



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

“EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE  
MOLIENDA EN LA ADICIÓN MINERAL LC2”

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Previo la obtención de título de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

**AUTOR (ES):**

CASTILLO JUMBO FÉLIX MARIO  
REYES VILLAMAR RONNY GERARDO

**TUTOR:**

ING. GARCÉS VARGAS JUAN FRANCISCO

La Libertad, Ecuador

2019

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

“EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE  
MOLIENDA EN LA ADICIÓN MINERAL LC2”

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Previo la obtención de título de:

**INGENIERO(A) CIVIL**

**AUTOR (ES):**

CASTILLO JUMBO FÉLIX MARIO  
REYES VILLAMAR RONNY GERARDO

**TUTOR:**

ING. GARCÉS VARGAS JUAN FRANCISCO

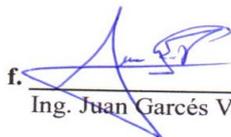
La Libertad, Ecuador

2019

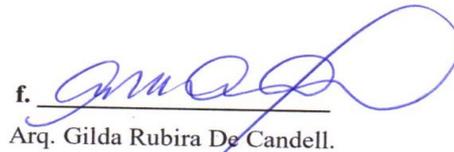
## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación, fue realizado en su totalidad por Castillo Jumbo Félix Mario y Reyes Villamar Ronny Gerardo, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Civil.

### TUTOR (A)

f.   
Ing. Juan Garcés Vargas.

### DIRECTOR DE LA CARRERA

f.   
Arq. Gilda Rubira De Candell.

La Libertad, a los veintiocho días del mes de febrero del año 2019.



RECIBIDO 01 MAR 2019

## APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación "EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE MOLIENDA EN LA ADICION MINERAL LC2", elaborado por los Sres. FÉLIX MARIO CASTILLO JUMBO y REYES VILLAMAR RONNY GERARDO, egresados 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 (A)**

  
f. \_\_\_\_\_  
Ing. Juan Garcés Vargas.

La Libertad, a los veintiocho días del mes de febrero del año 2019.

RECIBIDO 01 MAR 2019

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Castillo Jumbo Félix Mario y Reyes Villamar Ronny Gerardo

### DECLARAMOS QUE:

El Trabajo de Titulación, "EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE MOLIENDA EN LA ADICION MINERAL LC2", previo a la obtención del título de Ingeniero 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 nuestra total autoría.

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

**La Libertad, a los veintiocho días del mes de febrero del año 2019.**

### EL AUTOR (ES)

f.   
Félix Mario Castillo Jumbo.

f.   
Ronny Gerardo Reyes Villamar.



RECIBIDO 01 MAR 2019

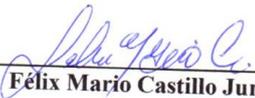
## AUTORIZACIÓN

Nosotros, Ronny Gerardo Reyes Villamar y Félix Mario Castillo Jumbo

Autorizamos a la Universidad Península de Santa Elena a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, "EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE MOLIENDA EN LA ADICION MINERAL LC2", cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.

La Libertad, a los veintiocho días del mes de febrero del año 2019.

### EL AUTOR (A)

f.   
Félix Mario Castillo Jumbo.

f.   
Ronny Gerardo Reyes Villamar.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA**  
Creación: Ley No. 110 R.O. No. 366 (Suplemento) 1998-07-22

La Libertad, 12 de febrero del 2018

**CERTIFICADO ANTIPLAGIO**

**001-TUTOR MDLG GVJF 2019**

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado **Efecto de los agentes intensificadores de molienda en la adición mineral LC2**, elaborado por los estudiantes **Ronny Gerardo Reyes Villamar y Félix Mario Castillo Jumbo**, egresados 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 6% de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto reporte de similitud.

Atentamente,

Garcés Vargas Juan  
C.I.: 0913140216  
DOCENTE TUTOR

Dirección: Vía La Libertad – Santa Elena. Teléfono: 2781738 – 2780019 telefax: 2780019  
Cantón La Libertad – Ecuador Casilla postal No. 7047.

## CERTIFICACIÓN

El Mg. Manuel Palma Borbor

Certifica:

Haber revisado y corregido, integralmente, en los aspectos: ortográfico, sintáctico y semántico, el trabajo de investigación titulado: EFECTO DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE MOLIENDA EN LA ADICIÓN MINERAL LC2, cuya autoría corresponde a los egresados, Ronny Gerardo Reyes Villamar y Félix Mario Castillo Jumbo, egresados de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, UPSE, carrera de Ingeniería Civil; en tal virtud, acredítese su aceptación de acuerdo a las normas gramaticales especificadas.

Santa Elena, 12 de febrero del 2019

  
0907178346  
Mg. Manuel Palma Borbor

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por su bendición, por guiarme a lo largo de mi existencia; a mi familia y en especial a mi esposa Gely por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de debilidad y dificultad.

Agradezco a los docentes de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión, de manera especial, al ingeniero Juan Garcés Vargas tutor de nuestro proyecto de investigación quien me ha guiado con su paciencia, y su rectitud como docente.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Félix Mario Castillo Jumbo

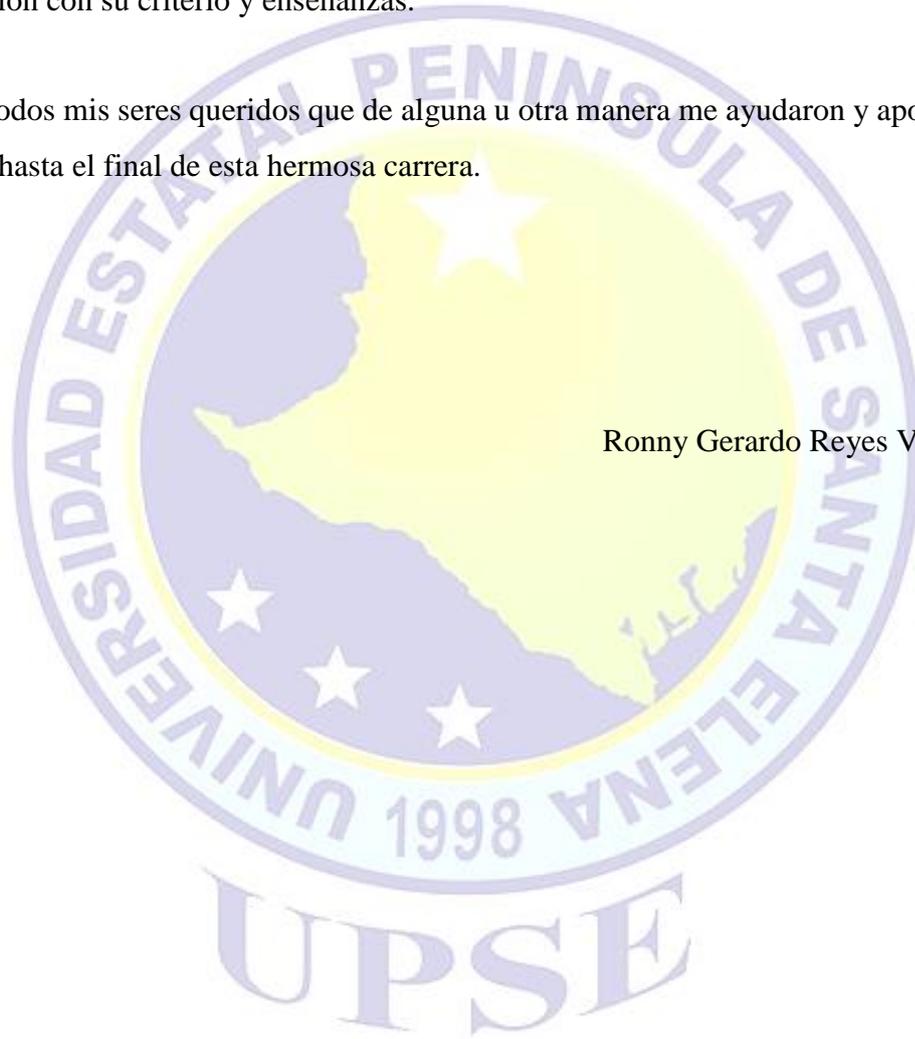
## AGRADECIMIENTOS

Gracias a todos los docentes de la carrera de ingeniería civil por su paciencia, motivación, criterio y aliento ha sido un privilegio poder contar con su guía a lo largo de todo este camino.

A mi tutor de tesis que han sabido guiarme y hacer de este un excelente trabajo de titulación con su criterio y enseñanzas.

A todos mis seres queridos que de alguna u otra manera me ayudaron y apoyaron a llegar hasta el final de esta hermosa carrera.

Ronny Gerardo Reyes Villamar.



## DEDICATORIA

El presente trabajo de investigativo lo dedico a mis padres, por su amor, trabajo, ejemplo y sacrificio en todos estos años; gracias a ustedes, he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy.

A mis hermanas Tatiana, Juliana y Eliana por estar siempre presentes, y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A mis dos amores, mi esposa Gely y a mi hija Eliana Abigail quienes han sido mi inspiración y apoyo en todo este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

Félix Mario Castillo Jumbo



## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación principalmente a Dios, por permitirme llegar hasta la meta de culminar mi carrera de ingeniería civil.

De la misma manera a cada uno de mis seres queridos, por apoyarme incondicionalmente en cada paso para poder llegar a ser un profesional.

Todo este trabajo ha sido posible gracias a ustedes.

Ronny Gerardo Reyes Villamar



**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

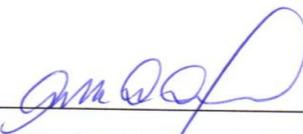
f.



---

**Ing. Juan Francisco Garcés Vargas.**  
DECANO DE LA FACULTAD

f.



---

**Arq. Gilda Graciela Rubira De Candell**  
DIRECTOR DE CARRERA

f.



---

**Ing. Lucrecia Moreno Alcívar**  
COORDINADOR O DOCENTE DEL ÁREA

f.



