contienen masa y energía potencial recuperables y de menor costo; y, por otra parte, por cuanto que ahorra materias primas y energía térmica para la fabricación del Clinker, habida cuenta de la cada vez menor disponibilidad de aquellas -al menos de las consideradas hasta ahora

como más idóneas y explotables-, y del costo energético cada vez mayor”^[11].

Se puede indicar que las adiciones minerales puzolánicas más estudiadas y utilizadas son: la ceniza volante, escorias de alto horno y humo de sílice.

2.4.1.1 Ceniza Volante

Las cenizas volantes también conocidas en inglés como (fly-ash)^[11], son aquellas sustancias residuales de la combustión del carbón en las centrales térmicas, también son aquellas que se producen en aquellos hogares que tienen calderas^[12].

En la industria cementera el uso de las cenizas volantes se le atribuye una finalidad económica de doble variante que es: ahorro de clínker lo que genera directamente un ahorro significativo de energía para la producción del mismo, y de las materias primas en la elaboración del cemento^[11].

2.4.1.2 Escorias de alto horno

Las escorias de alto horno o simplemente escorias se producen generalmente en la producción siderúrgica en el que aparece el arrabio o fundición como producto base, y como consecuencia -de la reacción entre la mena y la ganga del mineral -sobre todo esta última-, el coque y la caliza más o menos dolomítica utilizada como fundente y corrector, en el horno alto^[11] de ahí su nombre.

Con el fin de utilizar las escorias de alto horno en la elaboración de cementos, se ha logrado caracterizarlas, conociendo de esta manera que poseen una serie de compuestos deseables tales como: silico aluminatos y cálcicos magnésicos^[11].

2.4.1.3 Humo de sílice

De acuerdo con la definición dada por el ACI 116 terminología del cemento y el hormigón, el humo de sílice son partículas “muy finas producidas en los hornos de arco eléctrico como sub producto de la producción de silicio

elemental o aleaciones que contienen silicio; también se conoce como vapores de sílice condensados y micro sílice”.

2.4.2 Impacto de la molienda de cementos. Distribución de tamaño de partículas vs Reología vs propiedades mecánicas

2.4.2.1 Efecto de los intensificadores de molienda

Los intensificadores de molienda o aditivos para la molienda, se han convertido en una variante necesaria en la producción del cemento, ya que, gracias a sus propiedades en la reducción de cargas electrostáticas de las partículas de cemento, cuerpos moledores y revestimiento, permiten obtener una mayor eficacia en los procesos de fabricación del cemento, al minimizar los fenómenos de aglomeración de las partículas ^[13].

A fin de utilizar intensificadores de molienda en la producción del cemento, se debe considerar la normativa que lo rige la cual se encuentra en la EN 197-1, la ASTM C-465-96, entre otras, por otro lado, el porcentaje de intensificador de molienda está en el orden del 1% con respecto al peso del cemento, sin embargo, la cantidad utilizada comúnmente es menor.

La eficiencia de la mayoría de las unidades de molienda es muy baja. Las partículas de cemento pueden recubrir el medio de molienda, sellar el blindaje y aglomerarse y formar pequeñas placas que absorben el impacto. La acción de los medios de molienda dentro de un molino giratorio no solo aplasta las partículas de Clinker existentes, sino que también las comprime bruscamente, un hecho que conduce a la formación de cargas en la superficie electrostática de polaridad opuesta ^[14].

2.4.2.2 Molienda separada vs intermolienda

Con el fin de determinar diferencias entre la molienda separada e intermolienda, se debe entender el proceso de cada una de ellas:

Molienda separada. - es el proceso por el cual se muele, por una parte, la arcilla calcinada, el yeso y la caliza (obteniendo de esta manera lo que se conoce como LC2) y por otra parte el OPC, hasta que ambos alcancen la granulometría establecida en la norma.

Intermolienda. - es el proceso por el cual se muele la arcilla calcinada, el yeso, la caliza y el Clinker (obteniendo de esta manera lo que se conoce como LC3), esta molienda se la realiza hasta que el cemento alcance la granulometría establecida en la norma.

Más adelante en el presente estudio se realizará una correlación entre ambas moliendas.

2.5 Hormigón (Concreto)

De acuerdo con el ACI 318-14, se define al concreto como una mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivo.

2.5.1 Generalidades

2.5.1.1 El hormigón y el desarrollo de la sociedad moderna

Si bien es cierto, el hormigón produce grandes cantidades de CO₂, se ha convertido en un material mundialmente utilizado para la edificación de diferentes tipos de obras ingenieriles, lo que ha permitido a las sociedades un pronto desarrollo, ya sea económico, político e incluso militar, este hecho se evidencia a principios de siglo XX, tiempo en el cual algunos ingenieros realizaron investigaciones, en las cuales atravesaban barras de acero dulce trefilado en el hormigón, dando inicio a lo conocemos como hormigón armado, a mediados del siglo XX hasta el tiempo actual, la investigación en los diferentes ámbitos de utilización del hormigón armado, especialmente obra civil y arquitectura, ha avanzado a una velocidad realmente espectacular y vertiginosa, de hecho, se han producido importantes descubrimientos en el ámbito de la potenciación de determinadas características del material con la aparición de aditivos, y también se han conseguido con estos elementos puestas en obra del material en condiciones cada vez más extremas ^[15].

2.5.1.2 Impacto ambiental de la producción y uso del hormigón

La producción de 1 tonelada de cemento portland requiere aproximadamente 4 GJ de energía, y su fabricación libera aproximadamente

1 tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera. Las grandes cantidades de extracción de materias primas tales como caliza y arcilla, y el combustible como el carbón, a menudo resultan en una deforestación extensiva y pérdida de suelo superficial. El hormigón común contiene aproximadamente un 12% de cemento y 80% de agregados en masa, esto significa que globalmente, para hacer el hormigón, se están consumiendo arena, grava, y roca triturada a una velocidad de 10 a 11 billones de toneladas por año. Las operaciones de extracción, procesado, y transporte que involucran tales cantidades de agregados consumen a su vez, cantidades considerables de energía, y afectan adversamente la ecología en las áreas forestadas y lechos de los ríos. La industria del hormigón también emplea grandes cantidades de agua: el requerimiento de agua de mezclado solamente es de aproximadamente 1 trillón de litros, cada año. No hay estimaciones confiables, pero grandes cantidades de agua se usan como agua de lavado en la industria del hormigón elaborado y para el curado del hormigón ^[16].

Con el fin de reducir el impacto al medio ambiente por motivos de la producción en masa del hormigón, es necesario buscar maneras por las cuales los componentes del hormigón sean parcial o totalmente reemplazados por materiales menos contaminantes y de características similares.

2.5.2 El hormigón como material de construcción

2.5.2.1 Áridos

El material granular constituye el mayor volumen en la mezcla para la preparación de un hormigón. Sus propiedades físicas y mecánicas juegan un papel muy importante en las del hormigón. Puede provenir de la trituración de mantos de roca natural o de cantos rodados, de la selección de fragmentos naturales de roca, prismáticos o redondeados; o de materiales artificialmente fabricados. Debe estar constituido de partículas sanas, limpias, resistentes, libres de defectos ocultos, de adherencias como limo, arcilla, grasas, aceites y libre de materia orgánica.

El material granular debe estar compuesto, como mínimo, de dos porciones de tamaños diferentes; el árido grueso, cuyas partículas son, por lo

general, más grandes que 4.75 mm de diámetro nominal y el árido fino, cuyo tamaño de partículas está entre 75 μm y 4.75 mm. Estos a su vez, se pueden separar en dos o tres tamaños diferentes. El ACI318-14 establece que el tamaño nominal de las partículas más grandes del árido grueso no debe ser mayor que:

- 1/5 de la menor dimensión de la sección transversal del elemento a construir.
- 1/3 del espesor de la losa.
- 3/4 del espaciamiento libre entre varillas o paquetes de varillas de acero de refuerzo, cables de pretensado o ductos embebidos.
- El recubrimiento de las varillas de acero de refuerzo.

Las partículas del árido grueso serán de formas cúbicas, evitando las formas alargadas y laminares. Los cantos rodados serán de formas esféricas, evitando las partículas planas. El árido fino más adecuado es la arena natural de granos redondos, pero se puede emplear el polvo de piedra, producto de la trituración de las rocas, siempre que no tengan exceso de finos o partículas alargadas y laminares. Los áridos para hormigón, al igual que el cemento, serán investigados y ensayados por laboratorios acreditados por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano (OAE). Las normas y ensayos básicos que se deben realizar para determinar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del material son:

- NTE INEN 695 (ASTM D75): Áridos. Muestreo.
- NTE INEN 696 (ASTM C136): Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- NTE INEN 697 (ASTM C117): Determinación del material fino que pasa el tamiz con aberturas de 75 μm «micrómetros» (No. 200) mediante lavado.
- NTE INEN 698 (ASTM C142): Determinación del contenido de terrones de arcilla y partículas desmenuzables.
- NTE INEN 699 (ASTM C 123): Determinación de partículas livianas.
- NTE INEN 855 (ASTM C40): Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón.

- NTE INEN 856 (ASTM C128): Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
- NTE INEN 857 (ASTM C127): Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
- NTE INEN 859 (ASTM C70): Determinación de la humedad superficial en el árido fino.
- NTE INEN 862 (ASTM C566): Determinación del contenido total de humedad.
- NTE INEN 860 (ASTM C131): Determinación del valor de la degradación del árido grueso con partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles. Para un hormigón de densidad normal, el valor de la degradación del árido grueso según este ensayo, no debe superar el 50 %. Si el material es una combinación de áridos de diferente origen, todos y cada uno de ellos, debe cumplir con esta exigencia.
- NTE INEN 867 (ASTM C 227): Determinación de la reactividad alcalina potencial árido – cemento (método de la barra de mortero).
- NTE INEN 872(ASTM C 33): Áridos para hormigón. Requisitos.
- NTE INEN 2 566 (ASTM C702): Reducción de muestras a tamaño de ensayo.
- NTE INEN 863 (ASTM C88): Determinación de la solidez de los áridos mediante el uso de sulfato de sodio o de sulfato de magnesio. La aplicación de esta norma se encuentra clarificada en Tabla 3 - NTE INEN 872 (ASTM C33).

2.5.2.2 Aglomerante

Los materiales cementantes deben cumplir con las siguientes especificaciones descritas en el ACI318-14:

- Cemento portland de los tipos I a V, incluyendo los subtipos IA, IIA y IIIA, ASTM C150.
- Cementos hidráulicos adicionados tipo IP ASTM C595, se excluyen los Tipos IS (≥ 70) y Tipo IT ($S \geq 70$)
- Cemento hidráulico expansivo ASTM C845

- Cemento hidráulico de acuerdo a requisitos de desempeño ASTM C1157
- Ceniza volante y puzolana natural ASTM C618
- Cemento de escoria ASTM C989
- Humo de sílice ASTM C1240

Además, todos los materiales cementantes especificados anteriormente y las combinaciones de estos materiales deben estar incluidos en los cálculos de la relación a/mc de la mezcla de concreto.

2.5.2.3 Aditivos y adiciones

Los aditivos deben cumplir con las siguientes especificaciones descritas en el ACI318-14:

- Aditivos para reducción de agua y modificación del tiempo de fraguado: ASTM C494
- Aditivos para producir concreto fluido: ASTM C1017
- Aditivos incorporadores de aire: ASTM C260
- Aditivos inhibidores de la corrosión inducida por el ión cloruro: ASTM C1582

Los aditivos que no cumplen con las especificaciones descritas anteriormente deben someterse a la aprobación del profesional facultado para diseñar.

El cloruro de calcio o los aditivos que contengan cloruros que no provengan de impurezas de los componentes del aditivo, no deben emplearse en concreto pre esforzado, en concreto que contenga aluminio embebido o en concreto construido en encofrados permanentes de acero galvanizado.

Los aditivos usados en el concreto que contengan cemento expansivo que cumpla con la norma ASTM C845 deben ser compatibles con el cemento y no producir efectos nocivos.

El uso de aditivos superplastificantes genera un incremento en las propiedades de las mezclas ensayadas y reducen la relación agua/cemento de tal manera que la mezcla de mortero u hormigón, se vuelve mucho más trabajable, lo cual permite su fácil vaciado en las estructuras y ayuda en el incremento de la resistencia de las estructuras hormigón.

Las especificaciones con respecto a su aplicación y porcentaje de superplastificante necesario, serán establecidas por cada fabricante.

2.5.2.4 Agua

El agua debe cumplir con las especificaciones descritas en NEC 11-Capítulo 1 Cargas y Materiales:

- El agua empleada en la mezcla debe estar libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos u otras sustancias que puedan ser nocivas al hormigón o al acero de refuerzo.
- El agua potable y casi cualquier agua natural que se pueda beber y que no tenga sabor u olor marcado, se pueden utilizar en la elaboración del hormigón.
- El agua empleada en el mezclado de hormigón, debe cumplir con las disposiciones de la norma ASTM C 1602.
- No serán utilizadas en la preparación de un hormigón, aguas servidas, aguas de desechos industriales, aguas blandas o de deshielo de montañas, aguas con elevadas concentraciones de sólidos disueltos o en suspensión. No se debe utilizar agua salada o de mar.
- Las sales u otras sustancias nocivas que provengan de los áridos o de los aditivos, serán contabilizadas en la cantidad que pueda contener el agua de mezclado. Las impurezas excesivas en el agua de mezclado, pueden afectar no solo el tiempo de fraguado, la resistencia del hormigón y la estabilidad volumétrica (variación dimensional), sino que pueden provocar corrosión del acero de refuerzo y eflorescencias.
- El agua utilizada para la mezcla, incluso el agua libre de los áridos, no debe contener cantidades perjudiciales de iones de cloruros.

- El agua utilizada para el curado del hormigón, estará libre de cantidades perjudiciales de ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos u otras sustancias que son nocivas para el hormigón durante el fraguado o después del mismo.

2.5.2.5 Dosificación del concreto

De acuerdo con el ACI318-14 numeral 26.4.3.1, la dosificación de las mezclas de concreto debe establecerse para que el concreto logre:

- Ser colocado fácilmente sin segregación dentro del encofrado y alrededor del refuerzo bajo las condiciones de colocación que vayan a emplearse.
- Resistencia mínima especificada a la compresión del concreto f'_c .
- Edad de ensayo para demostrar el cumplimiento con f'_c en caso de ser diferente a los 28 días.
- El tamaño máximo nominal del agregado grueso no debe exceder al menor de (I), (II), y (III): (I) 1/5 de la menor separación entre los lados del encofrado; (II) 1/3 del espesor de las losas; (III) 3/4 del espaciamiento mínimo libre especificado entre las barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, refuerzo pre esforzado, tendones individuales, paquetes de tendones, o ductos. Estas limitaciones se pueden omitir si a juicio del profesional facultado para diseñar, la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el concreto se puede colocar sin la formación de hormigueros o vacíos.
- Conformidad con los requisitos del ensayo de resistencia para probetas con curado estándar.

La dosificación de la mezcla de concreto debe establecerse de acuerdo con el Artículo 4.2.3 del ACI 301 o por medio de un método alternativo aprobado por el profesional facultado para diseñar. Los métodos alternativos se basan en la probabilidad de cumplir con los requisitos de resistencia de los ensayos de aceptación de las probetas con curado estándar que cumplen o exceden la probabilidad asociada con el método del Artículo 4.2.3 del ACI 301. Cuando se usa el Artículo 4.2.3 del ACI 301, el registro de los ensayos de

resistencia usados para establecer y documentar las dosificaciones de las mezclas de concreto no debe tener más de 24 meses de edad.

Los materiales del concreto empleado en el proyecto deben corresponder a los que se ha tomado como base para desarrollar la dosificación de la mezcla de concreto.

Cuando se empleen diferentes mezclas de concreto para distintas partes del proyecto, cada una de las mezclas debe cumplir con los requisitos establecidos en los documentos de construcción.

Para el diseño de las mezclas de concreto se aplicarán todas las normas y requisitos descritos en el ACI318-14.

2.6 El uso de adiciones minerales en la producción de hormigones

2.6.1 Concepto de adición mineral

Se entiende por adiciones minerales a aquellos materiales que al combinarse con el cemento tienen propiedades cementantes para ser utilizados en el concreto.

2.6.2 Criterios para la adición en obra

De acuerdo a lo que establece la norma ACI318-14, la cantidad máxima de puzolanas, incluida la ceniza volante, humo de sílice y escoria en el concreto no debe exceder los límites establecidos a continuación:

- Los límites de los porcentajes deben incluir la ceniza volante y otras puzolanas, escoria y humo de sílice usados en la fabricación de los cementos adicionados, según las normas ASTM C595 y C1157.
- Se deben aplicar los límites individuales independientemente de la cantidad de materiales cementantes presentes en una mezcla de concreto.

Tabla 8
Límites para los Materiales Cementantes en concretos asignados a la Clase de Exposición F3

Materiales Cementantes	Porcentaje máximo sobre el total de materiales cementantes en masa
Cenizas volantes u otras puzolanas que cumplen con ASTM C618	25 %
Cemento de escoria que cumple con ASTM C989	50 %
Humo de sílice que cumple con ASTM C1240	10 %
Total de cenizas volantes u otras puzolanas, escoria y humo de sílice	35 %
Total de cenizas volantes u otras puzolanas y humo de sílice	50 %

Fuente: ACI 318-14

2.6.3 Experiencia con adiciones minerales

2.6.3.1 Ceniza Volante

Los efectos de las cenizas volantes en el hormigón han sido estudiados en numerosas investigaciones, sea como reemplazo de parte del cemento portland, sea simplemente como adición en el hormigón. En el primer caso, que es mayoritario en estudios, se ha comprobado que cuando se emplean las cenizas volantes en porcentaje de 10 a 30 % de reemplazo, el agua necesaria para mezclado por unidad de volumen del hormigón generalmente no aumenta y a veces puede ser reducida; que la resistencia en las primeras edades, hasta los 28 días disminuye, pero en edades posteriores puede ser

igual o mayor que el hormigón normal; que los cambios de volumen no son significativamente afectados; que se reducen el calor de hidratación y la permeabilidad; que aumenta la cantidad de aditivo necesario para una determinada incorporación de aire; y finalmente, que la reducción de la expansión dañina provocada por la reacción álcali-árido es menos reducida que cuando se emplean otras puzolanas. En el segundo caso, cuando las cenizas volantes se emplean como adición en el hormigón, se ha comprobado que, en cantidades de 15 a 30 % en peso de la arena de hormigones pobres, se mejora notablemente la trabajabilidad y se obtienen mayores resistencias a todas las edades. Obviamente las cenizas volantes contribuyen a suplir con eficacia la carencia de finos de un hormigón pobre [12].

2.6.3.2 Escorias de alto horno

Dentro del contexto económico, energético y ambiental, las escorias de alto horno se convierten en un material interesante como reemplazo parcial o total del CPO (Cemento Portland Ordinario) en la elaboración de hormigones ya que su composición química es similar a la del cemento Portland.

Las escorias de alto horno al igual que el CPO, tiene propiedades hidráulicas, es decir, al entrar en contacto con el agua ocurren reacciones de hidratación que forman nuevas fases con propiedades cementosas. Sin embargo, la velocidad de reacción de la escoria con el agua es muy lenta, debido a la formación de una capa ácida rica en sílice que impide la penetración del agua hacia el interior de la estructura (Moranville, 1998). Durante la activación química de la escoria, la adición de los iones OH^- incrementa la velocidad de reacción facilitando el rompimiento de la estructura vítrea de la escoria y precipitando los productos cementosos (Wang y Scrivener, 1995) [17].

Además, a través de estudios realizados por diferentes investigadores, existe un sin número de resultados obtenidos por la adición de las escorias de alto horno en la elaboración de hormigones, entre los cuales están:

- La escoria de alto horno puede ser usada como adición al cemento para producir concretos con características de resistencia a la

compresión y a la penetración de cloruros similares o superiores a las obtenidas con sólo cemento Portland. Sin embargo, es necesario evaluar qué porcentaje de adición produce un óptimo de resistencia según sea el caso, ya que no necesariamente coinciden ^[18].

- La adición de escoria de alto horno aumenta notablemente la resistencia del concreto a la penetración de cloruros ^[18].

2.6.3.3 Humo de Sílice

Partiendo de la definición dada por el ACI 116 la cual se presente en el presente estudio en el numeral 2.4.1.3, existen diferentes ejemplos en cuanto la aplicación de hormigón con micro sílice los cuales se describe a continuación:

- El puente Confederación, Isla Principie Edward, Canadá, fue terminado en el año de 1997 y tiene una longitud de 13 km, conecta la isla de Principie Edward con la costa este de Canadá, para su construcción se utilizó 40000 m³ de hormigón con un 7,5% de micro sílice en el cemento, lo que permitió alcanzar resistencia de 55 MPa a los 28 días ^[19].
- Las Torres Petronas, Kuala Lumpur, fueron terminadas en 1988, tienen 452 m de altura, para su construcción se utilizó hormigones de alto desempeño, en esta obra se clasificó al hormigón en grados, alcanzando resistencias de 80 MPa a los 56 días, para lograrlo, se utilizaron adiciones de ceniza volante y micro sílice, teniendo las mezclas un revenimiento de 20 cm ^[19].
- Edificio de almacenaje nuclear Hanford Washintong, para su construcción se utilizó una mezcla de: 232 kg/cm³ de cemento portland tipo I más 36 kg/cm³ de micro sílice, lo que representa el 11 % de los materiales cementantes con una relación agua/materiales cementantes del 0,37 y un revenimiento de 20 cm, con esta mezcla se alcanzaron resistencias de 43 MPa a los 28 días y 52 MPa a los 90 días ^[19].

Además, es importante conocer que el humo de sílice desempeña un rol físico en la elaboración de hormigones ya que actúa como plastificante como

consecuencia de su finura y otro rol químico al reaccionar con el hidróxido cálcico procedente de los compuestos activos del cemento dando lugar a silicatos cálcicos hidratados de composición parecida a los procedentes de la hidratación del cemento y produciendo un aumento de resistencias mecánicas. No sólo son estos los efectos conseguidos sino también un aumento de la adherencia de la pasta a los áridos, una disminución importante de la permeabilidad de los hormigones al cerrar muchos de los conductos capilares que éste posee, y un aumento de la cohesión de la mezcla [20].

CAPÍTULO 3

EMPLEO DE LA ADICIÓN MINERAL LC2, HUMO DE SÍLICE Y CEMENTO LC3 EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES

3.1 Generalidades

En el presente capítulo se expone el desarrollo experimental para la obtención de los especímenes de hormigón de alta prestación utilizando como patrón un hormigón de 35 MPa de resistencia a la compresión y con el cual se compararán las probetas realizadas con las adiciones minerales en sus diferentes proporciones.

Se describe además las caracterizaciones de los materiales utilizados en el proceso de obtención de dichos especímenes, la obtención de la adición mineral, el proceso de fabricación de las probetas, los ensayos físico mecánicos realizados al hormigón en estado fresco y endurecido.

3.2 Diseño experimental

El diseño experimental se realizó basándose en la posible sustitución de un porcentaje del cemento Portland para un hormigón de alta prestación mejorando sus propiedades y ayudando en la disminución de CO₂ que se produce en la obtención del Clínker, material fundamental para el cemento.

Se realizaron probetas utilizando cemento Portland al 100% de su contenido más superplastificante, para una resistencia a la compresión de 35MPa, humo de sílice como adición mineral en un 10% de su contenido, adición mineral de arcilla calcinada, caliza y yeso (LC2) en porcentajes de 15%, 30% y 45%, y utilizando cemento LC3 (arcilla calcinada, caliza, yeso y clínker) al 100% de su contenido, obtenido mediante proceso de intermolienda.

A continuación, se detallan los diferentes tipos de hormigón que se evaluarán en este proceso y su variedad de porcentajes de adiciones.

Para un mejor entendimiento se describen abreviaciones que se utilizan en las 6 mezclas ensayadas:

- CP.- Cemento Portland
- HS.- Humo de Sílice
- LC3.- Arcilla calcinada, caliza, yeso y clinker.
- LC2.- Arcilla calcinada, caliza y yeso.

Tabla 9
Tipos de muestras de Hormigón y sus diferentes porcentajes de adiciones

	Tipo de hormigón	Cont. CP	Cont. LC2	Cont. LC3	Cont. HS
1	M1-CP	100%	0%	0%	0%
2	M2-10%HS	90%	0%	0%	10%
3	M3-LC3	0%	0%	100%	0%
4	M4-15%LC2	85%	15%	0%	0%
5	M5-30%LC2	70%	30%	0%	0%
6	M6-45%LC2	55%	45%	0%	0%

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.3 Metodología del diseño

1. Selección y caracterización de los áridos a utilizar.
2. Obtención y ensayos al LC2 y LC3.
3. Fabricación de hormigones según las combinaciones y dosificaciones expuestas anteriormente.
4. Evaluación de las siguientes propiedades en el hormigón:
 - Asentamiento mediante uso del cono de Abrams - NTE INEN 1578.
 - Resistencia a la compresión a las 24 horas, 3, 7 y 28 días en donde se utilizaron 3 probetas de 100x200mm para cada edad para un total de 72 probetas empleando las 6 mezclas - ASTM C39.
 - Aire ocluido - ASTM C 231.

3.4 Obtención, preparación y caracterización de las materias primas

3.4.1 Áridos

Los áridos utilizados para la obtención de las probetas de hormigón fueron de dos tipos; el árido fino que es Arena de río y el árido grueso que es el ripio $\frac{3}{4}$ ", ambos procedentes del Río Paute.

Los ensayos que se realizaron a los áridos fueron:

- Determinación del material más fino que pasa el tamiz con abertura de $75\mu\text{m}$ (No. 200), mediante lavado - NTE INEN 697 (sin agente dispersante).
- Análisis granulométrico - NTE INEN 696
- Determinación de la densidad y absorción del árido grueso NTE INEN 857 y árido fino NTE INEN 856.
- Determinación de contenido total de humedad NTE INEN 862
- Determinación de la masa unitaria suelta NTE INEN 858
- Determinación de la masa unitaria compactada NTE INEN 858

3.4.1.1 Determinación del material más fino que pasa el tamiz con abertura de $75\mu\text{m}$ (No. 200), mediante lavado – INEN 697

Equipos

- Balanza. - Debe ser legible y tener una precisión de 0,1 g o del 0,1% de la masa de ensayo, la que sea mayor, en cualquier punto dentro del rango de uso.
- Tamices. - Un arreglo de dos tamices, el inferior debe ser el tamiz de $75\mu\text{m}$ (No. 200) y el superior de 1,18 mm (No. 16), ambos deben cumplir con los requisitos de la NTE INEN 154.
- Recipiente. - Un frasco o contenedor de un tamaño suficiente para recibir la muestra cubierta con agua y para permitir una agitación vigorosa sin pérdida de alguna parte de la muestra o del agua.
- Horno. - Un horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento

1. Secar la muestra en el horno hasta conseguir una masa constante, a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Determinar la masa con una aproximación de 0,1% de la masa de la muestra.
2. Si la especificación requiere que la cantidad que atraviesa el tamiz de $75\text{ }\mu\text{m}$ (No. 200) se determine sobre una parte de una muestra que pasa un tamiz más pequeño que el tamaño máximo nominal del árido, separar la muestra por el tamiz designado y determinar la masa del material que pasa dicho tamiz, con aproximación de 0,1% de la masa de esta porción de la muestra. Utilizar esta masa como la masa seca original de la muestra de ensayo.
3. Después del secado y de la determinación de la masa, colocar la muestra en el recipiente y agregar suficiente cantidad de agua hasta cubrirla. No se debe añadir al agua, detergente, un agente dispersor u otra sustancia. Agitar la muestra vigorosamente para dar lugar a la separación completa de todas las partículas más finas que $75\text{ }\mu\text{m}$ de las partículas más gruesas y para llevar el material fino a suspensión. Inmediatamente verter el agua de lavado que contiene los sólidos suspendidos y disueltos sobre el arreglo de tamices, organizado con el tamiz más grueso en la parte superior. Evitar en la medida de lo posible, la decantación de las partículas gruesas de la muestra.
4. Añadir una segunda carga de agua a la muestra en el recipiente, agitar y decantar como se indicó anteriormente. Repetir esta operación hasta que el agua de lavado esté clara.
5. Regresar al recipiente todo el material retenido en el arreglo de tamices mediante un enjuague con una boquilla rociadora de la muestra lavada. Secar en el horno el árido lavado hasta conseguir una masa constante, a temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y determinar la masa con una aproximación de 0,1% de la masa original de la muestra.

Resultados

Tabla 10

Determinación del material más fino que pasa el tamiz de 75 μm del árido grueso

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1	Muestra 2
Masa seca original de la muestra (g): B	3000	3000
Masa seca de la muestra luego del lavado (g): C	2989	2984
Material más fino que 75 μm (%): A	0,37	0,53
A = 0,45 % Material más fino que 75 μm	A=(B-C)/B*100	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 11

Determinación del material más fino que pasa el tamiz de 75 μm del árido fino

ÁRIDO FINO	Muestra 1	Muestra 2
Masa seca original de la muestra (g): B	300	300
Masa seca de la muestra luego del lavado (g): C	292,2	293,9
Material más fino que 75 μm (%): A	2,60	2,03
A = 2,32 % Material más fino que 75 μm	A=(B-C)/B*100	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.1.2 Análisis Granulométrico - NTE INEN 696

Este método de ensayo se utiliza principalmente para determinar la graduación de materiales con el propósito de utilizarlos como áridos para hormigón o utilizarlos como áridos para otros propósitos. Los resultados se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la información necesaria para el control de la producción de diversos productos de áridos y mezclas que contengan áridos.

Equipos

- Balanzas. - Las balanzas utilizadas en el ensayo del árido fino y grueso deben tener una legibilidad y exactitud como la que se indica a continuación:

- Para árido fino, debe ser legible hasta 0,1 g y tener una precisión de 0,1 g o del 0,1% de la carga de ensayo, el que sea mayor, en cualquier punto, dentro del rango de uso.
- Para árido grueso o mezclas de áridos fino y grueso, debe ser legible y tener una precisión de 0,5 g o 0,1% de la carga de ensayo, el que sea mayor, en cualquier punto dentro del rango de uso.
- Tamices. - La tela del tamiz debe ser montada sobre marcos cuya construcción evite pérdidas de material durante el tamizado. La tela y los marcos del tamiz normalizado deben cumplir con los requisitos de la NTE INEN 154. Los marcos de tamiz no normalizados deben cumplir con los requisitos de la NTE INEN 154 que sean aplicables.
- Agitador de tamices mecánico. - Un dispositivo de tamizado mecánico, si se utiliza, debe crear un movimiento en los tamices que produzca que las partículas reboten y caigan, u otro tipo de movimiento que presente diferente orientación a la superficie de tamizado.
- Horno. - Un horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.

Procedimiento

1. Secar la muestra hasta masa constante a una temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
2. Seleccionar los tamices necesarios y adecuados que cubran los tamaños de las partículas del material a ensayarse, con el propósito de obtener la información requerida en las especificaciones. Utilizar tantos tamices adicionales como se desee o como sean necesarios para proporcionar información adicional, tal como el módulo de finura o para regular la cantidad de material sobre un tamiz. Ordenar los tamices en forma decreciente según el tamaño de su abertura, de arriba a abajo y colocar la muestra en el tamiz superior. Agitar los tamices manualmente o por medio de aparatos mecánicos durante un período suficiente, ya sea establecido por el ensayo o también controlado por medio de la masa de la muestra de ensayo, de tal forma que cumpla con el criterio de conformidad o de tamizado.

3. Limitar la cantidad de material sobre un determinado tamiz de manera que todas las partículas tengan oportunidad de llegar a las aberturas del tamiz algunas veces durante la operación de tamizado. Para tamices con aberturas más pequeñas que 4,75 mm (No. 4), la cantidad que se retiene sobre cualquier tamiz al finalizar la operación de tamizado no debe exceder 7 kg/m² en la superficie de tamizado (ver nota 5). Para tamices con aberturas de 4,75 mm (No. 4) y más grandes, la cantidad retenida en kg no debe exceder del producto de 2,5 X (la abertura del tamiz, en mm y X (el área efectiva de tamizado, en m²)). Esta cantidad se muestra en la tabla 2, para cinco diferentes dimensiones del marco de tamiz entre circulares, cuadrados y rectangulares, los que son de mayor uso. En ningún caso la cantidad retenida debe ser tan grande como para causar una deformación permanente de la tela de tamiz.
4. Evitar una sobrecarga de material sobre un tamiz individual, mediante alguno de los siguientes métodos:
 - a. Insertar un tamiz adicional con un tamaño intermedio de abertura entre el tamiz que puede estar sobrecargado y el tamiz inmediatamente superior al tamiz en el conjunto original de tamices.
 - b. Dividir la muestra en dos o más porciones, tamizando cada porción individualmente. Combinar las masas de las varias porciones retenidas sobre un tamiz específico antes de calcular el porcentaje de la muestra en el tamiz.
 - c. Utilizar tamices con un tamaño de marco más grande y que proporcione un área mayor de tamizado.
5. Continuar tamizando por un período suficiente de forma tal que, después de la finalización, no más del 1% en masa del material retenido en cualquier tamiz individual pase el tamiz durante 1 min de tamizado manual continuo realizado de la siguiente manera: sostener el tamiz individual, provisto con una bandeja inferior y una tapa, en una posición ligeramente inclinada en una mano. Golpear un lado del tamiz fuertemente y con un movimiento hacia arriba contra la base de la otra mano, a razón de aproximadamente 150 veces por minuto, girar el

tamiz, aproximadamente una sexta parte de una revolución, en intervalos de alrededor de 25 golpes. En la determinación de la efectividad del tamizado para tamaños mayores que el tamiz de 4,75 mm (No. 4), limitar el material sobre el tamiz a una sola capa de partículas. Si el tamaño de los tamices de ensayo montados hace que el movimiento descrito de tamizado no sea práctico, utilizar tamices con diámetro de 203 mm para verificar la efectividad del tamizado.

6. Evitar la sobrecarga de los tamices individuales para el caso de mezclas de áridos grueso y fino.
7. A menos que se utilice un agitador de tamices mecánico, tamizar a mano las partículas mayores de 75 mm mediante la determinación de la abertura más pequeña de tamiz por la cual puede pasar cada partícula. Iniciar el ensayo con el tamiz más pequeño a ser utilizado. Girar las partículas, si es necesario, a fin de determinar si van a pasar a través de una abertura particular, sin embargo, no se debe forzar a las partículas para pasar a través de una abertura.
8. Determinar las masas de cada incremento de tamaño en una balanza que cumpla con los requisitos especificados, con una precisión de 0,1% de la masa total de la muestra seca original. La masa total del material después del tamizado debe ser similar a la masa original de la muestra colocada sobre los tamices. Si las cantidades difieren en más del 0,3%, respecto a la masa de la muestra seca original, los resultados no deben ser utilizados con fines de aceptación.
9. Si se ha ensayado previamente la muestra por el método de ensayo de la NTE INEN 697, agregar la masa más fina que el tamiz de 75 μm (No. 200) determinado por ese método de ensayo, a la masa que pasa por el tamiz de 75 μm (No. 200) en el tamizado en seco de la misma muestra por este método de ensayo.