---

**Abg. Víctor Manuel Coronel Ortiz**  
SECRETARIO GENERAL

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACION .....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Alcance del proyecto.....	2
1.4. Objetivos .....	2
1.4.1. Objetivo general.....	2
1.4.2. Objetivos específicos .....	2
1.5. Justificación.....	3
CAPÍTULO II .....	4
MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. Fundamentación teórica. ....	4
2.1.1. Antecedentes.....	4
2.1.2. Concepto de puzolanas .....	5
2.1.3. Tipos de puzolanas empleadas.....	5
2.2. Industria cementera en Ecuador .....	6
2.3. Componentes principales del cemento.....	8
2.4. Tipos de cemento.....	9
2.4.1. Cemento de endurecimiento rápido .....	9
2.4.2. Cemento de bajo calor .....	10
2.4.3. Cemento resistente al sulfato .....	10
2.4.4. Cemento blanco .....	10
2.4.5. Cemento Portland puzolana.....	10
2.4.6. Cemento hidrofóbico .....	11

2.5. Composición mineralógica del cemento portland, la arcilla calcinada, caliza y yeso.....	11
2.5.1. Composición mineralógica de la arcilla calcinada .....	11
2.5.2. Composición mineralógica del cemento portland .....	12
2.5.3. Composición mineralógica del yeso .....	13
2.5.4. Composición mineralógica de la caliza. ....	14
2.6. Materiales de reemplazo.....	14
2.6.1. Ceniza volante .....	14
2.6.2. Metacaolín .....	16
2.6.3. Humo de sílice .....	17
2.6.4. Escoria granulada de alto horno. ....	18
2.7. Aditivos intensificadores de molienda .....	18
2.8. Hipótesis de la investigación .....	19
2.9. Variables de la investigación.....	19
CAPÍTULO III.....	20
PROPUESTA.....	20
3.1. Planificación y selección de materiales.....	20
3.1.1. Planificación del cronograma de actividades para los ensayos respectivos en la ciudad de Cuenca .....	20
3.2. Molienda de las distintas muestras .....	25
3.3. Ensayos para determinar los requisitos de desempeño de un cemento .....	26
3.3.1. Ensayos que determinan la finura del cemento .....	26
3.3.2. Ensayos que determinan la reología de las pastas y morteros .....	31
3.3.3. Ensayos que determinan las propiedades mecánicas.....	37
CAPÍTULO IV.....	46
INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS.....	46
4.1. Análisis de resultados para la etapa de selección de intensificador de molienda. ....	46

4.1.1. Análisis de resultados del Ensayo de la distribución de partículas .....	46
4.1.2. Análisis de resultados del Ensayo de Blaine .....	48
4.1.3. Análisis de resultados del ensayo de compresibilidad.....	50
4.1.4. Análisis de resultados del ensayo de determinación de la consistencia normal.....	51
4.1.5. Análisis de resultados del ensayo de minicono .....	52
4.1.6. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de fluidez .....	53
4.1.7. Análisis de resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros .....	54
4.1.8. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de tiempo de fraguado .....	56
4.2. Análisis de resultados para la etapa de obtención de tiempos de molienda y efectos del intensificador en las propiedades .....	57
4.2.1. Análisis de resultados del Ensayo de la distribución de partículas .....	57
4.2.2. Análisis de resultados del Ensayo de Blaine .....	59
4.2.3. Análisis de resultados del Ensayo de Compresibilidad .....	60
4.2.4. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de la consistencia normal.....	61
4.2.5. Análisis de resultados del Ensayo de minicono.....	62
4.2.6. Análisis de resultados del Ensayo de fluidez.....	62
4.2.7. Análisis de resultados del Ensayo de resistencias a la compresión de morteros .....	63
4.2.8. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de tiempo de fraguado .....	64
CAPÍTULO V .....	66
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS .....	66
5.1. Costo de la producción del cemento Portland convencional.....	66
5.2. Costo de la producción del cemento LC3 por el proceso de intermolienda....	67
CAPÍTULO VI.....	69

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
6.1. Conclusiones .....	69
6.2. Recomendaciones:.....	70
BIBLIOGRAFÍA .....	71
ANEXOS .....	73



## ÍNDICE DE FIGURAS

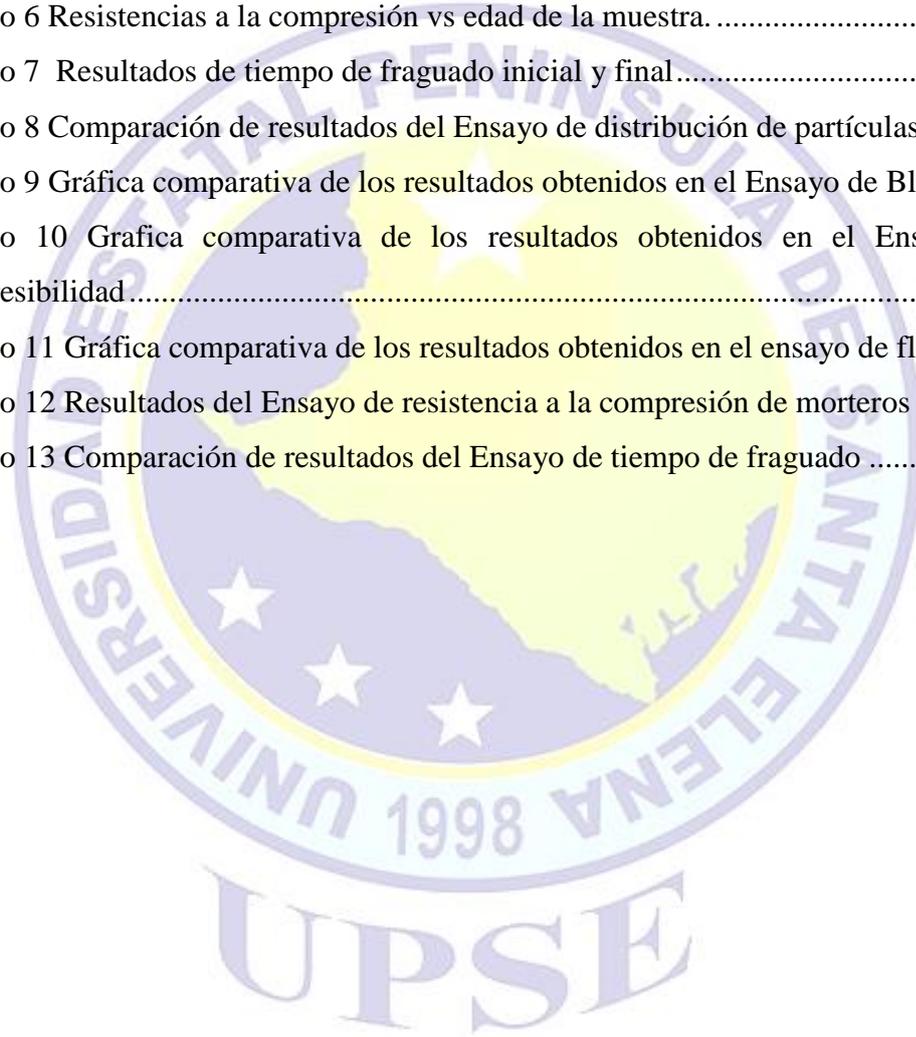
Figura 1 Producción porcentual de cemento en el año 2015 .....	7
Figura 2 Molino del laboratorio de la cementera Atenas.....	25
Figura 3 Intensificador de molienda MTDA 290.....	25
Figura 4 Material LC2 una vez realizada la molienda .....	26
Figura 5 Muestras por el proceso intermolienda clasificadas. ....	26
Figura 6 Filtro metálico para Ensayo de Blaine.....	28
Figura 7 Pisón para colocar el papel filtro y compactar ligeramente la muestra. ....	29
Figura 8 Cápsula colocada herméticamente en el aparato para Ensayo de Blaine. ...	29
Figura 9 Registro de tiempo para datos del Ensayo.....	30
Figura 10 Amasado de la muestra.....	32
Figura 11 Prueba inicial para comprobar la penetración. ....	33
Figura 12 Colocación del agua a la mezcla.....	35
Figura 13 Ensayo de la mezcla en la mesa de flujo. ....	35
Figura 14 Colocación de la muestra mezclada en el molde. ....	36
Figura 15 Muestras ensayadas después de quitar el molde.....	37
Figura 16 Medición de diámetros de las muestras con el calibrador de Vernier. ....	37
Figura 17 Cubos de 50 x 50 mm para Ensayo de resistencia a la compresión. ....	41
Figura 18 Moldes con muestras para el Ensayo de tiempo de fraguado.....	42
Figura 19 Penetración de la aguja de Vicat.....	43
Figura 20 Lectura de la penetración de la aguja de Vicat.....	44
Figura 21 Determinación de tiempo fraguado final. ....	45
Figura 22 Muestras ensayadas para tiempo de fraguado. ....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Producción de cemento en toneladas hasta el año 2015. ....	7
Tabla 2 Composición química de la arcilla caolinítica proveniente del área minera La Pirámide. ....	12
Tabla 3 Composición mineralógica del clínker del cemento Atenas. ....	12
Tabla 4 Composición de mineralógica del yeso de la cementera Atenas. ....	13
Tabla 5 Composición mineralógica de la caliza de la cementera Atenas. ....	14
Tabla 6 Caracterización de los intensificadores de molienda. ....	21
Tabla 7 Muestras a ensayar para la selección del intensificador. ....	23
Tabla 8. Proporciones a moler para el proceso intermolienda. ....	23
Tabla 9 Proporciones a moler para el proceso de molienda separada. ....	24
Tabla 10 Dosificación de intensificadores para la segunda etapa. ....	24
Tabla 11 Tolerancia admisible de roturas de muestras del Ensayo de resistencia a la compresión. ....	40
Tabla 12 Resultados del ensayo de granulometría por DRX. ....	46
Tabla 13 Resultados del Ensayo de Blaine. ....	48
Tabla 14 Resultados del Ensayo de compresibilidad. ....	50
Tabla 15 Resultados del Ensayo de determinación de la consistencia normal. ....	51
Tabla 16 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros. ....	54
Tabla 17 Resultados del Ensayo de tiempo de fraguado inicial y final. ....	56
Tabla 18 Resultados del ensayo de distribución de partículas por DRX de la segunda etapa. ....	57
Tabla 19 Resultados del Ensayo de Blaine en la segunda etapa. ....	59
Tabla 20 Resultados de Ensayo de compresibilidad en la segunda etapa. ....	60
Tabla 21 Resultados del Ensayo de consistencia normal en la segunda etapa. ....	61
Tabla 22 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros en la segunda etapa. ....	63
Tabla 23 Resultados del Ensayo de tiempo de fraguado inicial y final en la segunda etapa. ....	64

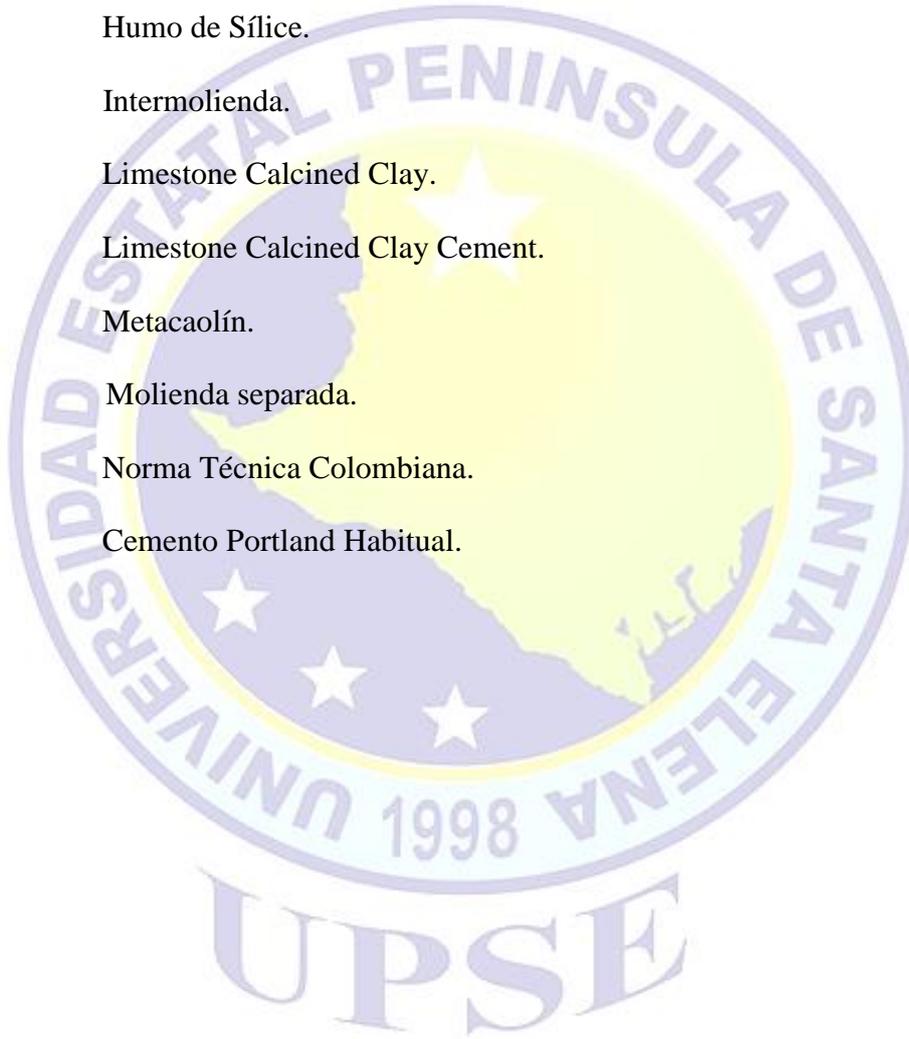
## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Clasificación de los ensayos a realizar.....	22
Gráfico 2 Comparación de resultados del ensayo de Blaine.....	48
Gráfico 3 Resultados del Ensayo de compresibilidad vs. Tiempo de molienda .....	51
Gráfico 4 Resultados del Ensayo de minicono. ....	52
Gráfico 5 Resultados del Ensayo de fluidez .....	53
Gráfico 6 Resistencias a la compresión vs edad de la muestra. ....	55
Gráfico 7 Resultados de tiempo de fraguado inicial y final.....	57
Gráfico 8 Comparación de resultados del Ensayo de distribución de partículas .....	58
Gráfico 9 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el Ensayo de Blaine. 60	
Gráfico 10 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el Ensayo de compresibilidad.....	61
Gráfico 11 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el ensayo de fluidez63	
Gráfico 12 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros .....	64
Gráfico 13 Comparación de resultados del Ensayo de tiempo de fraguado .....	65



## ABREVIATURAS

<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials.
<b>CP</b>	Cemento Portland.
<b>CV</b>	Ceniza Volante.
<b>EGAH</b>	Escoria Granulada de Alto Horno.
<b>HS</b>	Humo de Sílice.
<b>INT</b>	Intermolienda.
<b>LC2</b>	Limestone Calcined Clay.
<b>LC3</b>	Limestone Calcined Clay Cement.
<b>MK</b>	Metacaolín.
<b>MS</b>	Molienda separada.
<b>NTC</b>	Norma Técnica Colombiana.
<b>OPC</b>	Cemento Portland Habitual.



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

**TEMA:** “EFECTOS DE LOS AGENTES INTENSIFICADORES DE MOLIENDA EN LA ADICION MINERAL LC2”

**Autores:** Félix Mario Castillo Jumbo  
Ronny Gerardo Reyes Villamar

**Tutor:** Ing. Juan Garcés Vargas

**RESUMEN**

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal determinar los efectos que tienen los Agentes Intensificadores de Molienda en la Adición Mineral LC2 (arcilla calcinada y caliza), para lo cual se procedió a establecer la problemática de reducir las grandes cantidades de clínker empleados como componente principal en la fabricación de cemento, teniendo como propuesta la adición del mineral LC2, que consiste en una mezcla de arcilla calcinada y caliza, sustituyendo una buena parte del clínker. El LC2 es una adición mineral para la creación del cemento LC3 (arcilla calcinada, caliza y clínker). Se agregó datos estadísticos de años cercanos sobre la producción de cemento en el país; más aún, información sobre los reemplazos que se pueden usar en el cemento y los conceptos de los intensificadores de molienda. Se detalló el procedimiento según las distintas normas para ensayar las muestras y, así, conocer el efecto que tienen los intensificadores de molienda sobre la adición mineral, analizando los resultados obtenidos detenidamente según su finura, reología, propiedades físico-mecánicas, así como, el análisis de costos. Se determinó que esta adición mineral (LC2) con la adición de intensificadores de molienda es más factible económicamente que el cemento convencional y con mejores prestaciones.

Palabras claves: intensificador, molienda, reología, arcilla, caliza, clínker.

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

**THEME:** “EFFECTS OF MILLING INTENSIFYING AGENTS IN THE MINERAL ADDITION LC2”

**Authors:** Félix Mario Castillo Jumbo  
Ronny Gerardo Reyes Villamar

**Tutor:** Ing. Juan Garcés Vargas

**ABSTRACT**

The main objective of this research work is to determine the effects that the Intensifying Agents of Milling have on the LC2 Mineral Addition (calcined clay and limestone), for which the problem of reducing the large quantities of clinker used as a component was established principal in the manufacture of cement, having as proposal the addition of the LC2 mineral, which consists of a mixture of calcined clay and limestone, replacing a good part of the clinker. LC2 is a mineral addition for the creation of LC3 cement (calcined clay, limestone and clinker). Added statistical data for close years on cement production in the country; moreover, information on the replacements that can be used in cement and the concepts of grinding intensifiers. The procedure was detailed according to the different standards to test the samples and, thus, to know the effect that the grinding intensifiers have on the mineral addition, analyzing the results obtained carefully according to their fineness, rheology, physical-mechanical properties, as well as the analysis of costs. It was determined that this mineral addition (LC2) with the addition of milling intensifiers is more economically feasible than conventional cement and with better performance.

**Keywords:** intensifier, grinding, rheology, clay, limestone, clinker.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación consiste en el análisis de los efectos de los distintos intensificadores de molienda utilizados en la adición mineral LC2; esta adición, está compuesta por arcilla calcinada o metacaolín y caliza; como tal, para brindar mejores prestaciones como adición para la creación del cemento LC3 (arcilla calcinada, caliza, yeso y clínker). El LC2 es una adición que se ha creado en la India, y, en otros países donde aún se realizan estudios como Ecuador y Cuba para efectos de mejorar los cementos por tener mejores prestaciones, disminuir los efectos de contaminación; ya que, la cocción de la arcilla es de apenas 800 °C, disminuyendo las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y considerablemente la disminución de costos para la producción de este producto; ya sea, como adición para los cementos o la creación de cemento LC3.

Principalmente lo que se busca en esta investigación, es el análisis de los efectos que producen los agentes intensificadores en la adición LC2. Estos intensificadores tendrán como objetivo, optimizar la producción (tiempo de molienda para la producción del LC2); para lo cual, se ha escogido tres tipos de intensificadores de molienda que son: HEA2, MTDA 290 y MTDA 514, donde, se realizarán los respectivos estudios y ensayos de cada uno de ellos con la adición mineral LC2; para efecto, los ensayos de laboratorio a realizarse serán para reconocer su finura, reología, propiedades físico-mecánicas, y cambios provocados por los intensificadores. De esta manera, encontrar el agente intensificador más eficiente y con mejores prestaciones para la adición mineral, lo que mejoraría notablemente la calidad del producto.



# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACION

### 1.1. Planteamiento del problema.

En la actualidad se está buscando disminuir las grandes cantidades de Clinker empleadas como ingrediente principal para la fabricación de cemento. Una de las propuestas es la adición mineral LC2 que consiste en una mezcla de arcilla calcinada y caliza, sustituyendo una buena parte del clínker [1].

Tanto para obtener un cemento Portland normal y una adición mineral LC2, se debe pasar por un proceso final de molienda que no es más que la trituración de las partículas de clínker o adiciones minerales que previamente pasan por un proceso de mezclado, precalentado y cocido hasta obtener el mismo [19]. 1

Cabe recalcar que la finura del cemento es directamente proporcional a la resistencia del mismo, es decir, a mayor finura del cemento mayor resistencia y mejores resultados en sus propiedades [20]. 2

Se sabe que el proceso de molienda produce la fragmentación de la adición mineral LC2, pero, a la vez, este proceso genera cargas electrostáticas que provoca aglomeración de los finos y esto implica mayor consumo de recursos energéticos en el proceso de molienda para lograr obtener el tamaño de fino óptimo. Lo que se buscará en esta investigación será ensayar y obtener resultados empleando aditivos intensificadores de molienda que producen el efecto de anular o disminuir estas cargas electrostáticas y así evitar la aglomeración de los finos provocando un resultado positivo en la utilización de recursos energéticos y como el de obtener una mejor calidad de la adición mineral LC2 [13].

Se ensayarán varias dosificaciones de este aditivo intensificador de molienda en el proceso de la obtención de la adición mineral LC2 hasta llegar a establecer como conclusión la dosificación que dará mejores resultados en las propiedades de dicho material.

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto que causan los Agentes Intensificadores de Molienda en la Adición Mineral LC2?

## **1.3. Alcance del proyecto.**

El uso de intensificadores de molienda en la adición mineral LC2 provocará pastas y morteros cementicios de altas prestaciones y más económicas con una dosificación óptima del intensificador y a un tiempo de molienda específico.

La aplicación de los intensificadores de molienda evitará la aglomeración de las partículas debido a las cargas electroestáticas.

La fabricación del LC2 con intensificadores de molienda como sustituto del clínker reducirá las emisiones de CO<sub>2</sub> y por ende la contaminación que es causada por la gran demanda de recursos energéticos del mismo.