Resultados

Tabla 12
Análisis granulométrico del árido grueso

ÁRIDO GRUESO					
Número de Tamaño		67	Tamaño máximo nominal (mm)		19,05
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3"	76,20	0,0	0,0	0,0%	100,0%
2"	50,80	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 3/4"	45,30	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/2"	38,10	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/4"	37,50	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1"	25,40	0,0	0,0	0,0%	100,0%
3/4"	19,05	681,0	681,0	11,4%	88,6%
1/2"	12,7	3275,0	3956,0	66,2%	33,8%
3/8"	9,5	1601,0	5557,0	93,0%	7,0%
No.4	4,75	348,0	5905,0	98,9%	1,1%
No.8	2,36	18,5	5923,5	99,2%	0,8%
Fondo-Pasa		48,0	5971,5	100,0%	0,0%
Masa antes del tamizado (g): B					5973,0
Masa después del tamizado (g): A					5971,5
E=	0,03%	Variación en masa de ensayo			$E=(B-A)/B*100$

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

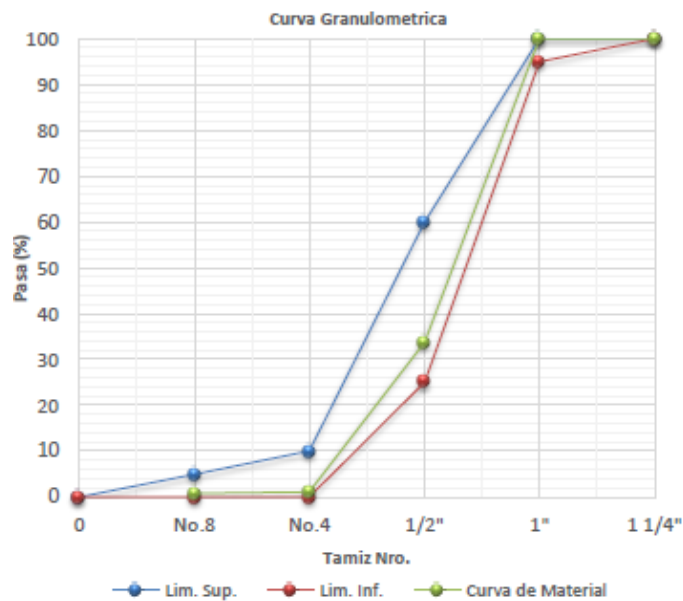


Figura 7 Curva granulométrica del árido grueso
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 13
Análisis granulométrico del árido fino

ÁRIDO FINO					
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3/8"	9,50	0,0	0,0	0,0%	100,0%
No.4	4,75	7,2	7,2	0,8%	99,2%
No.8	2,36	144,8	152,0	16,8%	83,2%
No.16	1,18	194,3	346,3	38,3%	61,7%
No.30	0,60	263,0	609,3	67,3%	32,7%
No.50	0,30	194,9	804,2	88,9%	11,1%
No.100	0,15	76,3	880,5	97,3%	2,7%
No.200	0,07	19,1	899,6	99,4%	0,6%
Fondo-Pasa		4,9	904,5	99,9%	0,1%
		Masa antes del tamizado (g): B			905,0
		Masa después del tamizado (g): A			904,5
E=	0,1%	Variación en masa de ensayo		$E=(B-A)/B*100$	
MF=	3,1	Módulo de Finura		$MF=[\sum(\% \text{ Retenido})\text{serie Tyler}]/100$	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Cabe recalcar que el módulo de finura para el árido fino se obtiene considerando la suma de los porcentajes retenidos acumulados de las mallas estándar (N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100) todo entre 100.

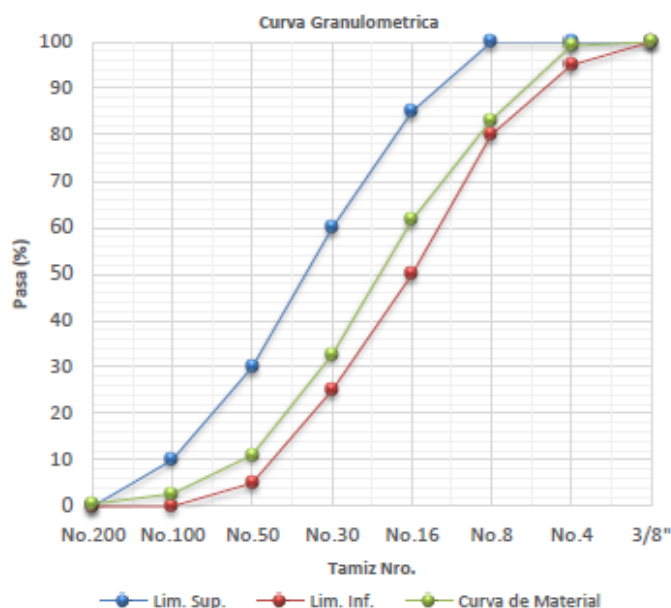


Figura 8 Curva granulométrica del árido fino

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.1.3 Determinación de la densidad y absorción de los áridos

3.4.1.3.1 Árido grueso - NTE INEN 857

Este método de ensayo se aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido grueso (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido.

Equipos

- Balanza. - Equipo para determinar masa, que sea sensible y legible, con una aproximación de 0,05% de la masa de la muestra en cualquier punto dentro del rango de uso para este ensayo, o 0,5 g, la que sea mayor. La balanza debe estar equipada con un dispositivo apropiado para suspender el recipiente para la muestra en agua, desde el centro de la plataforma o recipiente de la balanza.
- Recipiente para la muestra: Canasta de alambre con una abertura de 3,35 mm (No.6) o de malla más fina o un cubo de ancho y altura aproximadamente iguales, con una capacidad de 4 litros a 7 litros, para un árido con tamaño máximo nominal de 37,5 mm o menor, o una canasta más grande, según sea necesario, para el ensayo de áridos de mayor tamaño máximo. El recipiente debe ser construido de tal forma que evite retener aire cuando esté sumergido.
- Tanque de agua. - Tanque hermético, dentro del cual se coloca el recipiente para la muestra mientras se suspende bajo la balanza.
- Tamices. - Tamiz de 4,75 mm (No. 4) o de otros tamaños según sean necesarios, que cumplan con los requisitos de la NTE INEN 154.
- Horno. - De tamaño suficiente, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Procedimiento

1. Secar la muestra en el horno a una temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta conseguir una masa constante. Enfriar la muestra al aire, a temperatura ambiente, entre 1 hora a 3 horas, para muestras de ensayo de tamaño máximo nominal de hasta 37,5 mm o por más tiempo para tamaños más grandes, hasta que el árido se haya enfriado a una

temperatura que sea confortable para su manipulación (aproximadamente 50 °C); seguidamente sumergir el árido en agua a temperatura ambiente por un período de 24 h ± 4 h.

2. Cuando se utilizan los valores de absorción y densidad relativa (gravedad específica) en la dosificación de mezclas de hormigón, en las que el árido estará en condición de humedad natural; el requisito del numeral 1. sobre el secado inicial es opcional y si la superficie de las partículas de la muestra ha sido conservada húmeda continuamente hasta el ensayo, el requisito del numeral 1. sobre la inmersión por 24 h ± 4 h, también es opcional.
3. Retirar la muestra de ensayo del agua, colocarla sobre un paño absorbente y con el mismo frotarla hasta que sea eliminada toda lámina visible de agua. Secar las partículas grandes individualmente. Se puede utilizar una corriente de aire para ayudar a la operación de secado. Evitar la evaporación de agua desde los poros del árido durante la operación de secado superficial. Determinar la masa de la muestra de ensayo en condición saturada superficialmente seca, registrar esta y todas las masas subsecuentes con una aproximación de 0,5 g o 0,05% de la masa de la muestra, la que sea mayor.
4. Después de determinar la masa en aire, inmediatamente colocar la muestra de ensayo saturada superficialmente seca en el recipiente para la muestra y determinar su masa aparente en agua a 23 °C ± 2 °C. Remover todo el aire atrapado antes de determinar la masa mediante la agitación del recipiente mientras se lo sumerge.
5. Secar la muestra en el horno a una temperatura de 110 °C ± 5 °C, hasta conseguir una masa constante. Enfriar la muestra al aire, a temperatura ambiente, entre 1 hora a 3 horas o hasta que el árido se haya enfriado a una temperatura que sea confortable para el manejo (aproximadamente 50 °C) y determinar su masa.

Resultados

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la determinación de las densidades y el porcentaje de absorción del árido grueso.

Tabla 14

Determinación de densidades y porcentaje de absorción del árido grueso

ÁRIDO GRUESO				Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra en estado sss (g):B				3000	3000
Masa de la muestra sumergida en agua (g):C				1762	1734
Masa de la muestra seca al horno (g):A				2957	2956
Densidad relativa (estado sss): D _{sss} (g/cm ³)				2,42	2,37
Densidad relativa seca (estado seco): D _s (g/cm ³)				2,39	2,33
Densidad relativa aparente: D (g/cm ³)				2,47	2,42
Porcentaje de absorción: Pa (%)				1,45	1,49
D _{sss} =	2,40	g/cm ³	Densidad relativa SSS	D _{sss} =B/(B-C)	
D _s =	2,36	g/cm ³	Densidad relativa seca	D _s =A/(B-C)	
D=	2,45	g/cm ³	Densidad relativa aparente	D=A/(A-C)	
Pa=	1,47	%	Porcentaje de absorción	Pa=((B-A)/A)*100	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.1.3.2 Árido Fino - NTE INEN 856

Este método de ensayo se aplica para la determinación de la densidad promedio en una muestra de árido fino (sin incluir el volumen de vacíos entre partículas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido.

Equipos

- Balanza. - Que tenga una capacidad de 1 kg o más, con una sensibilidad de 0,1 g o menos y una precisión de 0,1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso para este método de ensayo. La diferencia entre lecturas debe tener una precisión dentro de 0,1 g, en cualquier rango de 100 g de carga.
- Picnómetro (para uso con el procedimiento gravimétrico). - Matraz u otro contenedor apropiado, en el cual la muestra de ensayo de árido fino, pueda ser introducida fácilmente y en el cual el volumen contenido pueda ser legible dentro de $\pm 0,1 \text{ cm}^3$. El volumen del contenedor lleno hasta la marca debe ser por lo menos 50% mayor que el requerido para acomodar la muestra de ensayo. Para una muestra de ensayo de 500

g del árido más fino, es adecuado un matraz o un recipiente de 500 cm³ de capacidad, adaptado con un picnómetro en la parte superior.

- Molde y compactador para ensayo de humedad superficial. - El molde metálico debe tener la forma de un cono truncado, con las siguientes dimensiones: 40 mm ± 3 mm de diámetro interno superior, 90 mm ± 3 mm de diámetro interno en la base y 75 mm ± 3 mm de altura; el metal debe tener un espesor mínimo de 0,8 mm. El compactador metálico debe tener una masa de 340 g ± 15 g y una cara compactadora circular y plana, de 25 mm ± 3 mm de diámetro.
- Horno. - De tamaño suficiente, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110 °C ± 5 °C.

Procedimiento volumétrico:

1. Preparación de la muestra de ensayo

1.1 Colocar la muestra en una bandeja o en otro recipiente apropiado y secarla en el horno a una temperatura de 110 °C ± 5 °C, hasta conseguir una masa constante, dejarla que se enfríe hasta una temperatura que sea confortable para su manipulación (aproximadamente 50 °C), luego cubrirla con agua, ya sea por inmersión o por adición de agua, hasta alcanzar al menos 6% de humedad en el árido fino y dejar que repose por 24 h ± 4 h.

1.2 Decantar el exceso de agua, evitando la pérdida de finos, extender la muestra sobre una superficie plana, no absorbente, expuesta a una corriente suave de aire caliente y moverla frecuentemente para asegurar un secado homogéneo. Si se desea, se pueden utilizar equipos mecánicos como un agitador, para ayudar a alcanzar la condición saturada superficialmente seca. Continuar esta operación hasta que la muestra se aproxime a una condición de flujo libre. Seguir el procedimiento indicado en el numeral 1.3 para determinar si la humedad superficial todavía está presente en las partículas constituyentes del árido fino. Realizar el primer ensayo para esta determinación cuando todavía exista agua superficial en la muestra. Continuar secando con agitación constante y probar a intervalos frecuentes hasta que el ensayo indique que la muestra ha alcanzado la

condición de superficie seca. Si el primer ensayo de determinación de humedad superficial indica que la humedad no está presente en la superficie, significa que se ha secado más allá de la condición saturada superficialmente seca; en este caso, mezclar íntegramente el árido fino con algunos cm³ de agua y dejar que la muestra repose en un recipiente cubierto por 30 minutos. A continuación, reanudar el proceso de secado y ensayos a intervalos frecuentes hasta determinar el inicio de la condición de superficie seca.

1.3 Ensayo para determinar la humedad superficial. Mantener firmemente el molde sobre una superficie lisa no absorbente, con el diámetro mayor hacia abajo. Colocar en el molde en forma suelta, una porción del árido fino parcialmente seco, hasta llenarlo colocando material adicional en la parte superior manteniendo firme el molde con la mano, compactar el árido fino con 25 golpes ligeros del compactador. Cada caída debe iniciar aproximadamente 5 mm sobre la superficie del árido. Permitir que el compactador caiga libremente bajo la atracción gravitacional en cada golpe. Ajustar la altura de inicio a la nueva elevación de la superficie después de cada golpe y distribuirlos sobre la superficie. Remover el árido fino que ha caído alrededor de la base y levantar el molde verticalmente. Si la humedad superficial todavía está presente, el árido fino mantendrá la forma del molde. Cuando el árido fino se desmorona ligeramente, ello indica que se ha alcanzado la condición de superficie seca.

1.4 Algunos áridos finos con partículas de forma predominantemente angular o con una alta proporción de finos, pueden no desmoronarse en el ensayo del cono, al alcanzar la condición de superficie seca. Este problema se puede verificar si al dejar caer desde una altura de 100 mm a 150 mm sobre una superficie, un puñado de árido fino, tomado de la muestra ensayada, se pueden observar partículas individuales muy finas. Para estos materiales, se considera que han alcanzado la condición saturada superficialmente seca, en el punto en que, luego de remover el molde, un lado del árido fino apenas se derrumba.

2. Procedimiento gravimétrico (picnómetro):

2.1 Llenar parcialmente el picnómetro con agua. Introducir en el picnómetro 500 g \pm 10 g de árido fino saturado superficialmente seco, preparado como se describe en el numeral 1. y llenar con agua adicional hasta aproximadamente el 90% de su capacidad. Agitar el picnómetro como se describe, manualmente en el literal a) o mecánicamente en el literal b) de este numeral.

a) Manualmente: rodar, invertir y agitar el picnómetro (o utilizar una combinación de estas tres acciones) para eliminar las burbujas visibles de aire.

b) Mecánicamente: agitar el picnómetro mediante una vibración externa, de una forma que no degrade la muestra. Para promover la eliminación de aire sin degradación, es suficiente un nivel de agitación ajustado para solamente mantener las partículas individuales en movimiento. Se puede considerar aceptable un agitador mecánico, si en ensayos de comparación para cada período de seis meses de uso, muestra variaciones menores que el rango aceptable de dos resultados, respecto a los resultados de la agitación manual en el mismo material.

2.2 Luego de eliminar todas las burbujas de aire, ajustar la temperatura del picnómetro y su contenido a 23,0 °C \pm 2,0 °C, si es necesario mediante inmersión parcial en agua circulante; y llevar el nivel de agua en el picnómetro hasta la marca de calibración. Determinar la masa total del picnómetro, muestra y agua.

2.3 Retirar el árido fino del picnómetro, secarlo en el horno a una temperatura de 110 °C \pm 5 °C, hasta conseguir una masa constante y enfriarlo a temperatura ambiente por 1 h \pm ½ h, determinar su masa.

2.4 Determinar la masa del picnómetro lleno hasta la marca de calibración, con agua a 23,0 °C \pm 2,0 °C.

Resultados

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la determinación de las densidades y el porcentaje de absorción del árido fino

Tabla 15

Determinación de densidades y porcentaje de absorción del árido fino

ÁRIDO FINO	Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra seca al horno (g):A	490	489,4
Masa del picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (g):B	1247	1247
Masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (g):C	1547,9	1543,6
Masa de la muestra en estado sss (g):S	500	500
Densidad relativa (estado sss): D _{sss} (g/cm ³)	2,51	2,46
Densidad relativa seca (estado seco): D _s (g/cm ³)	2,46	2,41
Densidad relativa aparente: D (g/cm ³)	2,59	2,54
Porcentaje de absorción: Pa (%)	2,04	2,17
D _{sss} = 2,48 g/cm ³	Densidad relativa SSS	D _{sss} =S/(B+S-C)
D _s = 2,43 g/cm ³	Densidad relativa seca	D _s =A/(B+S-C)
D= 2,56 g/cm ³	Densidad relativa aparente	D=A/(B+A-C)
Pa= 2,10 %	Porcentaje de absorción	Pa=((S-A)/A)*100

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.1.4 Determinación de contenido total de humedad NTE INEN 862

Este método de ensayo sirve para determinar el porcentaje de humedad evaporable por secado en una muestra de áridos, tanto el correspondiente a la humedad superficial, como la humedad contenida en los poros del árido.

Equipos

- Balanza. - Una balanza precisa, legible y con sensibilidad de 0,1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso. Dentro de un intervalo igual al 10% de la capacidad de la balanza que se utiliza para determinar la masa, la indicación de carga debe tener una precisión de 0,1% de la diferencia entre las masas.
- Fuente de calor. - Un horno ventilado capaz de mantener la temperatura, alrededor de la muestra, a 110 °C ± 5 °C. Cuando no es necesario un control estricto de la temperatura, se pueden utilizar otras fuentes adecuadas de calor como: planchas calientes, eléctricas o a gas; lámparas eléctricas de calor o un horno de microondas ventilado.

- Recipiente para la muestra. - Un recipiente de material que no le afecte el calor, de volumen suficiente para contener la muestra sin peligro de derrame y con una forma tal que la profundidad de la muestra no exceda en un quinto la dimensión lateral menor.
- Agitador. - Una cuchara o espátula de metal de tamaño conveniente.

Procedimiento

1. Determinar la masa de la muestra con una aproximación de 0,1%.
2. Secar la muestra completamente en el recipiente por medio de la fuente de calor seleccionada, cuidando no perder partículas. Un calentamiento muy rápido puede causar que algunas partículas exploten, resultando en una pérdida de las mismas. Usar un horno de temperatura controlada, cuando el calor excesivo pueda alterar las propiedades del árido o cuando se requiera una medición más precisa. Si se utiliza una fuente de calor diferente al horno de temperatura controlada, agitar la muestra durante el secado para acelerar la operación y evitar el sobrecalentamiento localizado.
3. Cuando se usa una plancha caliente, el secado puede ser acelerado con el siguiente procedimiento: añadir suficiente alcohol anhidro desnaturalizado, para cubrir la muestra húmeda. Agitar y luego permitir que el material en suspensión se asiente. Decantar la mayor cantidad de alcohol posible, sin perder ninguna partícula de la muestra. Encender el resto de alcohol y dejar que se queme durante el secado sobre la plancha caliente.
4. La muestra está completamente seca cuando un mayor tiempo de calor ocasiona, o puede ocasionar, una pérdida adicional de la masa menor al 0,1%.
5. Determinar la masa de la muestra seca, con una aproximación de 0,1%, luego de que se haya enfriado lo suficiente como para no dañar la balanza.

Resultados

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la determinación del contenido de humedad del árido grueso.

Tabla 16

Determinación del contenido total de humedad del árido grueso

ÁRIDO GRUESO				Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra húmeda (g): A				3500	3500
Masa de la muestra seca la horno (g): B				3441	3437
Humedad total (%): H				1,7	1,8
H=	1,8	%	Humedad total	H=(A-B)/B*100	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 17

Determinación del contenido total de humedad del árido fino

ÁRIDO FINO				Muestra 1	Muestra 2
Masa de la muestra húmeda (g): A				500	500
Masa de la muestra seca la horno (g): B				452,2	451,8
Humedad total (%): H				10,6	10,7
H=	10,6	%	Humedad total	H=(A-B)/B*100	

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.1.5 Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) NTE INEN 858

Este método es frecuentemente utilizado para determinar la masa unitaria (peso volumétrico) del árido, en condición compactada o suelta y calcular los vacíos entre las partículas en los áridos: fino, grueso o en una mezcla de ellos, basándose en la misma determinación.

Equipos

- Balanza. - Que tenga una precisión de 0,1% de la carga de ensayo en cualquier punto dentro del rango de uso, con graduaciones de al menos 0,05 kg. Se debe considerar que el rango de uso se extiende desde la masa del molde vacío, hasta la masa del molde más su contenido el cual se considera que tiene una masa unitaria de 1.920 kg/m³.
- Varilla de compactación. - Debe ser una varilla recta, lisa, de acero, de 16 mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud, teniendo el extremo de compactación o los dos extremos redondeados con punta semiesférica, cuyo diámetro es de 16 mm.

- Molde. - Recipiente cilíndrico de metal, preferiblemente provisto de asas. Impermeable, con la parte superior y el fondo, rectos y uniformes. Suficientemente rígido para mantener su forma bajo condiciones agresivas de uso. El molde debe tener una altura aproximadamente igual a su diámetro, pero en ningún caso la altura debe ser menor al 80% ni superior al 150% del diámetro.
- Pala o cucharón. - De tamaño conveniente para llenar el molde con el árido.
- Equipo de calibración: Además de la balanza.
 - Placa de vidrio. - De al menos 6 mm de espesor y por lo menos 25 mm mayor que el diámetro del molde a ser calibrado.
 - Grasa. - Un suministro de grasa liviana automotriz o similar.
 - Termómetro. - Con un rango de al menos entre 10 °C y 32 °C y que permita una lectura de por lo menos 0,5 °C.

Preparación de la muestra

El tamaño de la muestra debe ser de aproximadamente 125% a 200% respecto de la cantidad necesaria para llenar el molde y debe ser manejada de tal manera que se evite la segregación. Secar la muestra hasta obtener masa constante, de preferencia en un horno a 110 °C ± 5 °C.

Procedimiento para masa unitaria suelta

1. Llenar el molde a rebosar por medio de una pala o cucharón, descargar el árido desde una altura no superior a 50 mm por encima de la parte superior del molde. Tener cuidado para prevenir, tanto como sea posible, la segregación de las partículas que componen la muestra. Nivelar la superficie del árido con los dedos o con una regleta, de tal manera que cualquier ligera proyección de las partículas grandes del árido grueso, equilibren aproximadamente los vacíos mayores en la superficie, por debajo de la parte superior del molde.
2. Determinar la masa del molde y la masa del molde con su contenido. Registrar los valores con una aproximación de 0,05 kg.

Resultados

A continuación se detallan los resultados obtenidos de la determinación del contenido de humedad del árido grueso.

Tabla 18
Determinación del peso volumétrico suelto del árido grueso

ÁRIDO GRUESO		Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B		0,00714	0,00714
Masa suelta de material contenida en B (kg): A		9,6	9,48
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m ³)		1345	1328
Ms= 1336 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) suelta		Ms=A/B

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 19
Determinación del peso volumétrico suelto del árido fino

ÁRIDO FINO		Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B		0,00714	0,00714
Masa suelta de material contenida en B (kg): A		10,41	10,3
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m ³)		1458	1443
Ms= 1450 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) suelta		Ms=A/B

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Procedimiento para masa unitaria compactada

1. Llenar la tercera parte del molde y nivelar la superficie con los dedos. Compactar la capa de áridos, con 25 golpes de la varilla de compactación distribuidos uniformemente sobre la superficie. Llenar los dos tercios del molde, nuevamente nivelar y compactar de la forma indicada anteriormente. Por último, llenar el molde a rebosar y compactar nuevamente en la misma forma mencionada anteriormente. Nivelar la superficie del árido con los dedos o una regleta, de tal manera que cualquier ligera proyección de las partículas grandes del árido grueso, equilibren aproximadamente los vacíos mayores en la superficie, por debajo de la parte superior del molde.

2. En la compactación de la primera capa, no se debe permitir que la varilla golpee fuertemente el fondo del molde. La compactación de la segunda y tercera capas debe ser vigorosa evitando que la varilla de compactación penetre la capa anterior del árido.
3. Determinar la masa del molde y la masa del molde con su contenido. Registrar los valores con una aproximación de 0,05 kg.

Resultados

Tabla 20

Determinación del peso volumétrico compactado del árido grueso

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B	0,00714	0,00714
Masa compactada de material contenida en B (kg): A	10,52	10,48
Masa unitaria (densidad aparente) compactada: Mc (kg/m ³)	1473	1468
Mc= 1471 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) compactada	Mc=A/B

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 21

Determinación del peso volumétrico compactado del árido fino

ÁRIDO FINO	Muestra 1	Muestra 2
Volumen del recipiente (m ³): B	0,00714	0,00714
Masa compactada de material contenida en B (kg): A	10,86	10,91
Masa unitaria (densidad aparente) compactada: Mc (kg/m ³)	1521	1528
Mc= 1525 kg/m ³	Masa unitaria (peso volumétrico) compactada	Mc=A/B

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.4.2 Cemento

El cemento que se utilizó en el presente trabajo para la realización de los respectivos ensayos es el cemento Portland Atenas, tanto en la muestra patrón como en las mezclas con la adición mineral LC2 en sus diferentes porcentajes correspondientes. En la siguiente tabla se muestra la composición química del cemento Portland utilizado.

Tabla 22
Composición química del cemento Portland

Compuesto	Porcentaje
CaO	58,9
SiO ₂	17,86
Al ₂ O ₃	3,89
SO ₃	3,1
Fe ₂ O ₃	2,28
MgO	0,88
Na ₂ O	0,58
K ₂ O	0,29
TiO ₂	0,34
P ₂ O ₅	0,21
Cl	0,29
SrO	0,09
ZrO ₂	77 PPM
Álcalis	0,78

Fuente: Cementos Atenas-Graiman, ensayo de DRX

3.4.3 LC2 (Arcilla, caliza y el yeso)

3.4.3.1 Caracterización de la arcilla utilizada

La arcilla que se utilizó en este estudio es procedente del área minera La Pirámide, geológicamente se encuentra dentro de la formación Biblián, una fosa tectónica pequeña, 3 Km al Sur de Ingapirca, con una potencia estimada de 1000 metros aproximadamente. Esta formación pertenece al periodo del Mioceno de la edad Oligoceno hace 23.5 millones de años; y está conformada por una secuencia de arcillas arenosas rojas y grises, arenas gruesas y conglomerados. Más al Este, al Norte de Pilzhum, hay una secuencia bien estratificada de arcillas arenosas y limosas rojas, areniscas, areniscas tobáceas y aglomerado. En el anticlinal de esta formación hay buenos afloramientos de areniscas guijarrosas, areniscas tobáceas, areniscas arenáceas rojas y localmente de lavas. Localmente se encuentra yeso.

El área minera concesionada está conformada en su totalidad por arcillas, lutitas y argilitas todas ellas de color rojo amarillentas con presencia de alúmina (Al₂O₃) producto de procesos de oxidación durante su formación; además se observan ciertas zonas con presencia de sílice no representativas dentro de la concesión minera con relación a todo el material arcilloso del cual está constituida el área.

Las litologías presentes en el área evidentemente son los sedimentos pobremente consolidados de la erosión de cortezas de intemperismo pertenecientes a rocas ácidas-medias preexistentes en la región. Esto se puede expresar tomando en consideración el elevado contenido de minerales del Grupo de los Caolines, (Caolinita, Dickita, Nacrita) que indican la presencia de rocas madres feldespáticas.

En esta área minera se identifica una mezcla de minerales arcillosos del tipo 1:1 (Caolinita, Dickita, Nacrita). El contenido de minerales arcillosos del grupo de la caolinita se estima en un 55.27%, con una pequeña presencia de minerales del tipo 2:1. Las pérdidas de masa que se observan en el intervalo entre 200 y 300°C se asocian fundamentalmente a la presencia de hidróxidos naturales de hierro y aluminio, comunes en las cortezas de intemperismo.

Desde el punto de vista químico-mineralógico el área minera La Pirámide puede ser una arcilla que brinde excelentes resultados de reactividad. No se evidencia presencia de minerales acompañantes como la calcita y/o piritita, que podrían comprometer la reactividad. No obstante, el alto contenido de Fe₂O₃ podría ser una limitante en su uso, pues podría generar un problema de color. A continuación, se muestra la composición química de la arcilla procedente del área minera La Pirámide, determinada por DRX.

Tabla 23
Composición química de la Arcilla proveniente del área minera La Pirámide

Compuesto	Porcentaje
CaO	1,65
SiO ₂	43,4
Al ₂ O ₃	25,78
SO ₃	0,24
Fe ₂ O ₃	12,11
MgO	0,64
Na ₂ O	0,33
K ₂ O	0,25
TiO ₂	1,07
P.F	21,2
Humedad	16,73
Al ₂ O ₃ /SiO ₂	0,59

Fuente: Cementos Atenas-Graiman, ensayo de DRX

3.4.3.2 Caliza

La caliza es una roca sedimentaria compuesta en su mayor parte de carbonato de Calcio (Calcita CaCO_3), también puede contener pequeñas cantidades de minerales como arcilla, hematita, siderita, cuarzo, etc., que modifican el color y el grado de coherencia de la roca. La caliza es aglomerante, neutralizante, escorificante y fundente. El carácter prácticamente monomineral de las calizas permite reconocerlas fácilmente gracias a dos características físicas y químicas fundamentales de la calcita: es menos dura que el cobre (su dureza en la escala de Mohr es de 3) y reacciona con efervescencia en presencia de ácidos tales como el ácido clorhídrico.

La caliza tiene gran interés económico ya que constituye la materia prima del cemento; se utiliza parte en la construcción y como fundente en la industria siderúrgica. Las rocas calizas a pesar de que frecuentemente están recristalizadas o han sufrido reemplazo en grado variable, son designadas con nombres basados siempre en las texturas tanto de superficies frescas como en superficies ligeramente atacadas por intemperismo.

En la caliza que se utilizó en el proceso de la obtención del LC2, la cantidad de carbonato de calcio (calcita) debe ser mayor al 85% ya que de esta manera aporta con una mayor cantidad de CaO , la misma que potenciará las diferentes fases del clínker durante la molienda. El resultado obtenido fue de 94,61% de calcita.

Tabla 24
Composición química de la Caliza

Compuesto	Porcentaje
Calcita (CaCO_3)	94,61
Cuarzo (SiO_2)	5,39

Fuente: Cementos Atenas-Graiman, ensayo de DRX

3.4.3.3 Yeso

El yeso es un tipo de roca sedimentaria formado por la precipitación de sulfato de calcio en el agua del mar. Se origina en zonas volcánicas por la acción de ácido sulfúrico sobre minerales con contenido en calcio; asimismo se localiza en muchas arcillas como un producto de la reacción de la caliza con ácido sulfúrico.

La calcinación de la piedra de yeso a diferentes temperaturas lo transforma en diversas fases y estados alotrópicos. El yeso comercial en polvo utilizado en la construcción es un aglomerante bajo la forma de hemihidrato, el cual se obtiene deshidratando a temperaturas relativamente bajas (100-130°C) al sulfato de calcio dihidrato. Con el agregado de agua recupera las moléculas pérdidas durante el proceso de calentamiento y se vuelve a transformar en dihidrato, más poroso y menos denso que el original [21].

La composición química del yeso que se utilizó en la obtención de la adición mineral LC2 se muestra a continuación en la tabla 25:

Tabla 25
Composición química del Yeso

Compuesto	Porcentaje
CaO	35,6
SiO ₂	2,51
Al ₂ O ₃	0,67
SO ₃	40,03
Fe ₂ O ₃	0,35
MgO	0,25
NaO ₂	0,46
K ₂ O	0,1
TiO ₂	0,01
Cl	0,39
SrO	0,35

Fuente: Cementos Atenas-Graiman

3.4.3.4 Intensificador de molienda HEA-2

El proceso de molienda involucra la fragmentación y atrición de las partículas de clínker, así como atrición entre los cuerpos molidores y el revestimiento interno del molino. De esta forma, se generan cargas

electrostáticas en los finos del cemento y esto conduce a la aglomeración de partículas [22].

Los intensificadores de molienda son sustancias sólidas, líquidas o gaseosas que se adicionan en pequeñas cantidades a los materiales a moler con objeto de aumentar el aprovechamiento de la energía durante la trituración, reducen las cargas electrostáticas de las partículas de cemento, cuerpos moledores y revestimiento, contribuyendo a minimizar los fenómenos de aglomeración de partículas y aumentando la eficiencia del proceso de molienda. En forma análoga, la anulación de cargas superficiales en las partículas de cemento conduce a mejorar la movilidad del cemento en el silo y conducto de transporte, favoreciendo su transporte [22].

Básicamente, con la utilización de los intensificadores de molienda se mejora la eficiencia del molino, reduciendo los costes derivados de la molienda y la demanda de energía.

HEA2, intensificador líquido de color marrón oscuro, está diseñado como un dispersante de cemento Portland. Las fuerzas de atracción que ocurren entre las partículas de cemento durante el proceso de molienda se reducen significativamente. A su vez, reduce la cantidad de tiempo que se retienen las partículas en el molino y reduce el asentamiento de envasado. También evita que las partículas revistan el equipo del molino o que se vuelvan a acumular, lo que ayuda a reducir los costos de operación.

Otras mejoras incluyen la disminución de carga y descarga de silos, camiones y otras embarcaciones. También se puede lograr una densidad aparente de hasta un 5% mayor, los productores pueden almacenar grandes cantidades de cemento en los mismos contenedores. HEA2 puede mejorar la calidad general del cemento en sí, con un aumento de hasta un 10% en la resistencia a la compresión a edades iniciales.

3.4.4 Cemento LC3

LC3, estas son las siglas del Limestone Calcined Clay Cement (cemento de arcilla calcinada), una novedosa mezcla que tiene como novedad la

sinergia entre la arcilla calcinada y caliza, lo que influye en la reducción de los volúmenes de clínker, elemento más contaminante en las composiciones comunes.