El LC2 representará un gran ahorro en la inversión tanto para el fabricante como para consumidor por su menor tiempo de molienda lo cual conlleva a una menor demanda de recursos energéticos y económicos.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Analizar el efecto de Intensificadores de Molienda en la Adición Mineral LC2.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Evaluar 3 intensificadores de molienda y elegir el indicado.
- Evaluar cómo influye en su finura, reología y propiedades físico-mecánicas en pastas y morteros.

- Evaluar los tiempos de molienda del polvo de cemento, con el uso de aditivos intensificadores de molienda.
- Determinar el costo real de producción del LC3.
- Reducir la contaminación producida por la fabricación del cemento convencional.

### **1.5. Justificación**

Las altas demandas de recursos energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por la producción de cemento teniendo como base el clínker, sin contar los recursos económicos que demanda todo este proceso, conlleva al uso de adiciones minerales alternativas para la fabricación de cemento y también optimizar su proceso. Por estas razones este proyecto de investigación busca obtener excelentes resultados en costos y tiempo en el proceso de molienda de LC2 con aditivos intensificadores.

Añadiendo a todo esto como resultado un gran ahorro para los productores o fábricas cementicias ya que se genera ahorro en la etapa de fabricación del LC2 y, por supuesto, beneficiará al consumidor tanto por su precio como por sus propiedades.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1. Fundamentación teórica.

#### 2.1.1. Antecedentes.

El cemento Portland es un alúmino silicato de calcio, patentado por J. Aspdin en 1824, y denominado Portland por su semejanza a una piedra que abunda en esa localidad de Inglaterra. Se obtiene por calentamiento incipiente (aproximadamente 1300 °C) proceso que consiste en tomar las rocas calcáreas y las arcillas en proporciones adecuadas y molerlas intensivamente, de manera que el compuesto de la **caliza** (CaO) se vincule íntima y homogéneamente con los compuestos de la **arcilla** (SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). El calentamiento se efectúa en hornos giratorios levemente inclinados de 3m de diámetro y 100 m de largo. El material obtenido denominado “clínker” se muele finamente adicionándole de un 2% a 3% de yeso para evitar que fragüe instantáneamente. La producción del clínker como ingrediente principal del cemento Portland demanda grandes cantidades de recursos energéticos, tanto por la demanda de altas temperaturas para su obtención y por la contaminación que la misma produce [7].

La adición mineral LC2 busca reducir la cantidad de clínker que se usa a la hora de crear el cemento ya que, el mismo, como se mencionó antes, requiere una gran demanda de recursos y, a la vez, produce mayores emisiones de CO<sub>2</sub> elevando la contaminación. El LC2 se obtiene de una manera más sustentable mediante la mezcla de arcilla calcinada a 800 °C y calizas [1].

Se debe tomar en cuenta que para obtener el LC2, también, se pasa por el proceso de fragmentación, es decir, por el molino o molienda el cual también sufre del fenómeno de aglomeración debido a la carga electrostática que afecta a los finos es por esa razón que se le agregará aditivos de molienda o intensificadores de molienda para anular dicha carga evitando la aglomeración y, por ende, menos tiempo y recursos para obtener el tamaño óptimo del producto final llamado LC2. Para el presente trabajo

de titulación se va a analizar el efecto que producen los intensificadores de molienda HEA2, MTDA290 y MTDA 514 en la adición mineral LC2.

En resumen, la adición mineral LC2 demanda menor cantidad de recursos para su producción en relación al cemento convencional; también, se busca mediante el uso de aditivos de molienda y superplastificantes optimizar el uso de recursos, aún más, mejorar sus propiedades.

### **2.1.2. Concepto de puzolanas**

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina. Según la norma NTC 30(11) se establece que las puzolanas como materiales naturales o artificiales contienen sílice y/o alúmina. No son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente y mezcladas con cal, se comportan como una composición mineralógica que pueden ser usadas como adiciones para cemento con porcentajes entre el 15% a 50% variando según el tipo de cemento y sus requerimientos [17].

### **2.1.3. Tipos de puzolanas empleadas**

Básicamente hay dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales.

Las puzolanas naturales, esencialmente, son cenizas de actividades volcánicas geológicamente recientes, en las que el constituyente amorfo es el vidrio, que se produce por el enfriamiento brusco de la lava, como las cenizas volcánicas, la escoria y la obsidiana.

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos agrícolas y sobre todo industriales, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más conocidas e importantes son: arcilla calcinada, cenizas de combustible pulverizado, cenizas volantes, escoria de altos hornos granulada y molida y ceniza de residuos agrícolas, como, cáscara de arroz, paja de caña de azúcar, donde se obtiene un residuo mineral rico en sílice y alúmina, cuya estructura depende de la temperatura de combustión [17].

## 2.2. Industria cementera en Ecuador

En Ecuador, el cemento es la principal materia prima para la construcción, actividad, que en los últimos cinco años se ha caracterizado por su crecimiento, aunque no ha sido constante por las situaciones adversas en el año 2009 y luego en el 2014 y 2015. Según la empresa pública cementera de Ecuador, en el 2013 esta actividad pasó a tener un ritmo de crecimiento del 10% anual [16].

Este desarrollo se explica por la canalización de recursos (públicos en su mayoría) para financiar obra pública y vialidad, elementos que en la actualidad son promocionados como uno de los mayores logros del Gobierno. Además, por el inesperado boom inmobiliario que se evidencia en todo el país. Sin embargo, a esta coyuntura se debe agregar un elemento clave para entender el predominio del cemento por sobre otros materiales: el estatus.

¿Estatus? Exactamente. En opinión de constructores y expertos en el área de la construcción, la mayor parte de la población ve en el cemento el material ideal para dejar un legado, así como para demostrar un incremento de su bienestar. Es así que, independientemente de los costos, la mayor parte de los ecuatorianos prefiere el hormigón (derivado del cemento) para establecer su hogar [15].

Dadas las condiciones se puede afirmar que el mercado cementero en Ecuador es fructífero para las empresas inmersas en él, más aún, si el número de competidores para la producción es escaso. Eso ha llevado al Ecuador a ocupar el tercer lugar en mayor consumo de cemento per cápita, solo detrás de Panamá y Trinidad y Tobago. Por eso ha comenzado a ser deficitario en cuanto a clínker, una materia prima clave en la producción de cemento. En el país la actividad está desarrollada por cuatro compañías, las dos más grandes y de gran escala de producción son multinacionales privadas, reconocidas mundialmente por su liderazgo en la fabricación de este producto (Holcim, Lafarge o UNACEM); mientras que, las públicas (Chimborazo y Guapán) sobreviven con los recursos que autogeneran y que se aliaron a partir del año 2014 formando la UCEM. [15]. (Ver figura 1)

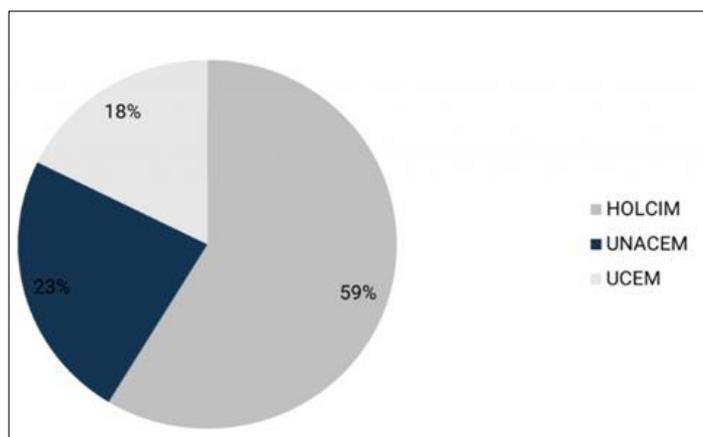


Figura 1 Producción porcentual de cemento en el año 2015  
Elaborado por: Inecyc.

En 2013 la actividad cementera llegó a producir una cantidad de 6.6 millones de toneladas métricas anuales llegando a una cifra récord; mostrando, en el 2014 una ligera caída con 6.5 millones de toneladas y en el 2015 con 5.8 millones de toneladas anuales [16]. (Ver tabla 1).

Tabla 1 Producción de cemento en toneladas hasta el año 2015.

Año	EMPRESAS				TOTAL CEMENTO
	HOLCIM	UNACEM	GUAPÁN	UCEM	
2010	3.328.877	1.176.458	432.966	348.824	5.287.125
2011	3.614.755	1.313.075	430.868	345.989	5.704.687
2012	3.915.512	1.346.059	442.962	327.823	6.032.356
2013	4.263.969	1.465.164	475.963	395.224	6.600.320
2014	3.993.611	1.452.512	1.069.501		6.515.624
2015	3.434.413	1.380.785	1.033.040		5.848.238

Elaborado por: Inecyc.

El **cemento** es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. Su nombre se deriva de caementum, que en latín significa “argamasa”, y procede a su vez del verbo caedere (precipitar). Es considerado el conglomerante más importante en la actualidad [2].

En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra **cemento** para designar un tipo de aglutinante específico que es el cemento hidráulico, de origen puzolánico, debido a que es el más comúnmente utilizado [2].

El cemento hidráulico es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados generalmente en hornos rotatorios a altas temperaturas y mezclados con yeso. La cocción de la mezcla se realiza a temperaturas entre 1.450 °C y 1.480 °C, y la masa homogénea obtenida se denomina clínker, el cual, después de ser triturado finamente, se convierte en el componente básico para la fabricación del cemento. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. Es mayormente empleado en la construcción, justamente, por esa solidez que reviste como adherente y aglutinante [2].

### 2.3. Componentes principales del cemento.

La composición química de las materias primas utilizadas en la fabricación del cemento hidráulico se efectúa con varios elementos, ellos son:

- Óxido de calcio (CaO) aportado por la cal.
- Dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), el cual se encuentra en la arcilla junto con el óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y el óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y la adición del regulador del fraguado que es el yeso, el cual contiene trióxido de azufre (SO<sub>3</sub>).

En la etapa de sintetización (tratamiento térmico a temperatura menor que el punto de fusión) durante la fabricación del clínker, se producen los componentes principales o potenciales que constituyen el 95% de dicho material, los cuales se conocen como minerales, debido a las impurezas de las materias primas. Al silicato tricálcico se le conoce como Alita (C3S), al silicato dicálcico se le denomina Belita (C2S), el ferrito aluminato tetracálcico (C4AF) es la Ferrita, y Celita al aluminato tricálcico (C3A).

El motivo de añadir yeso al cemento es para retardar (controlar) el fraguado, ya que, si solo se muele el clínker y los demás componentes, al mezclarlo con el agua fraguaría casi inmediatamente, y no permitiría ni su manipulación ni su instalación. La retardación de la hidratación inicial del cemento depende de la presencia de los iones SO<sub>4</sub> [2].