El cemento LC3 o denominado también de bajo contenido de carbono (CBC) es una nueva tecnología surgida en el Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales de Construcción (CIDEM), perteneciente a la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas (UCLV) de Cuba en conjunto con el Laboratorio de Materiales de Construcción (LMC) perteneciente a la Escuela Politécnica Federal de Lausana (EPFL), en Suiza.

Este nuevo producto permite casi duplicar la cantidad de cemento producido por los métodos tradicionales, a partir de sustituir una gran parte del clínker por arcilla calcinada y carbonato de calcio, lo cual reduciría entre un 20-30 % las emisiones de CO₂ a la atmósfera en comparación con otros tipos de cementos. Además, que el LC3 alcanza propiedades similares o incluso superiores al cemento Portland, y que la mezcla puede ser producida de manera muy fácil en las líneas de producción existentes, con el único requerimiento de pequeñas inversiones de capital. (Martirena, 2015)

Es un cemento obtenido por medio de un proceso de intermolienda de las materias primas, su obtención es parecida a la de la adición mineral LC2 con la diferencia de que se añade una cantidad de clínker y se modifican los tiempos de molienda, cabe recalcar además que el tiempo para obtener la finura adecuada de este cemento es menor que el tiempo para obtener el cemento Portland con el que se combinará la adición mineral.

El cemento LC3 que se utilizó en este estudio contiene arcilla calcinada, clínker, caliza, yeso y una cantidad de intensificador de molienda HEA-2, las caracterizaciones y composiciones químicas de cada una de las materias primas se muestran en los incisos anteriores y más adelante se pueden observar las dosificaciones que se ejecutaron.

3.4.5 Humo de Sílice

Humo de Sílice o Microsílice (Sílica Fume): Material puzolánico de alta reactividad, subproducto de la producción de metal silíceo o ferrosilíceo. Se

recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. Para su uso resulta un material excelente como sustituto parcial de cemento Pórtland, que proporciona notables ventajas tanto técnicas como económicas.

3.4.6 Agua

El agua empleada es la que se utiliza en la planta de hormigones Hormicroto de la empresa Graitman ubicada en la ciudad de Cuenca, para la elaboración de hormigones, la cual se considera adecuada según lo especificado en la norma ASTM C 1602 "Agua de mezcla para uso en la producción de concreto de cemento hidráulico. Especificaciones".

3.4.7 Aditivo MASTERHEOBUILD 1050

Es un aditivo reductor de agua de alto rango, cumple con la norma ASTM C - 494 Tipo A y F. Recomendado utilizarlo donde se necesite una gran fluidez, altas resistencias y un incremento de durabilidad. Hormigones prefabricados.

Ventajas y beneficios:

- Reduce hasta un 40% del agua de mezcla.
- Produce hormigones con bajas relaciones agua/cemento y asentamientos rheoplásticos.
- Reduce la permeabilidad y aumenta la durabilidad.
- Libre de cloruros.

Datos técnicos

Tipo: Aditivo líquido

Color: Café oscuro

Dosificación: 300 - 800 cc por saco de cemento (0,80 – 1,80% del peso del cemento)

Densidad: 1,22 +/- 0,02 g/cm³

El modo de empleo que sugiere el fabricante en las plantas amasadoras, MasterRheobuild 1050 debe adicionarse juntamente con la última parte del agua de amasado. No debe adicionarse sobre cemento o áridos secos. Puede

adicionarse a pie de obra directamente al camión hormigonera, asegurando un tiempo de mezclado suficiente para su perfecta homogeneización.

3.5 Preparación de la adición mineral LC2 y LC3

Para la obtención de la adición mineral LC2 primero se calcina la arcilla sobre latas de acero, luego se procede a tender esta arcilla para el proceso de limpiado y eliminación de limallas que quedaron por la calcinación, utilizando imanes. Se procede con la toma de los pesos de la arcilla calcinada y limpia, la caliza, el yeso y el intensificador de molienda tipo HEA-2.



*Figura 9 Limpieza de arcilla calcinada con el uso de imanes
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*

A continuación, se coloca todo el material antes pesado en el molino de bolas y se procede con la molienda por 30 minutos, luego se evalúa la finura de la adición mediante ensayo de distribución de tamaño de partícula (DTP), se descarga el material, se reserva en sacos previamente marcados y se realiza el mismo procedimiento hasta obtener la cantidad necesaria para el total de especímenes a realizar.



*Figura 10 Determinación de la finura del material molido (Ensayo DTP)
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*

Para la obtención del cemento LC3 se realiza el mismo procedimiento anteriormente descrito con la variedad de que se adiciona una cantidad de clinker previamente triturado y el tiempo de molienda es de 50 minutos.



Figura 11 Anotación de pesos de Clinker
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo



Figura 12 Trituración del Clinker para la molienda de LC3
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo



Figura 13 Vaciado del material para la molienda de LC3
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.5.1 Molino de Bolas

Los molinos de bolas tienen forma de tambor cilíndrico o cilindro cónico, cuyo interior contiene una cantidad de cuerpos molidores esféricos de acero, cuyo impacto de unos con otros proporcionan una molturación con elevada finura; además, tiene un bajo costo de instalación y mantenimiento, motivo por el cual tiene gran utilización en la industria cementera.

El molino que se utilizó para realizar la molienda de la adición LC2 y la intermolienda LC3 es de capacidad de 10 Kg y tiene un total de 180 Kg de bolas de acero que varían en diámetros de 20, 30 y 40mm en porcentajes de 70, 20 y 10% respectivamente.

Para la limpieza del molino se utiliza 6,5 Kg de Puzolana y 0,2 Kg de clínker y se activa la máquina por unos 2 a 3 min, luego se descarga el material y se procede a sopletear para eliminar residuos y dejar completamente limpias las paredes del molino y las bolas.



Figura 14 Cuerpos esféricos de acero que contiene el molino de bolas en su interior
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo



Figura 15 Limpieza del molido mediante aire a presión
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.5.2 Proporciones de la adición LC2 y cemento LC3

La adición mineral LC2 en relación 2:1 fue elaborada en proporciones de 6,3 Kg de arcilla calcinada, 3 Kg de caliza y 0,7 Kg de yeso, representando el 63%, 30% y 7% respectivamente, para un total de 10 Kg por parada que se realizaban en el molino de bolas, debido a la capacidad de dicha máquina. Adicional a estos materiales se le añade una dosis de 0,03% de Intensificador de molienda HEA-2.

A continuación, se muestra lo antes expuesto.

Tabla 26

Proporciones de materia prima para la obtención de la adición mineral LC2

	Arcilla Calcinada	Caliza	Yeso	Total
LC2 2:1 (%)	63%	30%	7%	100%
LC2 2:1 (Kg)	6,3	3	0,7	10

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Para el cemento LC3 en relación 2:1, que se obtiene por proceso de intermolienda se utilizaron 4,7 Kg de clínker, 3,15 Kg de arcilla calcinada, 1,5 Kg de caliza y 0,65 Kg de yeso, representando el 47%, 31,5%, 15% y 6,5% respectivamente para un total de 10 Kg admitidos en el molino. Cabe resaltar que adicional a los materiales ya mencionados se le agrega una dosis de 0,045% de Intensificador de molienda HEA-2.

En la tabla a continuación se muestra lo antes expuesto.

Tabla 27

Proporciones de materia prima para la obtención del cemento LC3

	Clínker	Arcilla Calcinada	Caliza	Yeso	Total
LC3 2:1 (%)	47%	31,5%	15%	6,5%	100%
LC3 2:1 (Kg)	4,7	3,15	1,5	0,65	10

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.6 Fabricación de las mezclas de hormigón

Las mezclas fueron elaboradas en la planta de hormigón Hormicreto de la empresa Graiman en la ciudad de Cuenca, utilizando probetas cilíndricas de plástico desmoldables de 100 mm x 200 mm.

Primero, utilizando balanzas de diferentes capacidades se toman los pesos de cada uno de los materiales dependiendo del diseño y las proporciones que se requieran para cada mezcla.

Luego se va colocando en la mezcladora de concreto poco a poco los materiales para que logren homogeneizarse de manera correcta.



Figura 16 Colocación de material en la mezcladora
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo



Figura 17 Vaciado de mezcla en carretilla para el respectivo llenado de probetas
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

A continuación, se muestran las dosificaciones utilizadas para 80 L que se hicieron en cada mezcla, diseñadas por el método del ACI. Diseño proporcionado por la empresa Hormicreto del Grupo Industrial Graiman de la ciudad de Cuenca.

Tabla 28
 Dosificación para hormigones con una resistencia de diseño de 35 MPA (para 80 L)

MATERIAL	CANTIDAD (Kg)						
	1 m3	M1-CP	M2-10%HS	M3-LC3	M4-15%LC2	M5-30%LC2	M6-45%LC2
Cemento Portland	496	39,68	35,71	0,00	33,73	27,78	21,82
Cemento LC3	0	0,00	0,00	39,68	0,00	0,00	0,00
LC2	0	0,00	0,00	0,00	5,95	11,90	17,86
HS	0	0,00	3,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Agua	193	12,58	12,88	13,59	12,44	12,69	13,09
A. Grueso	910	72,39	72,39	72,28	72,28	72,28	72,28
A. Fino	813	69,32	69,32	68,71	68,71	68,71	68,71
Aditivo Rheobuild 1050	3,97	337,28 g	357,12 g	793,60 g	396,80 g	515,84 g	595,20 g

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Tabla 29
 Detalle de la cantidad de agua requerida en el diseño de hormigón, su relación con el cemento y aglomerante y porcentaje de aditivo superplastificante

Tipo de mezclas	Agua	Relación a/c	Relación a/agl	% de aditivo
M1-CP	12,58	0,32	0,32	0,85
M2-10%HS	12,88	0,32	0,32	1
M3-LC3	13,59	0,34	0,34	2
M4-15%LC2	12,44	0,31	0,31	1
M5-30%LC2	12,69	0,32	0,32	1,3
M6-45%LC2	13,09	0,33	0,33	1,5

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

3.7 Ensayo al hormigón en estado fresco

Todos los ensayos fueron realizados en el laboratorio de producción de la planta de hormigones Hormicreto de la empresa Graiman en la ciudad de

Cuenca, teniendo las debidas precauciones para la realización de cada uno de ellos.

A la muestra de hormigón en estado fresco se le realizó el ensayo de asentamiento según la NTE INEN 1578 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento”, este ensayo depende de factores como la forma de los áridos, su tamaño máximo, la granulometría, la cantidad de agua de amasado, los aditivos utilizados y otros más.

3.8 Proceso de fabricación de las probetas

Para la evaluación de los especímenes se emplearon moldes cilíndricos metálicos y de plástico de 100 x 200 mm, los cuales se limpiaron, engrasaron y armaron previamente para luego agregarles el hormigón manualmente a razón de dos capas iguales, para ser compactadas con una varilla a 25 golpes por capa, golpeando los exteriores de las probetas con un martillo de goma y luego se enrazaron. Los moldes se retiraron al día siguiente para ser utilizados en el próximo hormigón.

El curado de las probetas se realizó sumergiendo los especímenes en el tanque de curado los cuales se desmoldaron una vez pasadas las 24 horas. El tiempo de curado se extendió hasta que el hormigón alcanzó las edades de 24 horas y 3, 7 y 28 días respectivamente.

Norma empleada

NTE INEN 1576: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo



*Figura 18 Elaboración de probetas de hormigón de 10x20 cm
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*



Figura 19 Probetas de hormigón con diferentes mezclas a ensayar
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo



Figura 20 Curado de especímenes
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

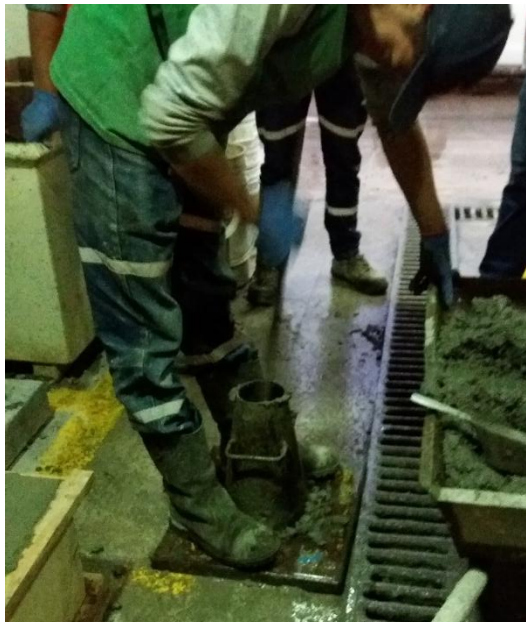
3.9 Ensayos físico-mecánicos a probetas de hormigón. Procedimientos

3.9.1 Asentamiento mediante el cono de Abrams.

Procedimiento.

El ensayo para medir el asentamiento del hormigón fresco fue mediante la NTE INEN 1578 “Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento”, y se realizó en el laboratorio de la planta de hormigón Hormicrete. Primero se seleccionó la superficie que sirvió de base para el ensayo, con dimensiones mínimas 800 x 800 mm y 2 mm de espesor, se limpió y se humedeció antes de verter el hormigón. Además, se humedeció el molde metálico troncocónico cuyas dimensiones son: 20 cm de diámetro en su base mayor, 30 cm de altura y 10 cm de diámetro en su base menor.

Cuando la mezcla se elaboró se vertió en el molde, en tres capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde y con 25 varilladas cada capa para lograr la compactación de la mezcla y luego se enrazó, y antes de los 2 minutos se levantó verticalmente el cono de forma cuidadosa, dejando que el hormigón se extienda de forma natural y se procedió a tomar la medida de los asentamientos que daban en cada mezcla.



*Figura 21 Ensayo de asentamiento por medio del cono de Abrams
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*



*Figura 22 Medida del asentamiento de las mezclas de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*

3.9.2 Resistencia a la compresión

Este ensayo se realizó según plantea la norma ASTM C39 “Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes

Cilíndricos de Concreto”. Para este ensayo se fabricaron 3 probetas cilíndricas de hormigón de 100 x 200 mm para cada tipo de mezclas para ensayarlas a las 24 horas y 3, 7 y 28 días. El ensayo fue realizado en una prensa Test Mark, que aplica una carga de forma continua y sin saltos bruscos, hasta que la probeta se deforme rápidamente antes de la rotura, finalmente se toma el valor máximo de resistencia y la carga de rotura.



*Figura 23 Ruptura de cilindros mediante el uso de la prensa Hidráulica
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*

3.9.3 Contenido de aire del hormigón fresco - Método de presión

Esta prueba se realizó según plantea la norma ASTM C231 y determina la cantidad de aire que puede contener el hormigón recién mezclado excluyendo cualquier cantidad de aire que puedan contener las partículas de los agregados. Por esta razón este ensayo es aplicable para concretos con agregados relativamente densos y que requieran la determinación del factor de corrección del agregado.

3.9.3.1 Equipos

Medidor de aire. - La operación principal de este medidor consiste en igualar el volumen de aire y la presión conocida en una cámara con el volumen desconocido de aire de la muestra de concreto. Un medidor de aire que consiste en un recipiente de forma cilíndrica y una sección superior que lo cubre. El recipiente debe ser de metal u otro material no reactivo al cemento, debe tener un diámetro de 0.75 a 1.25 veces la altura y una capacidad por lo menos de 0.20 ft³ (5.7 L). La forma en que trabaja este medidor consiste en igualar un volumen conocido de aire a una presión conocida en una cámara de aire hermética con el volumen de aire desconocido de la muestra de

hormigón. La aguja en el medidor de presión se calibra en términos de porcentajes de aire de presión en la cual se igualan ambas presiones. Se han usado satisfactoriamente presiones operacionales de 7.5 a 30.0 psi (51 a 207 kPa). El dial de la sección superior para medir el contenido de aire debe estar graduado en un rango de al menos 8%, legible con una aproximación de 0.1% bajo las operaciones normales de presión.

Varilla. - Debe ser redonda, de acero de 5/8" (16 mm) de diámetro y no menor a 16" (400 mm) de longitud, teniendo el extremo redondeado o semi hemisférico con diámetro de 5/8" (16mm).

Placa para remover exceso de hormigón. - Rectangular y plana de metal o al menos 1/4" (6 mm) de espesor, de vidrio o acrílico de al menos 1/2" (12 mm) de espesor con una longitud y ancho de al menos 2" (50 mm).

Mazo.- Con cabeza de goma, de peso aproximadamente 1.25 ± 0.50 lb (600 ± 200 g.) para usarse con recipientes de 0.5 ft³ (14 L) o menores. Para recipientes más grandes que 0,5 ft³ un mazo que pese aproximadamente 2.25 ± 0.50 lb (1000 ± 200 g).

3.9.3.2 Muestra

La muestra se obtendrá conforme al procedimiento indicado en la norma C 172. Si el hormigón contiene agregado grueso mayor a 2" (50 mm), tamice en húmedo una cantidad suficiente de la muestra representativa en un tamiz de 1 1/2" (37.5 mm), como se describe en la norma C 172.

3.9.3.3 Procedimiento

1. Seleccionar una muestra representativa.
2. Humedecer el interior del tazón y colocarlo en una superficie plana nivelada y firme.
3. Llenar el recipiente con tres capas de igual volumen, sobrellenando ligeramente la última capa.