## **2.4. Tipos de cemento**

Se pueden establecer dos tipos básicos de cemento:

De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla calcinada y posteriormente molida que tienen la propiedad de endurecerse después de ponerse en contacto con el agua, mineral de hierro, materiales pétreos naturales como la piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.

De origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico. Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir las composiciones [3].

### **2.4.1. Cemento de endurecimiento rápido**

El cemento de endurecimiento rápido tiene gran relación con el cemento Portland habitual (OPC). Está compuesto con un mayor contenido de Alita (C3S) y su textura es mucho más fina. De esta forma suministra una mayor proporción de fuerza y mayor resistencia en su etapa inicial en comparación al cemento Portland habitual (OPC). La tenacidad y el comportamiento de este cemento a solo tres días de haber sido usado, es casi igual a la resistencia que ofrece un cemento común a los siete días de haberlo usado, como lo es el cemento Portland habitual (OPC), solo se necesita ser mezclado con agua y listo [3].

La principal ventaja de utilizar este tipo de cemento de endurecimiento rápido es que el revestimiento para encofrar se puede retirar antes de los días habituales y ser reutilizados en otras áreas necesarias, lo que te ahorra tiempo y dinero. Este cemento se logra utilizar en el batidor de hormigón para ser usado en carreteras, elementos prefabricados, edificaciones, entre otros [3].

#### **2.4.2. Cemento de bajo calor**

El cemento de bajo calor es elaborado por la proporción de Belita (C2S), reduciendo el contenido de Alita (C3S) y Celita C3A. Este tipo de cemento es poco reactivo y su período de fraguado inicial es mucho mayor que el cemento Portland habitual (OPC). El cemento de bajo calor se utiliza especialmente en la construcción de hormigón en masa [3].

#### **2.4.3. Cemento resistente al sulfato**

El cemento resistente al sulfato se produce disminuyendo el contenido de Celita (C3A) y Felita (C4AF). Posee una excelente resistencia a la agresión del sulfato. El cemento resistente al sulfato se emplea en la reconstrucción de cimientos en los suelos que contiene proporciones altas de sulfato. De esta forma la fijación y durabilidad será superior al utilizar un cemento común [3].

#### **2.4.4. Cemento blanco**

El cemento blanco es conocido como un tipo de cemento Portland común de color blanco puro y tiene usualmente la misma contextura y la misma resistencia que el cemento Portland habitual (OPC). Pero para poder obtener ese color blanco, se le reduce óxido de hierro haciendo que la mezcla tome ese tono especial, utilizado para aquellos espacios delicados. Los elementos principales utilizados para elaborar este tipo cemento son la arcilla china y la piedra caliza [3].

Este cemento, debido a su tono blanco, se usa especialmente para trabajos decorativos de interiores y exteriores como grafiado externo de edificios, pavimentos, revestimientos de losas, productos de hormigón artístico, atajos de jardines, piscinas, baños entre otros [3].

#### **2.4.5. Cemento Portland puzolana**

El cemento Portland puzolana se origina por pulverización conjunta, del portland y puzolana con incremento de sulfato de calcio o yeso, su composición es íntima y semejante al cemento Portland, pero el cemento puzolana es fino [3]. Genera menor

calor de hidratación y posee una mayor fuerza y resistencia al aplicarse con elementos químicos en comparación al cemento Portland habitual (OPC). El hormigón elaborado con cemento Portland puzolana (PPC) es considerado como el material principal y adecuado para la construcción dentro del agua, labores hidráulicas y para edificaciones de hormigón en masa [3].

#### **2.4.6. Cemento hidrofóbico**

El cemento hidrofóbico se elabora añadiendo elementos químicos repelentes al agua en el cemento. De este modo el cemento depositado no se maltrata durante el monzón. Se afirma que este tipo cemento no es afectado cuando es usado en los días lluvias. El cemento hidrofóbico se usa especialmente para la reconstrucción de estructuras de agua tales como tanques de agua, presas, estructuras de retención de agua, aliviaderos entre otros [21].

### **2.5. Composición mineralógica del cemento portland, la arcilla calcinada, caliza y yeso.**

#### **2.5.1. Composición mineralógica de la arcilla calcinada**

Arcilla calcinada o metacaolín es un material cementante suplementario para la elaboración de productos cementicios con propiedades puzolánicas. Se forma su activación por silicato tricálcico (C3S), aluminato tricálcico (C3A) y cemento Portland ordinario [10].

El metacaolín (MK) es una fase de transición poco cristalizada obtenida calcinando caolín en el rango de temperatura de 700 °C a 800 °C. La activación puzolánica del metacaolín se da por varios activadores esenciales (hidróxido de calcio, sulfatos e hidróxido alcalino). Se ha demostrado en aquellos estudios que su reacción con hidróxido de calcio produce productos muy similares en composición y estructura a los del cemento, que pueden ser sustituidos en peso en el cemento Portland ordinario. Esta arcilla debe estar compuesta de mineral caolín de grado bajo de pureza para que estas cumplan los parámetros en la obtención de arcillas calcinadas como minerales cementicios ordinarios [10].

*Tabla 2 Composición química de la arcilla caolinítica proveniente del área minera La Pirámide.*

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

*Fuente: Cementera Atenas- Ensayo de DRX*

### **2.5.2. Composición mineralógica del cemento portland**

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.

*Tabla 3 Composición mineralógica del clínker del cemento Atenas.*

<b>Compuesto</b>	<b>Porcentaje</b>
CaO	58,9
SiO <sub>2</sub>	17,86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,89
SO <sub>3</sub>	3,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,28
MgO	0,88
Na <sub>2</sub> O	0,58
K <sub>2</sub> O	0,29

TiO <sub>2</sub>	0,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,21
Cl	0,29
SrO	0,09
ZrO <sub>2</sub>	77 PPM
Álcalis	0,78

*Fuente: GRAIMAN – Cementera Atenas- Ensayo DRX*

### 2.5.3. Composición mineralógica del yeso

El yeso es el encargado de controlar el tiempo de fraguado permitiendo manipular la mezcla antes de que entre en la etapa de endurecimiento. Dentro de la composición mineralógica se espera tener un porcentaje de Gypsum superior al 90% ya que es el encargado de dar las características antes mencionadas. Es por esto que si las fases de Basanita y Anhidrita aumentan considerablemente es debido a la cantidad de agua, que adherida al sistema es escasa y de baja calidad.

*Tabla 4 Composición de mineralógica del yeso de la cementera Atenas.*

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

*Fuente: GRAIMAN – Cementera Atenas- Ensayo DRX*

#### 2.5.4. Composición mineralógica de la caliza.

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

*Tabla 5 Composición mineralógica de la caliza de la cementera Atenas.*

<b>Compuesto</b>	<b>Porcentaje</b>
Calcita (CaCO <sub>3</sub> )	94,61
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	5,39

*Fuente: GRAIMAN – Cementera Atenas- Ensayo DRX*

## 2.6. Materiales de reemplazo

### 2.6.1. Ceniza volante

La ceniza volante es un material puzolánico subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía. Cuando el carbón se quema a una temperatura entre 1250°C y 1600°C, los materiales no combustibles colisionan para formar unas pequeñas esferas vítreas de sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros constituyentes minoritarios. Las propiedades físicas y químicas de la ceniza volante dependen de la composición de la fracción inorgánica del carbón, el grado de pulverización, la historia térmica y las condiciones de oxidación. La ceniza volante consiste de partículas finas de morfología esférica, que pueden ser sólidas o huecas y de naturaleza amorfa. El material carbonoso en la ceniza volante está compuesto de partículas angulares. [9]

De acuerdo a la composición química se distinguen dos clases de ceniza volante definidas por la norma ASTM C618-8923: la de bajo contenido de calcio, llamada Clase F y la de alto contenido de calcio, llamada Clase C. La ceniza clase F se deriva del carbón tipo antracita o bituminoso, es pobre en óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO) y relativamente rico en dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>); mientras que la clase C del carbón sub-bituminoso o lignita, contiene menos dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que la clase F, pero altas

cantidades de óxido de calcio (CaO). La ceniza volante puede estar compuesta por fases minerales como lo son el cuarzo, ilita, siderita y mulita, además de presentar una fracción amorfa constituida por SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO-MgO. [9]

El tamaño y la morfología esférica, la composición química y la fracción amorfa de la ceniza volante modifican el desarrollo de las propiedades mecánicas, químicas y microestructurales de pastas de cemento portland, concretos y morteros. [9]

En pastas de cemento portland, las partículas finas y esféricas de ceniza volante incrementan la resistencia a la compresión a edades tardías, debido al efecto de empaquetamiento de la ceniza volante fina; las partículas pequeñas y esféricas llenan los poros e incrementan la densidad. Además, la presencia de partículas muy finas y de gran área superficial favorece la reactividad puzolánica de la ceniza volante. [9]

Los factores que influyen la reacción puzolánica de la ceniza volante en pastas de cemento Portland son su fracción amorfa, su composición, el pH del medio, el área superficial de las partículas y la disposición de hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) o Protlandita, producto de hidratación del cemento Portland. También son importantes la temperatura de curado y el nivel de reemplazo de ceniza volante, pues tienen un efecto en el proceso de hidratación, los productos de hidratación y el desarrollo de la microestructura de las pastas de cemento Portland. [9]

Por ejemplo, se ha publicado que a temperaturas por debajo de 35°C, durante la hidratación inicial de pastas de cemento Portland con ceniza volante (CV), la fracción amorfa de la ceniza volante no ha reaccionado aún con el hidróxido de calcio, la reacción sucede hasta que la ceniza volante ha generado sitios de nucleación y la hidratación de la Alita se acelera.

Debido al consumo del hidróxido de calcio por la reacción puzolánica de la ceniza volante, la hidratación del silicato dicálcico (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) y el alúmino ferrita tetracálcico (Ca<sub>2</sub>AlFeO<sub>5</sub>) del cemento Portland se retrasa. En base al análisis de evolución de calor de hidratación, la adición de ceniza volante no retrasa el período de aceleración de la hidratación del cemento Portland, sin embargo reduce el calor de hidratación. [6]

Los productos de hidratación formados por la reacción puzolánica de la ceniza volante en pastas de cemento Portland llenan los poros intersticiales reduciendo la permeabilidad de la matriz silicato de calcio hidratado y produciendo un gel silicato de calcio hidratado con una relación molar  $\text{CaO/SiO}_2$  diferente al silicato de calcio hidratado ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ) de la hidratación del cemento Portland. [9]

### 2.6.2. Metacaolín

Los caolines son rocas que están formadas, fundamentalmente, por minerales del grupo del caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. La caolinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) corresponde a un filosilicato formado por una capa de tetraedros de silicio combinada con otra capa de octaedros de alúmina a través de grupos hidroxilo que están compartidos entre las dos láminas [8].

El comportamiento de las arcillas minerales bajo calentamiento depende de su estructura y grado de cristalinidad. Por encima de  $100^\circ\text{C}$ , las arcillas minerales pierden la mayoría del agua adsorbida. La temperatura a la cual la caolinita pierde agua por deshidroxilación está en el rango de  $500\text{-}800^\circ\text{C}$  y el producto generado a partir de esta activación térmica o calcinación se le llama metacaolín [8].

Este metacaolín puede utilizarse como material cementante suplementario y contribuye al desarrollo de resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. El porcentaje óptimo de reemplazo de cemento con metacaolín está asociado con los cambios en la naturaleza y proporción de los diferentes productos de reacción, temperatura y tiempo de reacción. La reacción de hidratación depende del nivel de actividad puzolánica del MK debido a su tamaño de partícula, composición química y fracción amorfa [8].

En el proceso de hidratación del metacaolín se forma un gel (silicato de Calcio Hidratado) adicional al producido por el cemento Portland, junto con productos cristalinos, que incluyen aluminatos y silicoaluminatos de calcio hidratados ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,

C4AH13 y C3AH6). Los productos cristalinos dependen principalmente de la cantidad de hidróxido de calcio disponible para la reacción y de la temperatura de curado [8].

### 2.6.3. Humo de sílice

Los términos de humo de sílice condensada, microsílice, humo de sílice y sílice volatilizada son usados frecuentemente para describir al subproducto extraído de los gases de los hornos de producción del silicio, ferrosilicio y otras aleaciones de silicio. El humo de sílice se produce durante la reducción de cuarzo a alta temperatura en un horno de arco eléctrico [9].

El humo de sílice (HS) reacciona con el hidróxido de calcio liberado para producir silicatos y aluminosilicatos de calcio hidratados. Estos incrementan la resistencia y reducen la permeabilidad ya que densifican la matriz del concreto, mediante la formación de una zona de transición más compacta y homogénea [9].

El humo de sílice, tiene una gran área superficial y un alto contenido en dióxido de silicio. Se encontró que es mucho más reactiva que la ceniza volante o la escoria granulada de alto horno, esta gran reactividad incrementó el grado de hidratación de la fracción del silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) del cemento, por lo que se creó más hidróxido de calcio, pero se estabilizó a relaciones normales después de la primera semana de curado [9].

El humo de sílice está disponible comercialmente en varias formas, no densificada, densificada, micro pulverizado y en pasta. Las diferencias entre estas formas están relacionadas con la forma y tamaño de las partículas y no afecta la composición química o la reacción del material.

Debido a la naturaleza y tamaño de partícula del humo de sílice, una pequeña adición a una mezcla de concreto produce cambios en las propiedades físicas y químicas. Se reportó que el principal efecto fue sobre la trabajabilidad de la mezcla y que el material fino en la mezcla provocó un incremento en la cohesión del concreto y en la demanda de agua para mantener la mezcla y su trabajabilidad [9].

#### **2.6.4. Escoria granulada de alto horno.**

La escoria granulada de alto horno (EGAH) es un material hidráulico latente subproducto de la producción de hierro. Durante el proceso, el óxido de fierro, la caliza y el mineral de carbón son calentados hasta 1500°C hasta obtener dos productos fundidos: el arrabio y la escoria. La escoria es más ligera y flota encima del arrabio fundido. El proceso de granulación se lleva a cabo enfriando la escoria mediante inyectores de agua a alta presión. Esto enfría rápidamente la escoria y forma partículas granulares de un 95% aluminosilicatos de calcio de naturaleza amorfa.

El uso de la escoria granulada de alto horno (EGAH) en el cemento y concreto ofrece una variedad de ventajas: mejora la compactación para el vaciado del concreto; incrementa la resistencia y durabilidad; reduce la permeabilidad; desarrolla alta resistencia a la penetración de cloruros, al ataque de iones de sulfato y a la reacción álcali-sílice; posee un bajo calor de hidratación; y, es químicamente más estable.

Los cementos compuestos hechos de la combinación de cemento Portland con escoria granulada de alto horno (EGAH) pueden ser producidos por la molienda de clínker y escoria granulada de alto horno en un molino de bolas, o por la mezcla de cemento Portland y escoria granulada de alto horno como polvos separados. Durante la molienda se pueden generar diversos problemas debido a que la escoria es más dura que el clínker, lo que provoca que exista una molienda preferencial del clínker. Una buena distribución de partículas en ambos materiales favorece el desarrollo de mejores propiedades mecánicas [14].

#### **2.7. Aditivos intensificadores de molienda**

Los aditivos intensificadores de molienda tienen como objetivo principal solucionar varios problemas que se presentan a la hora de la producción de clínker para el cemento entre estos se puede mencionar la gran demanda energética que requiere para el proceso de molienda y directamente esto ocasiona grumos o terrones de cemento que no siempre terminan de molerse en esta etapa y esto produce problemas de heterogeneidad en las mezclas [12]. El empleo de aditivos de molienda ofrece una solución a todos estos problemas reduciendo el tiempo necesario para obtener una

determinada finura, optimizando la distribución granulométrica del producto final y reduciendo considerablemente la formación de grumos [11].

El principio de estos aditivos es la reducción de las fuerzas superficiales entre partículas es decir tienen propiedades tenso activas dando como resultado la reducción de la tendencia de formación de grumos, reducción de las demandas de agua para pastas, hormigones, y morteros. Estos factores juntos se traducen en mejoras en las características de morteros y hormigones incluso en sus propiedades mecánicas [13].

## **2.8. Hipótesis de la investigación**

El uso de intensificadores de molienda en las pastas de cemento con LC2 mejorará las propiedades físico-mecánicas y la reología de las mismas sobre las reacciones de hidratación.

Esta adición mineral LC2 en el cemento promete generar pastas y hormigones de altas prestaciones a un costo más económico y con menos contaminación en su fabricación.

## **2.9. Variables de la investigación**

Analizando los componentes principales del tema, se puede establecer variables de causa-efecto a partir de las variables independientes y dependientes:

### **Variables independientes:**

- Uso de intensificadores de molienda.

### **Variables dependientes:**

- Propiedades físico - mecánicas de las pastas.
- La reología de las pastas.
- La finura del LC2.

## **CAPÍTULO III**

### **PROPUESTA**

#### **3.1. Planificación y selección de materiales.**

En la planificación y desarrollo para la investigación se procedió a realizar un cronograma referencial, que sirvió para la organización conjunta en el desarrollo experimental de los trabajos efectuados y las fechas en que se ejecutaron quedando de la siguiente manera:

- Selección del aditivo intensificador de molienda realizando ensayos de 15 min y 20 min de molienda para cada muestra con 3 tipos de intensificadores.
- Ensayos de molienda con el aditivo seleccionado y establecer el tiempo óptimo de molienda con el mismo.
- Ensayos para analizar la reología y las propiedades físico-mecánicas.

##### **3.1.1. Planificación del cronograma de actividades para los ensayos respectivos en la ciudad de Cuenca**

El método experimental para el desarrollo de los ensayos a realizar se debe dividir en dos etapas:

##### **Etapas**

###### **Etapas**

La etapa se basa en realizar los respectivos ensayos de finura, reología y propiedades físico- mecánicas para determinar qué intensificador de molienda se escogerá teniendo en cuenta que son 3 tipos diferentes de intensificador denominados MTDA 290, MTDA 514 y HEA 2. (Ver tabla 6).

Para esta etapa de investigación del presente trabajo de titulación, se considera las dosificaciones sugeridas para los tres tipos de intensificadores de molienda que se encuentran detalladas en la tabla 6 y para optimizar los resultados finales se escoge la media de las dosificaciones propuestas para realizar las respectivas moliendas.

Tabla 6 Caracterización de los intensificadores de molienda.

	<b>Principio de acción</b>	<b>Dosificación</b>	<b>Principio activo</b>	<b>Componente</b>
MTDA 290	Reducción de las fuerzas de atracción entre las partículas para promover el acrecentamiento de la productividad y reducir el consumo de energía.	0,02% a 0,06% en relación al peso del cemento, o de 200 a 600 gramos de aditivo por ton. de cemento producido.	Mezcla de alcanoláminas y poliglicoles, con naturaleza polar	nitrilotrietano
MTDA 514	Reducción de las fuerzas de atracción entre las partículas para promover el acrecentamiento de la productividad y reducir el consumo de energía.	0,02 a 0,06% en relación al peso del cemento, o de 200 a 600 gramos de aditivo por ton. de cemento producido.	Mezcla de alcanolaminas y poliglicoles, con naturaleza polar.	oxidietanol
HEA 2	Reducción de las fuerzas de atracción entre las partículas para promover el acrecentamiento de la productividad y reducir el consumo de energía	0,03 a 0,06% en relación al peso del cemento, o de 300 a 600 gramos de aditivo por ton. de cemento producido.	Mezcla de alcanolaminas y poliglicoles, con naturaleza polar.	

Fuente: GRAIMAN - Cementera Atenas.

Para la elaboración de las moliendas, se planifica realizar dos procesos de molienda que son:

El primero, es de molienda separada que consiste en moler la arcilla calcinada, la caliza y el segundo proceso es de intermolienda que consiste en moler la arcilla calcinada, la caliza, el clínker y yeso ambos procesos se le adicionará las dosificaciones de intensificadores seleccionadas obteniendo diferentes lotes de muestras que posteriormente se realizarán ensayos de: finura, propiedades mecánicas y reología de pastas y morteros; todos, clasificados como se muestra en el siguiente gráfico.