4. Compactar cada capa con 25 penetraciones de la punta semi hemisférica de la varilla, distribuyendo uniformemente las penetraciones en toda la sección.
5. Compactar la capa inferior en todo su espesor, sin impactar en el fondo del recipiente con la varilla.
6. Compactar la segunda y tercera capa penetrando 1 pulgada (25 mm) de la capa anterior.
7. Golpear firmemente los lados del tazón de 10 a 15 veces con el mazo, después de compactar cada capa. Para evitar que las burbujas de aire queden atrapadas en el interior de la muestra.
8. Enrasar el hormigón utilizando la regla enrasadora apoyada sobre el borde superior del molde; y luego limpie el exceso de muestra del borde del recipiente.
9. Limpiar y humedecer el interior de la cubierta antes de acoplarla con las mordazas a la base; las mordazas se sujetan dos a la vez y en cruz.
10. Abrir ambas llaves de purga.
11. Cerrar la válvula principal de aire entre la cámara y el tazón y abrir ambas llaves de purga a través de la cubierta.
12. Inyectar agua a través de una de las llaves de purga hasta que se salga por la otra.
13. Continuar inyectando agua por la llave de purga, mientras mueve y golpea el medidor para asegurar que todo el aire es expulsado.
14. Cerrar la válvula de escape de aire y bombear aire dentro de la cámara hasta que el manómetro este en la línea de presión inicial.
15. Esperar unos segundos para que el aire comprimido llegue a una temperatura normal y se establezca la lectura de presión.

16. Ajustar el manómetro en la línea de presión inicial por bombeo o deje escapar aire si es necesario dando ligeros golpes con la mano.
17. Cerrar ambas llaves de purga.
18. Abrir la válvula principal entre la cámara de aire y el tazón.
19. Dar pequeños golpes en los lados del tazón con el mazo.
20. Leer el porcentaje de aire, golpeando con la mano ligeramente el manómetro para estabilizar la lectura.
21. Cerrar la válvula de aire principal y abrir las llaves de purga para descargar la presión, antes de remover la cubierta.
22. Calcular correctamente el contenido de aire:
Calcular el contenido de aire del concreto de la siguiente manera:

$$A_s = A_1 - G$$

Donde. -

A_s = contenido de aire de la muestra (%)

A_1 = contenido de aire aparente de la muestra (%), lectura del manómetro.

G = factor de corrección del agregado (%).

23. Registrar el resultado de la prueba adecuadamente.



*Figura 24 Ensayo de aire ocluido mediante método de presión
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo*

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A HORMIGONES DE ALTAS PRESTACIONES CON CONTENIDO DE LC2, HUMO DE SÍLICE Y CEMENTO LC3

4.1 Generalidades

En este capítulo se detallan los resultados obtenidos en los ensayos realizados de probetas de hormigón cuya resistencia de diseño a la compresión fue de 35 MPa, con los diferentes contenidos de adición mineral LC2, humo de sílice y las probetas realizadas con un 100% de contenido de cemento LC3.

Se detallan resultados de asentamiento obtenidos, densidades, aire ocluido y sus respectivas resistencias a la compresión a las 24 horas, 3 días, 7 días y 28 días.

4.2 Resultados y análisis de los ensayos de asentamiento

Tabla 30
Resultado de asentamientos, densidad y aire ocluido de todas las muestras de hormigón

Tipo de mezclas	Asentamiento (cm)	Densidad (Kg/L)	Aire Ocluido %
M1-CP	12,00	2,344	1,7
M2-10%HS	10,00	2,345	1,5
M3-LC3	7,50	2,345	0,9
M4-15%LC2	10,50	2,342	1,6
M5-30%LC2	11,00	2,33	1,4
M6-45%LC2	9,00	2,276	0,9

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

En la tabla 30, se pueden observar los resultados de asentamiento, densidad y aire ocluido, indican la trabajabilidad de cada tipo de hormigón, cuan denso es cada uno y la porosidad que tienen, es decir que mientras

menor cantidad de aire ocluido tenga en su interior, menos poroso es y por ende tendrá mayor durabilidad.

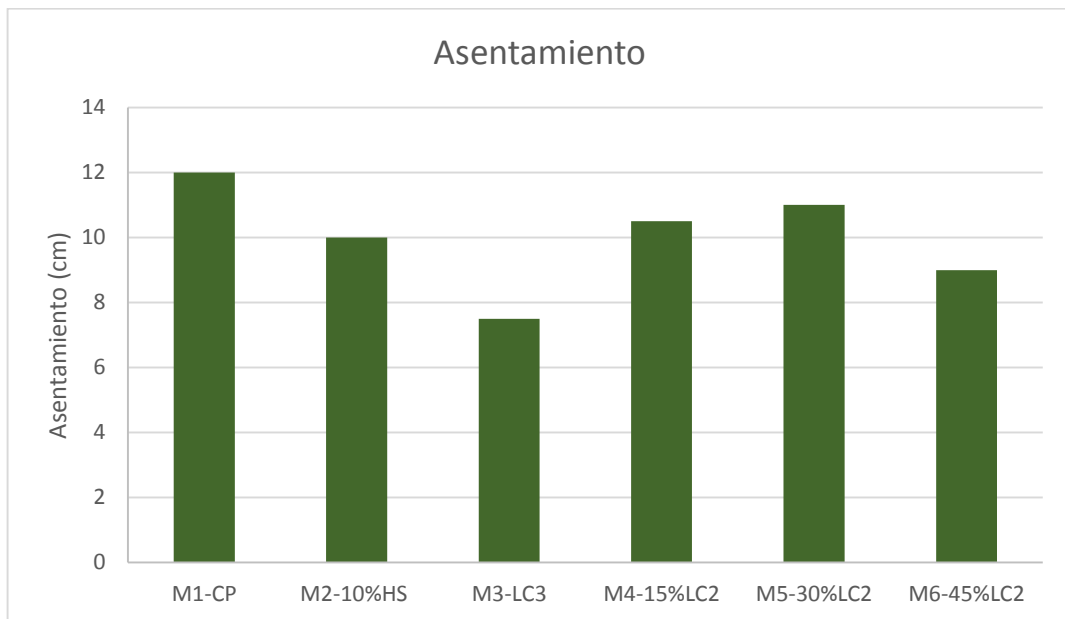


Figura 25 Asentamientos obtenidos en muestras de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

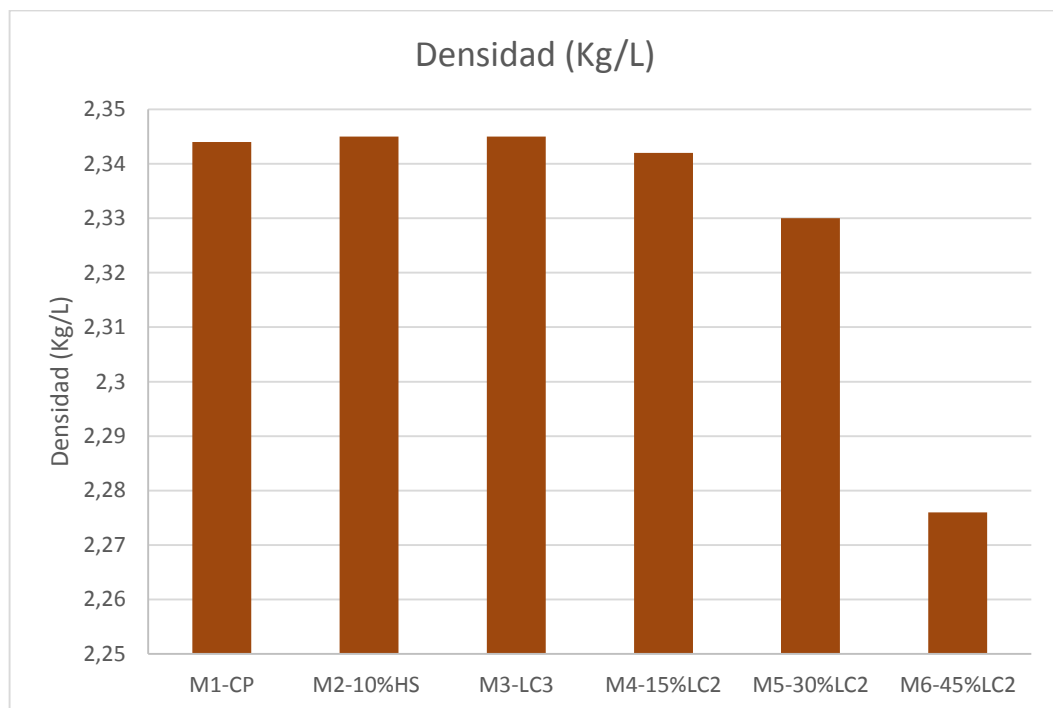


Figura 26 Densidades obtenidas en las mezclas de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

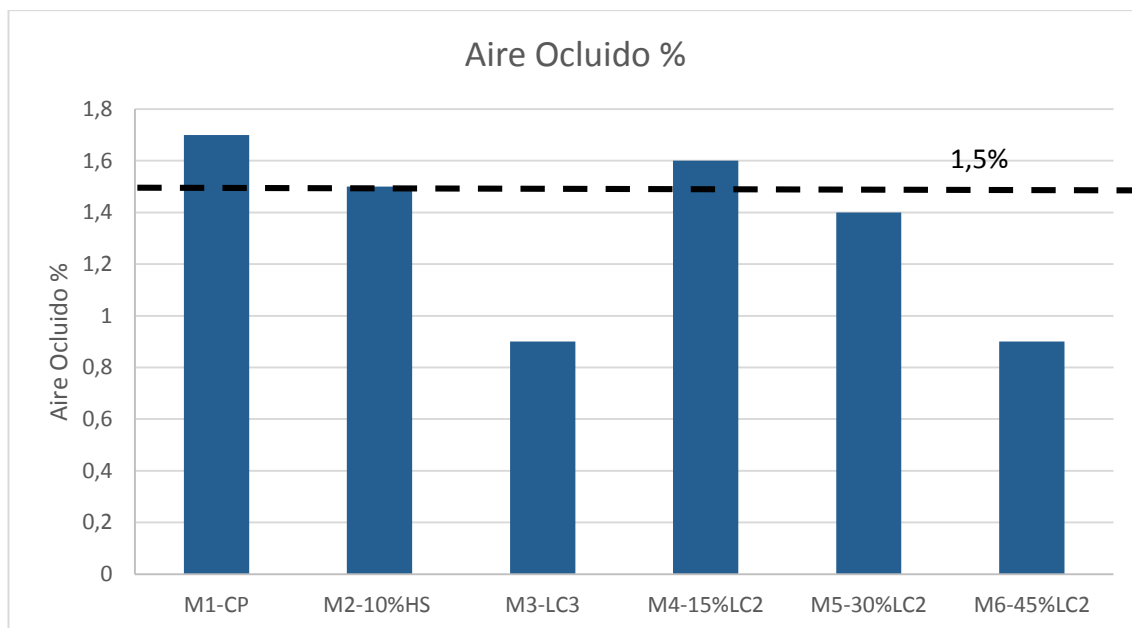


Figura 27 Porcentajes de aire ocluido obtenido en las mezclas de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

4.3 Resultados y análisis de los ensayos a compresión

Tabla 31

Resistencias a la compresión de las mezclas de hormigón

Tipo de mezclas	Resistencia a compresión							
	24 h		3 días		7 días		28 días	
	MPa	%	MPa	%	MPa	%	MPa	%
M1-CP	4,96	14,18	17,81	50,88	26,94	76,96	39,55	113,00
M2-10%HS	3,73	10,67	12,60	36,00	22,50	64,30	40,48	115,65
M3-LC3	3,81	10,90	13,83	39,52	26,57	75,90	45,73	130,67
M4-15%LC2	4,40	12,56	13,66	39,03	20,66	59,04	39,20	112,00
M5-30%LC2	3,04	8,70	9,62	27,50	18,88	53,94	35,38	101,09
M6-45%LC2	1,88	5,37	7,15	20,42	14,16	40,47	31,40	89,71

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

En la tabla 31 se puede observar que las resistencias a la compresión a las 24 horas, 3 días y 7 días de todas las mezclas son bajas respecto al diseño patrón con 100% de contenido de cemento Portland, pero a la edad de 28 días aumentan en un gran porcentaje respecto al diseño elaborado, tomando como referencia el diseño patrón que aumenta también, se puede decir que el diseño con contenido de humo de sílice y el de 100% de cemento LC3 son

mayores que éste; y aunque los que contienen la adición mineral LC2 son menores, logran llegar a la resistencia de diseño, exceptuando el de mayor contenido de LC2 (M6) que es la única muestra que presenta menos del 100% de la resistencia de diseño.

Como se observa en la figura 28 la mezcla con mayor resistencia a la compresión es la de 100% en contenido de cemento LC3 obtenido por intermolienda, siguiéndole el que contiene un 10% de Humo de Sílice, luego el sistema patrón y por último las mezclas que contienen cierto porcentaje de LC2, siendo la de mayor contenido de LC2 (M6) la menos eficaz que no llega a la resistencia de diseño. Cabe recalcar que se deben considerar los porcentajes de contenido de clínker que tienen las muestras, ya que en el caso de las que contienen la adición LC2 sus resistencias resultan bajas respecto al patrón por poseer menos clínker.

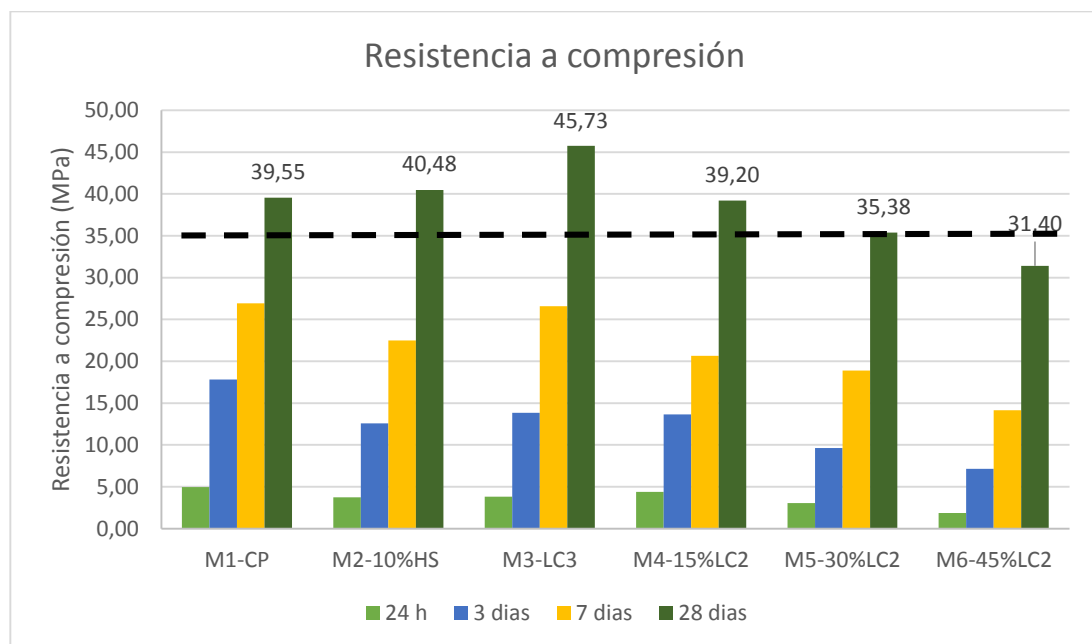


Figura 28 Resistencias a la compresión de las probetas de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

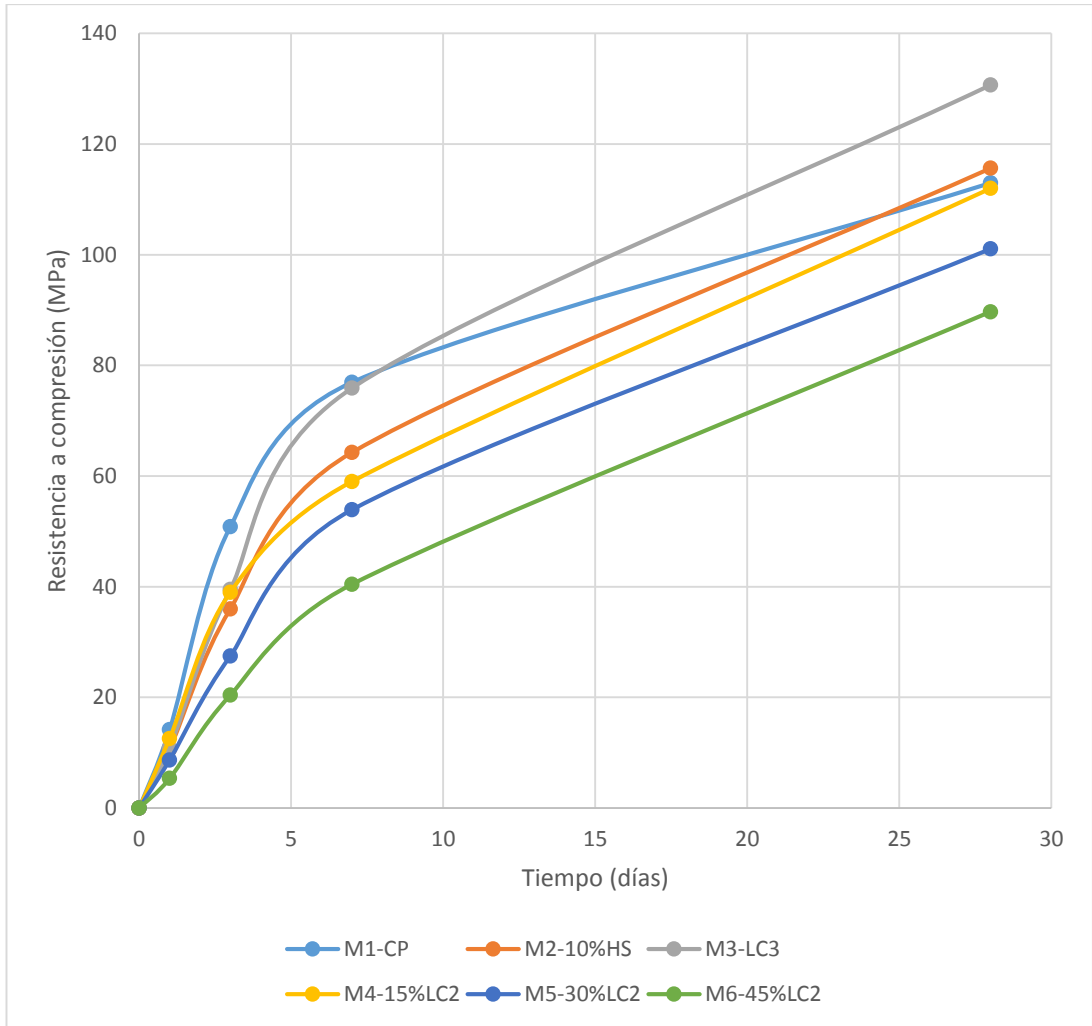


Figura 29 Relación Resistencia vs Tiempo de las probetas de hormigón
Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

En la figura 29 se observa el comportamiento que tienen las diferentes mezclas de hormigón ensayadas desarrollado en un diagrama de esfuerzo vs tiempo que evidencia que la muestra M3-LC3, alcanzó la mayor resistencia a los 28 días.