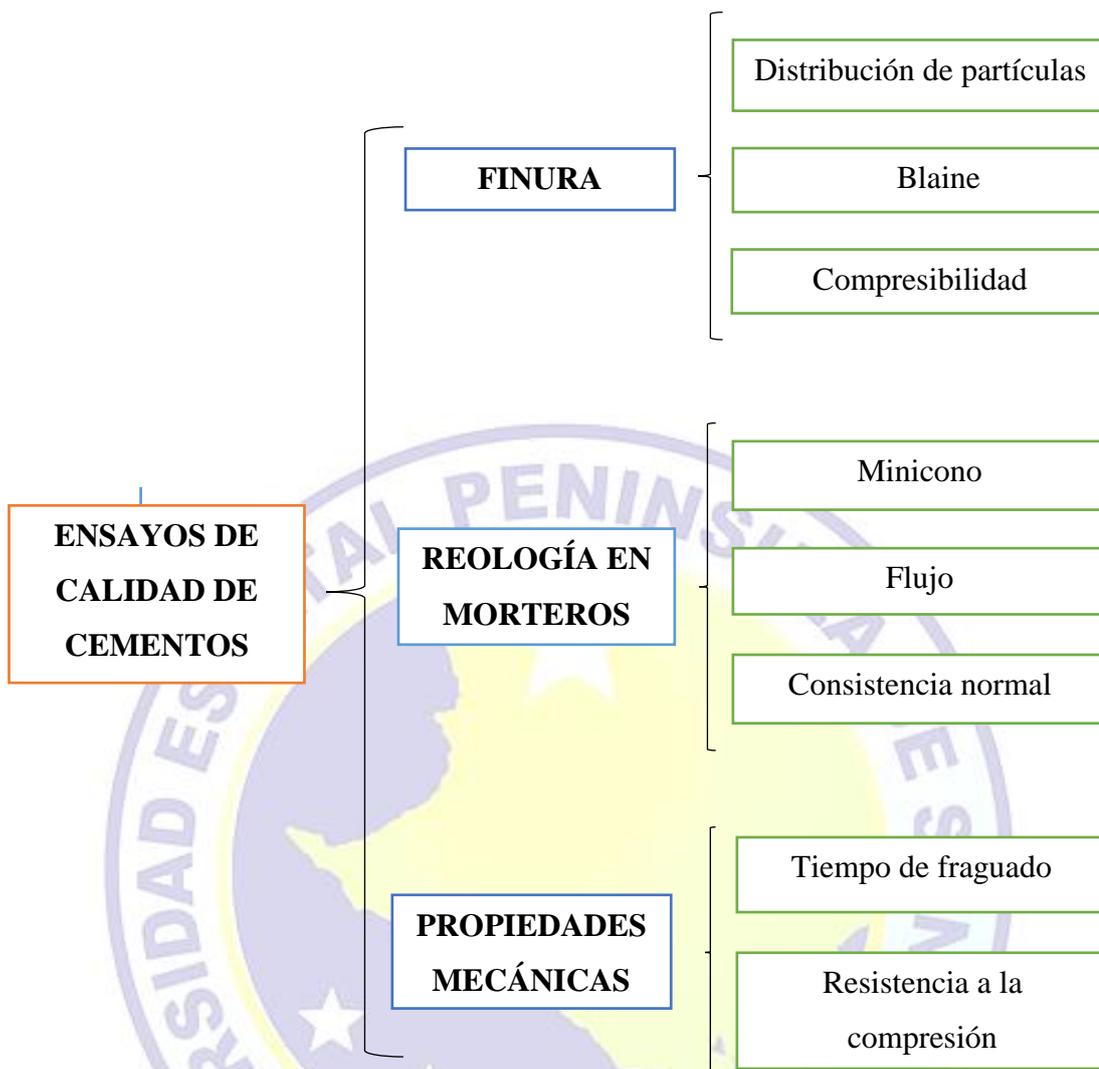


Gráfico 1 Clasificación de los ensayos a realizar

. Fuente: GRAIMAN - Cementera Atenas.

Cada proceso de producción para obtener los diferentes lotes de muestras tendrá un tiempo molienda variable de 15 y 20 minutos para cada intensificador de molienda (HEA2, MTDA 290, MTDA 514).

La fabricación de las muestras se dividirá en dos procesos de molienda; la primera, será mediante intermolienda; y, la segunda, por molienda separada, se debe agregar el intensificador respectivo para la molienda de cada muestra según la dosis indicada en la tabla 7; es decir, que serían 6 muestras por el proceso de intermolienda de 15min y 20 min, respectivamente, y 6 muestras por el proceso de molienda separada, igualmente, de 15 min y 20 min. Es decir que se realizarán 12 moliendas en diferentes condiciones.

Tabla 7 Muestras a ensayar para la selección del intensificador

No.	Serie	Tiempo (min)	Intensificador	Dosis
1	LC2 MS	15	MTDA290	0.040%
2	LC2 MS	20	MTDA290	0.040%
3	LC2 MS	15	MTDA 514	0.040%
4	LC2 MS	20	MTDA 514	0.040%
5	LC2 MS	15	HEA 2	0.045%
6	LC2 MS	20	HEA 2	0.045%
7	LC3 INTER	15	MTDA290	0.040%
8	LC3 INTER	20	MTDA290	0.040%
9	LC3 INTER	15	MTDA 514	0.040%
10	LC3 INTER	20	MTDA 514	0.040%
11	LC3 INTER	15	HEA 2	0.045%
12	LC3 INTER	20	HEA 2	0.045%

Fuente: GRAIMAN - Cementera Atenas.

A continuación, se tabula las proporciones que se usarán en los dos procesos de molienda para obtener los lotes de las muestras a analizar en el presente trabajo de titulación que son recomendadas por la cementera Atenas:

Tabla 8. Proporciones a moler para el proceso intermolienda.

		Clínker	Arc. Calcinada	Caliza	Yeso	Total
<b>Cemento Portland</b>	50.00%	47.00%	0.00%	0.00%	3.00%	50.00%
<b>LC2</b>	50.00%	0.00%	31.50%	15.00%	3.50%	50.00%
						<b>100.00%</b>

Fuente: GRAIMAN - Cementera Atenas.

Tabla 9 Proporciones a moler para el proceso de molienda separada.

	<b>Total a moler</b>	<b>Clínker</b>	<b>Arc. Calcinada</b>	<b>Caliza</b>	<b>Yeso</b>	<b>Total</b>
<b>LC2 2:1</b>	2.5 kg	0.00%	63.00%	30.00%	7.00%	100.00%
<b>Cemento Portland</b>	10 kg	89.00%	0.00%	5.00%	6.00%	100.00%

Fuente: GRAIMAN - Cementera Atenas.

## Etapa 2

Después de haber realizado los ensayos a las muestras obtenidas de los diferentes lotes de producción detallados en la tabla 7 se seleccionará el intensificador de molienda que obtenga los mejores resultados en los distintos parámetros de los ensayos y con el intensificador seleccionado se fabricarán nuevos lotes de muestras en el que se procederá a encontrar el tiempo de molienda óptimo en que alcance una finura establecida. Esto se comprobará mediante el Ensayo de granulometría laser.

Para esta etapa se deben realizar 2 muestras de intermolienda y 2 de molienda separada con dosis de 300 g y 450 g por tonelada de intensificador como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10 Dosificación de intensificadores para la segunda etapa.

<b>No.</b>	<b>Serie</b>	<b>Intensificador</b>	<b>Dosis</b>
1	MS	ESCOGIDO (HEA2)	300 gr por ton.
2	MS	ESCOGIDO (HEA2)	450 gr por ton.
3	INTER	ESCOGIDO (HEA2)	300 gr por ton.
4	INTER	ESCOGIDO (HEA2)	450 gr por ton.

Fuente: Investigación propia.

Las proporciones a moler están detalladas de las tablas 8 y 9 tanto para el proceso de intermolienda y molienda separada. Se repetirán los ensayos de finura, reología y propiedades mecánicas de pastas y morteros especificadas en el gráfico 1 para

determinar todos los efectos que produce el intensificador de molienda escogido a un tiempo óptimo de molienda.

### 3.2. Molienda de las distintas muestras

Esta etapa se basa en moler o triturar en proporciones reducidas indicadas en las tablas 8 y 9 en un molino de laboratorio que basa su funcionamiento en la rotación y abrasión ocasionada por las bolas de acero que trae en su interior, las mismas que muelen el material hasta conseguir un polvo con las granulometrías específicas en un tiempo determinado.



*Figura 2 Molino del laboratorio de la cementera Atenas.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Para la etapa de molienda separada se usan las proporciones indicadas en la tabla 9 y para intermolienda las proporciones indicadas en la tabla 8 en las cuales se molían alrededor de 12 kg para cada molienda por la capacidad del molino y para alcanzar la cantidad suficiente para los distintos ensayos de aceptabilidad que son los de: finura, reología y propiedades mecánicas.



*Figura 3 Intensificador de molienda MTDA 290  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Luego de cada molienda se procede a retirar la tapa del molino y colocar otra tapa para la evacuación del material molido. Antes de colocar la otra tapa se verifica que las bolas no tengan mucho material adherido a ellas en caso de observar gran cantidad de material adherido a las bolas se deberá prolongar el tiempo de la molienda. Una vez retirado el material molido se efectúa la clasificación del mismo para los posteriores ensayos.



Figura 4 Material LC2 una vez realizada la molienda  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.



Figura 5 Muestras por el proceso intermolienda clasificadas.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.

### 3.3. Ensayos para determinar los requisitos de desempeño de un cemento

#### 3.3.1. Ensayos que determinan la finura del cemento

*Ensayo de granulometría láser para obtener la distribución de partículas.* - La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula a partir de la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas. Las partículas grandes dispersan la luz en ángulos

pequeños en relación con el rayo láser, y las partículas pequeñas dispersan la luz en ángulos grandes. Luego, se analizan los datos de la intensidad de dispersión angular para calcular el tamaño de las partículas responsables de crear el patrón de dispersión, utilizando la teoría Mie de la dispersión de luz. El tamaño de partícula se registra como un diámetro de esfera equivalente al volumen [19].

#### **Equipos y materiales:**

- Aparato de análisis de distribución de partículas por espectrometría láser.
- Muestra a ensayar.
- Bandeja.

#### **Procedimiento:**

Una vez separada la muestra del material a ensayar se gradúa el aparato a los parámetros de dispersión para lograr los resultados que se requieren. Cabe recalcar que para este ensayo se usan muestras secas para que el mismo sea óptimo.

Se coloca la muestra en el aparato y se procede a iniciar el ensayo que está basado en el principio explicado anteriormente. Una vez ensayada la muestra el software del equipo se encarga de procesar los datos y dar los resultados digitalmente o se los puede imprimir para tenerlos físicamente.

***Ensayo de Blaine según norma INEN 196.***-Esta norma establece el método de ensayo para determinar la finura del cemento, en términos de superficie específica, expresada como el área total de la superficie en centímetros cuadrados por gramo o en metros cuadrados por kilogramo de cemento, utilizando el aparato Blaine de permeabilidad al aire.

#### **Equipos y materiales**

- Aparato de Blaine de permeabilidad de aire.
- Émbolo.
- Celda de permeabilidad.

- Disco.
- Papel filtro.
- Manómetro.
- Cronómetro.
- Balanza.