A continuación, se detallan las resistencias a la compresión medidas en porcentajes respecto al contenido de clínker que tiene cada una de las mezclas ensayadas.

Tabla 32

Porcentaje de incremento en la resistencia a la compresión y contenido de clínker

Tipo de mezclas	% de contenido de clínker	Resistencia a compresión en %			
		24 horas	3 días	7 días	28 días
M1-CP	67,00	14,18	50,88	76,96	113,00
M2-10%HS	60,00	10,67	36,00	64,30	115,65
M3-LC3	45,00	10,90	39,52	75,90	130,67
M4-15%LC2	57,00	12,56	39,03	59,04	112,00
M5-30%LC2	47,00	8,70	27,50	53,94	101,09
M6-45%LC2	37,00	5,37	20,42	40,47	89,71

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

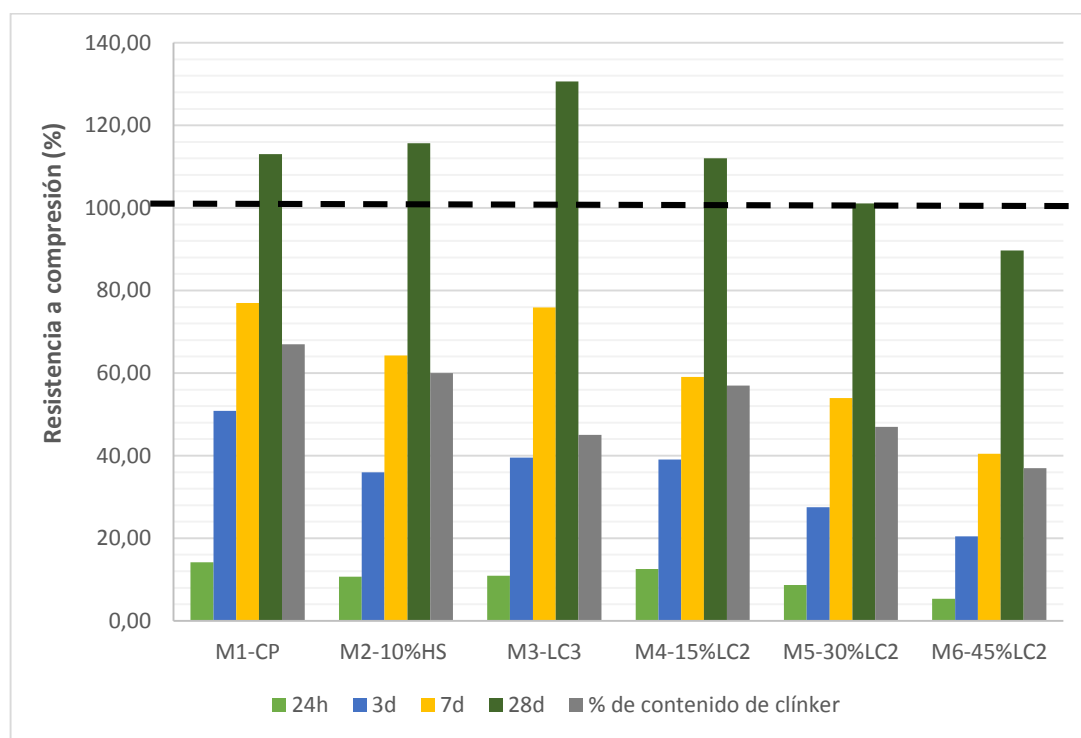


Figura 30 Comparación de los % de resistencias a la compresión vs el contenido de Clinker de cada mezcla

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APU's) Y RELACIÓN COSTO / BENEFICIO

5.1 Análisis de precios unitarios

En el presente estudio se consideró la elaboración de los análisis de precios unitarios de la fabricación de un metro cúbico de hormigón simple de 35 MPA de diseño producido con un contenido de:

- M1-CP
- M2-10%HS
- M3-LC3
- M4-15%LC2
- M5-30%LC2
- M6-45%LC2

5.1.1 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con 100% de cemento Atenas

Tabla 33

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-100%Cemento Atenas

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M1-CP

Unidad: m3

Rubro: Hormigón Simple de 35 MPA de diseño con 100% de Cemento ATENAS

Rendimiento: 0.33

Fecha: 2 de enero de 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concretera (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal /H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento ATENAS	saco	9,92	8,00	79,36
Arena (de rio)	m3	0,60	16,00	9,56
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,90
Agua	m3	0,16	1,00	0,16
Aditivo	kg	4,22	2,00	8,43
				112,41

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
			COSTO DIRECTO	126,61
			COSTO INDIRECTO (20%)	25,32
			COSTO TOTAL	151,93

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.1.2 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con 10% de humo de sílice

Tabla 34

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-10% Humo de Sílice

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M2-10%HS

Unidad: m3

Rubro: hormigón Simple de 35 MPA de diseño con 10% humo de sílice

Rendimiento: 0.33

Fecha: 2 de enero de 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concreteira (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento ATENAS	saco	8,93	8,00	71,42
Arena (de río)	m3	0,60	16,00	9,56
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,90
Agua	m3	0,16	1,00	0,16
Aditivo	kg	4,46	2,00	8,93
Humo de sílice	kg	49,60	3,08	152,77
				257,74

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
COSTO DIRECTO				271,94
COSTO INDIRECTO (20%)				54,39
COSTO TOTAL				326,33

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.1.3 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC3

Tabla 35

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-LC3

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M3-LC3

Unidad: m3

Rubro: hormigón Simple de 35 MPA de diseño con LC3

Rendimiento

: 0.33

Fecha: 2 de enero de 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concreteira (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal / H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento (LC3) 50kg	saco	9,92	5,97	59,22
Arena (de rio)	m3	0,59	16,00	9,48
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,88
Agua	m3	0,17	1,00	0,17
Aditivo	kg	9,92	2,00	19,84
				103,59

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
			COSTO DIRECTO	117,79
			COSTO INDIRECTO (20%)	23,56
			COSTO TOTAL	141,34

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.1.4 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-15%

Tabla 36

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-15%LC2

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M4-15%LC2

Unidad: m3

Rubro: hormigón Simple de 35 MPA con LC2-15%

Rendimiento: 0.33

Fecha: 2 de enero de 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concretera (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal /H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento ATENAS	saco	8,43	8,00	67,46
Adición Mineral (LC2) 50 kg	saco	1,49	3,94	5,86
Arena (de rio)	m3	0,59	16,00	9,48
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,88
Agua	m3	0,16	1,00	0,16
Aditivo	kg	4,96	2,00	9,92
				107,75

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
			COSTO DIRECTO	121,95
			COSTO INDIRECTO (20%)	24,39
			COSTO TOTAL	146,34

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.1.5 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-30%

Tabla 37

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-30%LC2

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M5-30%LC2

Unidad: m3

Rubro: hormigón Simple de 35 MPA con LC2-30%

Rendimiento: 0.33

Fecha: 2 de enero de 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concretera (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal /H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento ATENAS	saco	6,95	8,00	55,56
Adición Mineral (LC2) 50 kg	saco	2,98	3,94	11,72
Arena (de rio)	m3	0,59	16,00	9,48
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,88
Agua	m3	0,16	1,00	0,16
Aditivo	kg	6,45	2,00	12,90
				104,69

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
			COSTO DIRECTO	118,89
			COSTO INDIRECTO (20%)	23,78
			COSTO TOTAL	142,67

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.1.6 Hormigón simple de 35 MPA de diseño con LC2-45%

Tabla 38

Análisis de precio unitario hormigón Simple 35 MPA-45%LC2

ANALISIS DE PRECIO UNITARIO

CODIGO: M6-45%LC2

Unidad: m3

Rubro: Hormigón Simple de 35 MPA con LC2-45%

Rendimiento: 0.33

Fecha: 2 DE ENERO DE 2019

1. MAQUINARIAS Y EQUIPOS				
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo Horario	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Concretera (1 sacos)	0,33	4,38	1,44	0,48
Herramientas Menores (5%MO)				0,65
				1,13

2. MANO DE OBRA				
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo Hora	Costo Unitario
	A	B	C=AxB	D=CxR
Peón	7	2,80	19,60	6,47
Albañil	4	3,75	15,00	4,95
Maestro	1	5,00	5,00	1,65
				13,07

3. MATERIALES				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo
		A	B	C=AxB
Cemento ATENAS	saco	5,46	8,00	43,64
Adición Mineral (LC2) 50 kg	saco	4,47	3,94	17,59
Arena (de río)	m3	0,59	16,00	9,48
Piedra (3/4")	m3	0,68	22,00	14,88
Agua	m3	0,16	1,00	0,16
Aditivo	kg	7,44	2,00	14,88
				100,63

4. TRANSPORTE				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa	Costo
		A	B	C=AxB
COSTO DIRECTO				114,83
COSTO INDIRECTO (20%)				22,97
COSTO TOTAL				137,80

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

5.2 Relación Costo / Beneficio

Con el fin de determinar una adecuada relación Costo/Beneficio, se debe tener presente cuatro aspectos importantes los cuales se detallan a continuación:

- Resistencia del hormigón
- Precio unitario del hormigón
- Contenido de Clinker del cemento utilizado en el hormigón
- Reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera

Tabla 39
Relación Costo/Beneficio

DESCRIPCION	RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS (MPA)	CONTENIDO DE CLINKER DEL CEMENTO (%)	PRECIO UNITARIO (\$)	EMISIONES DE CO ² DEL CEMENTO Y DE LAS ADICIONES MINERALES (KgCO ₂ /Ton cemento)	REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE CO ₂ (%)
M1-CP	39,55	67,00	\$ 151,93	890,63	
M2-10%HS	40,48	60,00	\$ 326,33	801,57	10,0%
M3-LC3	45,73	45,00	\$ 141,34	564,39	36,6%
M4-15%LC2	39,20	57,00	\$ 146,34	799,36	10,2%
M5-30%LC2	35,38	47,00	\$ 142,67	708,10	20,5%
M6-45%LC2	31,40	37,00	\$ 137,80	616,83	30,7%

Fuente: M. Prudente, R. Vallejo

Es necesario indicar que de la Tabla 39, los valores de las emisiones de CO₂ generadas por la producción del cemento y de las adiciones minerales para el cemento P-35 y LC3 fueron tomados de la “Evaluación de la rentabilidad de la producción de Cemento de Bajo Carbono a partir de la composición de las metodologías tradicionales y el return on Capital Employed: ROCE” elaborado por Doralis Prieto López, Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba - Santa Clara 2016, los demás valores se calcularon considerando los porcentajes de cemento utilizado en cada ensayo de hormigón.

De acuerdo al análisis realizado en la Tabla 39, se observa claramente el uso de LC3 en la elaboración de hormigones de altas prestaciones genera mayores beneficios con respecto a los hormigones elaborados con el 100% de cemento Portland ya que se genera un ahorro de \$ 10,59 dólares por cada m³ de hormigón elaborado, un incremento en la resistencia de 6,18 MPA y una reducción del 36,6 % en las emisiones de CO₂ producidas por cada tonelada de cemento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- De acuerdo a los resultados obtenidos se concluye que el hormigón con mayor resistencia a la compresión es aquel que se elaboró con un 100% de cemento LC3 (el cual contiene un 45% de clínker), superando a la muestra patrón en un 17,67% en su resistencia final.
- El uso del LC2 como adición mineral es factible en porcentajes del 15 y 30 % ya que la resistencia final a la compresión alcanzada a los 28 días iguala y supera a la resistencia de diseño, sin embargo, son menores a la muestra patrón, debido a que, dentro de su composición, el cemento posee menor porcentaje de Clinker.
- El hormigón elaborado con cemento LC3 tiene menor cantidad de aire ocluido, es decir es menos poroso y por ende tendrá mayor durabilidad.
- El uso de arcillas calcinadas en la elaboración de hormigones de altas prestaciones es indudablemente más económico con respecto a los hormigones elaborados con el 100% de cemento portland y con el 90 % de cemento portland con adición mineral de humo de sílice del 10%.
- El uso de LC3 en la elaboración de hormigones de altas prestaciones genera una reducción del 36,6% de las emisiones CO₂ por cada tonelada de cemento producido.
- El metro cúbico de hormigón elaborado con LC3 es \$10,59 dólares más económico que el hormigón elaborado con cemento portland.

6.2 Recomendaciones

- Realizar un estudio de durabilidad a los hormigones utilizando adición mineral LC2 y cemento LC3 con las dosificaciones ensayadas.
- Producir industrialmente cemento LC3 debido a que su producción es más económica que la del cemento Portland, además de generar mayores resistencias a la compresión y por emitir menor cantidad de CO₂ a la atmosfera durante su producción.

- Utilizar un super plastificante que produzca una mezcla de hormigón más fluido, según sea necesario, con el fin de obtener mayor trabajabilidad durante la fundición de cualquier tipo de obra.
- Para la obtención de la arcilla caolinita como materia prima en la fabricación de LC3 y LC2, se recomienda la caracterización y explotación de canteras de arcilla.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Restrepo, O. J. Restrepo, J. I. Tóbon, Reducción de CO₂ en la industria cementera por medio de procesos de síntesis química, Revista Colombiana de Materiales N. 5 pp. 54-60.
- [2] A. Shvarzmana, K. Kovlera, G.S. Graderb, G.E. Shterb, The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite, Cement and Concrete Research 33 (2003) 405–416
- [3] Normas técnicas, Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto, INECYC, Primera edición (2009) 4-7, 11-12
- [4] Robert L. Day, Pozzolans for use in low-cost housing, Departamento de ingeniería Civil, Universidad de Calgary, Ottawa, Canada (1990) 10, 26-27, 32-37
- [5] Luz María Gutiérrez de González, Estudio de la reacción en el sistema puzolana natural-Ca(OH)₂ en presencia de agua, Facultad de ciencias Químicas, Universidad autónoma de nuevo León, Monterrey, México (1989) 6-7
- [6] Juan José Dopico, Fernando Martirena Hernandez, Robert L. Day, Bernhard Middendorf, Matthias Gehrke, Lesday Martinez, Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario, Universidades: Central Marta Abreu de las Villas (UCLV-CUBA), Calgary (CANADÁ) y de Kassel (ALEMANIA), Revista Ingeniería de Construcción Vol. 23 N°3 (2008) 173
- [7] Jorge Luis Costafreda Mustelier, Granulometría y reacción puzolánica, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Departamento de Ingeniería Geológica, Rios Rosas, 21.28003, Madrid, 1
- [8] F. Soria Santamaría, Puzolanas y cementos puzolánicas, Conferencia pronunciada en Madrid con motivo de la Primera exposición internacional de la construcción, Materiales de Construcción Vol. 13 N° 111 (1963) 50-51
- [9] H. Yanguatin, J. Tobón, J. Ramírez, Reactividad Puzolánica de arcillas caoliníticas, una revisión, Universidad Nacional de Colombia, Revista de

Ingeniería de Construcción Vol. 32 N° 2 (2017) 14

[10] Rancés Castillo, Rodrigo Fernández, Mathieu Antoni, Karen Scrivener, Adrian Alujas, José F. Martirena, Activación de arcillas de bajo grado a altas Temperaturas, Revista de Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°3 (2010) 331

[11] José Callejo, Adiciones y cementos con adiciones, Materiales de Construcción N° 190-191 (1983) 27

[12] Mauricio Ossa M., Héctor Jorquera S., Cementos con cenizas volantes, Materiales de Construcción Vol. 34 N°193 (1984) 4

[13] D. Revuelta, L. Fernández Luco, F. Dorrego, M. P. De Luxán, Influencia de los aditivos de molienda de clínker en las características intrínsecas del cemento y en el comportamiento del morteros, Mater Construcc Vol. 53 N° 271-272 (2003) 82

[14] M. Katsioti, P.E. Tsakiridis, P. Giannatos, Z. Tsibouki, J. Marinos, Characterization of various cement grinding aids and their impact on grindability and cement performance, Constr. Build. Mater. 23 (2009) 1954–1959. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.09.003

[15] Ángel Francisco Nistal Cordero, María Jesús Retana Maqueda, Teresa Ruiz Abrio, El hormigón, historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia, Revista de ciencia, tecnología y medio ambiente Volumen X (2012) 7-8

[16] P. Kumar Mehta, La reducción del impacto ambiental del hormigón, El hormigón puede ser durable y ambientalmente amistoso, Concrete International (2001)

[17] L. Espinoza, I. Escalante, Comparación de las propiedades del concreto utilizando escorias de alto horno como reemplazo parcial o total del Cemento Portland Ordinario, Revista científica Nexo Vol. 21 N° 01, pp. 11-18 (2008).

[18] Juan Lizarazo Marriaga, Peter Claisse, Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de los cloruros en el concreto, Ingeniería e Investigación Vol. 32 N° 2 (2011) 10.

[19] Luis Allauca, Hugo Amen, Jessica Lung, Uso de sílice en hormigones de

alto desempeño, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias De La Tierra, Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863, Guayaquil, Ecuador (2009) 22-29.

[20] D. David Martinez Ponce, Hormigones de altas prestaciones, E. U. D De Ingeniería Tecnica Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, Universidad politécnica de Cartagena, 68.

[21] Begliardo, Hugo; Sánchez, Mirta; Panigatti, M. Cecilia; Garrappa, Sofía, Reutilización de yeso recuperado de construcciones: un estudio basado en requisitos de aptitud de normas argentinas y chilenas, Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 3, diciembre, 2013, pp. 27-35. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127631072003>.

[22] Revuelta D., Fernández L., Dorrego F., De Luxán M., Influencia de los aditivos de molienda de clínker en las características intrínsecas del cemento y en el comportamiento de morteros, Materiales de Construcción Vol. 53, núm. 271-272. 2003.

ANEXOS

Anexo 1

Dosificación patón (Cemento Portland)

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:		
Cemento	496	ATENAS GU	VOLUMEN	1	m3
Agua	193	Potable	TEMPERATURA		°C
A. Grueso	910	3/4" Vintimilla	PH		
A. Fino	813	Vintimilla	AIRE		%
Plastificante	3.97	Rheobuild 1050 0.8%	OBSERVACIÓN:		
CONTROL DE ASENTAMIENTO					
Hora	14:00				
Asentamiento	12	cm			

Fuente: Hormicroto

Anexo 2

Dosificación patrón para un volumen de 80L (Cemento Portland)

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	PATRÓN M-1 P	
Cemento	39.68	ATENAS GU	VOLUMEN	80	L
Agua	12.58	Potable	TEMPERATURA		°C
A. Grueso	72.39	3/4" Vintimilla	PH		
A. Fino	69.32	Vintimilla	AIRE	1.4	%
Plastificante	337.28	Rheobuild 1050 0.85%	OBSERVACIÓN:		
CONTROL DE ASENTAMIENTO					
Hora	14:20				
Asentamiento	12	cm			

Fuente: Hormicroto

Anexo 3

Dosificación M-2 (10% Humo de Sílice)

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	M-2 HS	
Cemento	35.712	90% ATENAS GU	VOLUMEN	80	L
Humo de Sílice	3.968	10% ADICIÓN	TEMPERATURA		°C
Agua	12.88	Potable	PH		
A. Grueso	72.39	3/4" Vintimilla	AIRE		%
A. Fino	69.32	Vintimilla			
Plastificante	357.12	Rheobuild 1050 1.00%	OBSERVACIÓN:		
CONTROL DE ASENTAMIENTO					
Hora	15:30				
Asentamiento	10	cm			

Fuente: Hormicroto y M. Prudente, R. Vallejo

Anexo 4
 Dosificación LC3

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	M3-LC3
Cemento	0	0% ATENAS GU	VOLUMEN	80 L
LC3	39.68	100% ADICIÓN	TEMPERATURA	°C
Agua	13.59	Potable	PH	
A. Grueso	72.28	3/4" Vintimilla	AIRE	%
A. Fino	68.71	Vintimilla		
Plastificante	793.6	Rheobuild 1050	2.00%	OBSERVACIÓN:
CONTROL DE ASENTAMIENTO				
Hora	16:40			
Asentamiento	7.5	cm		

Fuente: Hormicreteo y M. Prudente, R. Vallejo

Anexo 5
 Dosificación LC2-15%

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	M4-LC2 15%
Cemento	33.728	85% ATENAS GU	VOLUMEN	80 L
LC3	5.952	15% ADICIÓN	TEMPERATURA	°C
Agua	12.44	Potable	PH	
A. Grueso	72.28	3/4" Vintimilla	AIRE	%
A. Fino	68.71	Vintimilla		
Plastificante	396.8	Rheobuild 1050	1.00%	OBSERVACIÓN:
CONTROL DE ASENTAMIENTO				
Hora	10:55			
Asentamiento	10.5	cm		

Fuente: Hormicreteo y M. Prudente, R. Vallejo

Anexo 6
 Dosificación LC2-30%

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	M5-LC2 30%
Cemento	27.776	70% ATENAS GU	VOLUMEN	80 L
LC3	11.904	30% ADICIÓN	TEMPERATURA	°C
Agua	12.69	Potable	PH	
A. Grueso	72.28	3/4" Vintimilla	AIRE	%
A. Fino	68.71	Vintimilla		
Plastificante	515.84	Rheobuild 1050 1.30%	OBSERVACIÓN:	
CONTROL DE ASENTAMIENTO				
Hora	12:16			
Asentamiento	11	cm		


Fuente: Hormicreteo y M. Prudente, R. Vallejo

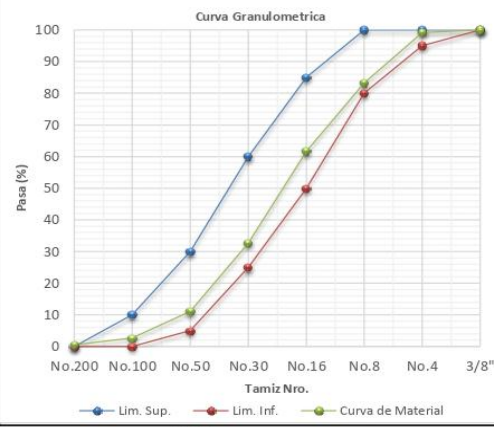
Anexo 7
 Dosificación LC2-45%

MATERIAL	CANTIDAD Kg	DESCRIPCION	Prueba #:	M6-LC2 45%
Cemento	21.824	55% ATENAS GU	VOLUMEN	80 L
LC3	17.856	45% ADICIÓN	TEMPERATURA	°C
Agua	13.09	Potable	PH	
A. Grueso	72.28	3/4" Vintimilla	AIRE	%
A. Fino	68.71	Vintimilla		
Plastificante	595.2	Rheobuild 1050 1.50%	OBSERVACIÓN:	
CONTROL DE ASENTAMIENTO				
Hora	15:00			
Asentamiento	9	cm		

Fuente: Hormicreteo y M. Prudente, R. Vallejo

Anexo 8 Análisis granulométrico (Agregado Fino)

		CONTROL DE CALIDAD DEL AGREGADO FINO		Codigo: HHD-LAB-001 Fecha: 2018-05-28 Revisión: 1	
Material:	Arena de Río	Lote:	VINTO108		
Proveedor:	Servicios y Materiales	Fecha de muestreo:	miércoles, 1 de agosto de 2018		
Procedencia:	Río Paute	Fecha de ensayo:	jueves, 2 de agosto de 2018		
DETERMINACIÓN DE MATERIAL MAS FINO QUE 75µm - NTE INEN 697 (SIN AGENTE DISPERSANTE)					
Masa seca original de la muestra (g): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa seca de la muestra luego del lavado (g): C		300,0	300,0		
Material mas fino que 75 um (%): A		292,2	293,9		
		2,60	2,03		
A =	2,32 %	Material mas fino que 75 um		A=(B-C)/B*100	
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO - NTE INEN 696					
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3"	76,20	0,0	0,0	0,0%	100,0%
2"	50,80	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 3/4"	45,30	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/2"	38,10	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/4"	37,50	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1"	25,40	0,0	0,0	0,0%	100,0%
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1/2"	12,70	0,0	0,0	0,0%	100,0%
3/8"	9,50	0,0	0,0	0,0%	100,0%
No.4	4,75	7,2	7,2	0,8%	99,2%
No.8	2,36	144,8	152,0	16,8%	83,2%
No.16	1,18	194,3	346,3	38,3%	61,7%
No.30	0,60	263,0	609,3	67,4%	32,6%
No.50	0,30	194,9	804,2	88,9%	11,1%
No.100	0,15	76,3	880,5	97,3%	2,7%
No.200	0,07	19,1	899,6	99,5%	0,5%
Fondo-Pasa		4,9	904,5	100,0%	0,0%


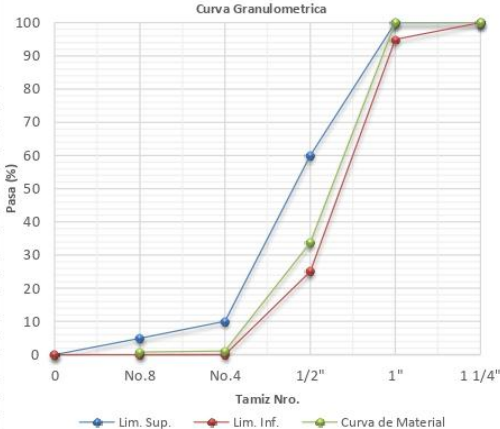


Masa antes del tamizado (g): B	905,0				
Masa después del tamizado (g): A	904,5				
E=	0,1 %	Variación en masa de ensayo		E=(B-A)/B*100	
MF=	3,10	Modulo de Finura		MF=[Σ(% Retenido)serie Tyler]/100	

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN NTE INEN 856					
Masa de la muestra seca al horno (g):A		Muestra 1	Muestra 2		
Masa del picnómetro llenado con agua hasta la marca de calibración (g):B		490,0	489,4		
Masa del picnómetro lleno con la muestra y agua hasta la marca de calibración (g):C		1247,0	1247,0		
Masa de la muestra en estado sss (g):S		1547,9	1543,6		
Densidad relativa (estado sss): Dsss (g/cm3)		500,0	500,0		
Densidad relativa seca (estado seco): Ds(g/cm3)		2,51	2,46		
Densidad relativa aparente: D (g/cm3)		2,46	2,41		
Porcentaje de absorción: Pa (%)		2,59	2,54		
		2,04	2,17		
Dsss =	**2,48 g/cm3**	**Densidad relativa SSS**	**Dsss=S/(B+S-C)**		
Ds=	**2,43 g/cm3**	**Densidad relativa seca**	**Ds=A/(B+S-C)**		
D=	**2,56 g/cm3**	**Densidad relativa aparente**	**D=A/(B+A-C)**		
Pa=	**2,10 %**	**Porcentaje de absorción**	**Pa=(S-A)/A*100**		
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD NTE INEN 862					
Masa de la muestra húmeda (g): A		Muestra 1	Muestra 2		
Masa de la muestra seca la horno (g): B		500,0	500,0		
Humedad total (%): H		452,2	451,8		
		10,6	10,7		
H=	**10,6 %**	**Humedad total**		**H=(A-B)/B*100**	
DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA SUELTA NTE INEN 858					
Volúmen del recipiente (m3): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa suelta de material contenida en B (kg): A		0,00714	0,00714		
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m3)		10,41	10,30		
		1458	1443		
Ms=	**1450 kg/m3**	**Masa unitaria (peso volumétrico) suelta**		**Ms=A/B**	
DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA COMPACTADA NTE INEN 858					
Volúmen del recipiente (m3): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa compactada de material contenida en B (kg): A		0,00714	0,00714		
Masa unitaria (densidad aparente) compactada: Mc (kg/m3)		10,86	10,91		
		1521	1528		
Mc=	**1525 kg/m3**	**Masa unitaria (peso volumétrico) compactada**		**Mc=A/B**	
Realizado por:			Revisado y Aprobado por:		
Gonzalo Orellana Laboratorista			Flavio Morocho Jefe de Laboratorio		
* Documento emitido electrónicamente, no requiere firma * La información confidencial de este certificado no podrá ser reproducida por ningún medio ni en ningún formato por el cliente sin expresa autorización previa escrita del laboratorio.					
Número	**Fecha**	**Motivo**			
1	2018-03-13	Introducción al SGC			

Fuente: Hormicroto

Anexo 9
Análisis granulométrico (Agregado Grueso)

		CONTROL DE CALIDAD DEL AGREGADO GRUESO		Codigo: HHD-LAB-002	
				Fecha: 2018-05-28	
				Revisión: 1	
Material:	Ripio 3/4"	Lote:	VINT0208		
Proveedor:	Servicios y Materiales	Fecha de muestreo:	Jueves, 2 de agosto de 2018		
Procedencia:	Río Paute	Fecha de ensayo:	viernes, 3 de agosto de 2018		
DETERMINACIÓN DE MATERIAL MAS FINO QUE 75µm - NTE INEN 697 (SIN AGENTE DISPERSANTE)					
Masa seca original de la muestra (g): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa seca de la muestra luego del lavado (g): C		3000,0	3000,0		
Material mas fino que 75 um (%): A		2989,0	2984,0		
		0,37	0,53		
A=	0,45 %	Material mas fino que 75 um		A=(B-C)/B*100	
ANÁLISIS GRANULOMETRICO - NTE INEN 696					
Número de Tamayo	67,00		Tamayo maximo nominal (mm)		19,05
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3"	76,20	0,0	0,0	0,0%	100,0%
2"	50,80	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 3/4"	45,30	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/2"	38,10	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1 1/4"	37,50	0,0	0,0	0,0%	100,0%
1"	25,40	0,0	0,0	0,0%	100,0%
3/4"	19,05	681,0	681,0	11,4%	88,6%
1/2"	12,70	3275,0	3956,0	66,2%	33,8%
3/8"	9,50	1601,0	5557,0	93,1%	6,9%
No.4	4,75	348,0	5905,0	98,9%	1,1%
No.8	2,36	18,5	5923,5	99,2%	0,8%
No.16	1,18	11,4	5934,9	99,4%	0,6%
No.30	0,60	10,4	5945,3	99,6%	0,4%
No.50	0,30	9,9	5955,2	99,7%	0,3%
No.100	0,15	8,0	5963,2	99,9%	0,1%
No.200	0,07	7,6	5970,8	100,0%	0,0%
Fondo-Pasa	0,7	5971,5	100,0%	100,0%	0,0%
Curva Granulometrica					
					
Masa antes del tamizado (g): B					5973,0
Masa despues del tamizado (g): A					5971,5
E=	0,03 %	Variación en masa de ensayo		E=(B-A)/B*100	
MF=	7,01	Modulo de Finura		MF=[Σ(% Retenido)serie Tyler]/100	
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD Y ABSORCIÓN NTE INEN 857					
Masa de la muestra en estado sss (g): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa de la muestra sumergida en agua (g): C		3000,0	3000,0		
Masa de la muestra seca al horno (g): A		1762,0	1734,0		
Densidad relativa (estado sss): Dsss (g/cm3)		2957,0	2956,0		
Densidad relativa seca (estado seco): Ds (g/cm3)		2,42	2,37		
Densidad relativa aparente: D (g/cm3)		2,39	2,33		
Porcentaje de absorción: Pa (%)		2,47	2,42		
		1,45	1,49		
Dsss =	2,40 g/cm3	Densidad relativa SSS		Dsss=S/(B+S-C)	
Ds =	2,36 g/cm3	Densidad relativa seca		Ds=A/(B+S-C)	
D =	2,45 g/cm3	Densidad relativa aparente		D=A/(B+A-C)	
Pa =	1,47 %	Porcentaje de absorción		Pa=(B-A)/A*100	
DETERMINACIÓN DE CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD NTE INEN 862					
Masa de la muestra humeda (g): A		Muestra 1	Muestra 2		
Masa de la muestra seca la horno (g): B		3500,0	3500,0		
Humedad total (%): H		3441,0	3437,0		
		1,7	1,8		
H=	1,8 %	Humedad total		H=(A-B)/B*100	
DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA SUELTA NTE INEN 858					
Volúmen del recipiente (m3): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa suelta de material contenida en B (kg): A		0,00714	0,00714		
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: Ms (kg/m3)		9,60	9,48		
		1345	1328		
Ms=	1336 kg/m3	Masa unitaria (peso volumétrico) suelta		Ms=A/B	
DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA COMPACTADA NTE INEN 858					
Volúmen del recipiente (m3): B		Muestra 1	Muestra 2		
Masa compactada de material contenida en B (kg): A		0,00714	0,00714		
Masa unitaria (densidad aparente) compactada: Mc (kg/m3)		10,52	10,48		
		1473	1468		
Mc=	1471 kg/m3	Masa unitaria (peso volumétrico) compactada		Mc=A/B	
Realizado por:			Revisado y Aprobado por:		
Gonzalo Orellana Laboratorista			Flavio Morocho Jefe de Laboratorio		
* Documento emitido electrónicamente, no requiere firma * La información confidencial de este certificado no podrá ser reproducida por ningún medio ni en ningún formato por el cliente sin expresa autorización previa escrita del laboratorio.					
Número	Fecha	Motivo			
1	2018-03-13	Introducción al SGC			

Fuente: Hormicroto