### **Procedimiento:**

Para la preparación de la camada de cemento, asentar el disco perforado sobre la base en la celda de permeabilidad, con la cara inscrita o marcada hacia abajo. Colocar un disco de papel filtro sobre el disco de metal y presionar los bordes hacia abajo con el pisón que tiene un diámetro ligeramente menor que aquel de la celda.

Para realizar los pesos de las muestras a ensayar, deben efectuarse con una balanza de aproximación de 0,001 g; se mide la cantidad de cemento determinada y colocarla en la celda respectivamente. Golpear ligeramente el lado de la celda con objeto de nivelar la camada de cemento.

Es considerable colocar un disco de papel filtro encima del cemento y comprimir el cemento con el émbolo hasta que el collarín del émbolo esté en contacto con el borde superior de la celda. Extraer lentamente el émbolo una pequeña distancia; gire alrededor de 90°, volver a presionar y retirarlo lentamente. Para cada determinación use discos de papel filtro nuevo.



*Figura 6 Filtro metálico para Ensayo de Blaine.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*



*Figura 7 Pisón para colocar el papel filtro y compactar ligeramente la muestra.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

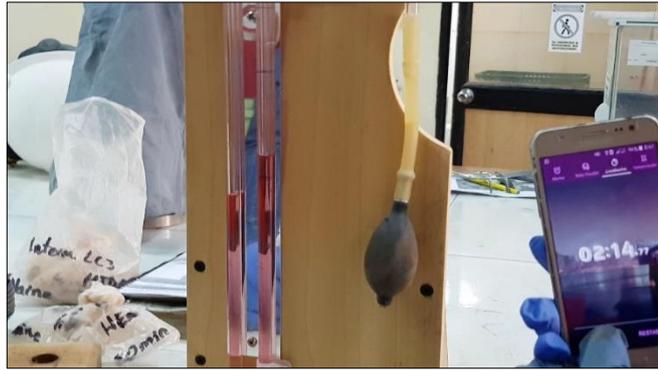
Acoplar directamente y de forma precisa la celda (recipiente metálico tubular) de permeabilidad conectada al tubo de manómetro, asegurándose que se haya obtenido una conexión hermética.



*Figura 8 Cápsula colocada herméticamente en el aparato para Ensayo de Blaine.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Evacuar lentamente el aire en el brazo del manómetro de tubo U hasta que el líquido alcance la marca superior, en ese momento cerrar la válvula firmemente. Arrancar el cronómetro cuando la base del menisco del líquido del manómetro alcance la segunda marca y pararlo cuando la base del menisco del líquido alcance la tercera marca de la parte inferior.

Luego de este proceso, se anota el intervalo de tiempo medido y registrarlo en segundos. Se recomienda, realizar tres tomas de tiempo para cada muestra y obtener un promedio, básicamente esto nos permitirá calcular la permeabilidad del cemento o de la adición mineral utilizada para cada una de las muestras en una superficie determinada.



*Figura 9 Registro de tiempo para datos del Ensayo.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

***Ensayo de índice de compresibilidad.***- Este Ensayo busca determinar el índice o porcentaje de compresibilidad de un polvo de cemento mediante su peso volumétrico suelto o sin compactar y su peso volumétrico compactado.

**Equipos y materiales:**

- Recipiente en forma de cilindro con volumen establecido.
- Muestras de cementos a ensayar.
- Enrasador.
- Pisón o compactador.

**Procedimiento:**

Para comenzar el ensayo se debe preparar la muestra de cemento a utilizar e ir colocando o vaciando el cemento en el recipiente de manera que este caiga libremente en estado suelto hasta lograr llenar el recipiente; con el enrasador quitar los excesos y grumos, posterior a esto colocar el recipiente lleno en la balanza y anotar el peso, este será el peso volumétrico suelto.

Luego de esto, se repite el paso de vaciado, pero en capas; se recomienda que sea de 3 o 4 capas compactadas con el pisón pasándolo de 4 a 5 veces; una vez llenado el recipiente se procede a enrasar y colocar en la balanza. Se anota el peso que será el peso volumétrico compactado.

Para obtener el resultado del porcentaje de compresibilidad se usa la siguiente fórmula:

Peso volumétrico compactado

### 3.3.2. Ensayos que determinan la reología de las pastas y morteros

*Determinación de la consistencia normal según la norma INEN 157.-* Este Ensayo busca determinar la cantidad exacta de agua en la que el material logre una consistencia normal basada en ciertos parámetros establecidos.

#### **Procedimiento**

1) Amasado de la pasta de cemento.

Se pesan en una balanza 650 g de cemento con una precisión de  $\pm 1$  g y una cantidad de agua, por ejemplo 125 g. El agua se mide en volumen utilizando la bureta o la probeta graduada con precisión de  $\pm 1$  ml. Se mezcla mecánicamente cada lote de pasta de cemento utilizando la amasadora según se indica a continuación:

Se vierte el agua y el cemento medidos y pesados con precisión respectivamente en el vaso teniendo cuidado de no perder agua o cemento; se completa la adición de los estos dos componentes en los 10 segundos posteriores.

Inmediatamente se enciende la amasadora a velocidad lenta mientras empieza el tiempo de las etapas de amasado. Se anota el tiempo al minuto más cercano como tiempo cero, que es el momento desde el que se calcula el principio y final de fraguado.

Después de 90 segundos se detiene la amasadora durante 30 segundos, tiempo durante el cual se elimina con un rascador de plástico o caucho adecuado toda la masa adherida a las paredes y el fondo del vaso y se coloca en medio del mismo.

Se pone en marcha nuevamente la amasadora a velocidad lenta durante otros 90 segundos. El tiempo total de amasado debe ser de 3 min.



*Figura 10 Amasado de la muestra.*

*Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Con las manos formar una bola, la cual se lanza seis veces de una mano a otra, separadas por una distancia libre de alrededor de 150 mm, de manera de producir una masa, aproximadamente esférica, para que pueda ser fácilmente insertada en el anillo de Vícat con una cantidad mínima de manipulación adicional.

## 2) Llenado del molde.

Insertar la masa, presionándola con la palma de una mano por el extremo más ancho del anillo cónico (G), que es sostenido con la otra mano, llenar completamente el anillo con la pasta, retirar el exceso de pasta del lado más ancho con un solo movimiento de la palma de la mano, colocar el anillo por su extremo más ancho sobre la placa de base (H), y cortar el exceso de pasta que sobresale del extremo menor, en la parte superior del anillo, con un solo golpe oblicuo de una espátula sostenida ligeramente levantada sobre el borde del anillo y alisar la superficie con unos pocos toques ligeros del extremo de la espátula, si es necesario. Durante estas operaciones de cortado y alisado, tener cuidado de no comprimir la pasta.

## 3) Obtención de la consistencia normal.

Se ajusta el aparato de Vícat manual provisto de la adecuada sonda. Inmediatamente después de enrasar la pasta, se coloca el molde y la placa base en el aparato de Vícat, situándose centrados debajo de la sonda. Se baja la sonda suavemente hasta que entre en contacto con la pasta. Se espera entre 1 a 2 segundos en esa posición, con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la sonda debe penetrar verticalmente en el centro de la pasta.



*Figura 11 Prueba inicial para comprobar la penetración.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

La liberación de la sonda se debe realizar  $4 \text{ min} \pm 10$  segundos después del tiempo de referencia cero. Se lee la escala al menos 5 segundos tras el fin de la penetración o 30 segundos después de la liberación de la sonda, lo que ocurra primero. Se anota la lectura de la escala, que indica la distancia entre la cara inferior de la sonda y la placa base, junto con el contenido de agua de la pasta expresada en tanto por ciento de la masa de cemento. Se limpia la sonda inmediatamente después de cada penetración.

Se repite el ensayo con pastas con diferentes contenidos de agua, hasta encontrar una que produzca una distancia de  $(10 \pm 2)$  mm entre la sonda y la placa base. Se anota el contenido de agua de esta pasta, con una aproximación del 0,5%, como el agua para la obtención de la consistencia normal. Para obtener el resultado de consistencia normal se usa la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{Masa de agua en gramos}}{\text{Masa de cemento en gramos}} \times 100$$

**Ensayo de fluidez de morteros según la norma INEN 2502.**-El método de ensayo indicado en esta norma se basa en la medición y cálculo en porcentaje del incremento del diámetro de la base de la masa de mortero de cemento hidráulico, medido en la mesa de flujo, producido por la acción de 25 caídas en 15 segundos.

### **Material y equipo**

Arena normada.

Cemento (diferentes muestras de materiales cementicios LC3).

Agua.

Mezcladora mecánica.

Mesa de fluidez, molde de fluidez (cono truncado).

Pisón no absorbente.

Calibrador.

Cuchara.

Calculadora.

Franela.

### **Procedimiento**

Se procede a realizar el mezclado del mortero con arena, cemento LC3 y agua en la mezcladora mecánica iniciando con la primera velocidad durante 15 segundos luego, en la segunda velocidad durante 1 min y por último 30 segundos en tercera velocidad. Limpiar y secar cuidadosamente la mesa de flujo y colocar el molde de flujo en el centro.

Colocar en el molde una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor y compactar 20 veces con el compactador. La presión de compactación debe ser la suficiente para asegurar un llenado uniforme del molde. Llenar el molde con mortero y compactar como se especificó para la primera capa. Cortar el mortero hasta una superficie plana, nivelada con el borde del molde, mediante pasadas del enrasador o del filo de la espátula, con movimientos de vaivén a través del borde del molde. Limpiar y secar la superficie de la mesa, remover, con mucho cuidado, cualquier porción de agua que esté alrededor del borde del molde de flujo. Un minuto después de haber terminado la operación de llenado, levantar el molde. Inmediatamente dejar caer la mesa 25 veces en 15 segundos.

Si utiliza el calibrador de Vernier especificado en la NTE INEN 2 500, medir el diámetro del mortero a lo largo de las cuatro líneas trazadas en la superficie de la mesa, registrar cada diámetro como el número de divisiones del calibrador, estimando a un décimo de la división. Si utiliza algún otro calibrador, medir el diámetro del mortero a

lo largo de las cuatro líneas trazadas en la superficie de la mesa, registrar cada diámetro con una aproximación de un milímetro.



*Figura 12 Colocación del agua a la mezcla.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*



*Figura 13 Ensayo de la mezcla en la mesa de flujo.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

***Ensayo de determinación de la plasticidad por el método del minicono según la norma NC 235(Norma Cubana).***- Esta norma establece básicamente la determinación de la plasticidad, su variación en el tiempo y la reducción de agua de las pastas de cemento con la introducción o no de aditivos químicos y adiciones, así como el control de cemento con diferentes composiciones mineralógicas.

### **Equipos y materiales**

Minicono: molde troncocónico de plástico termoestable y transparente, de dimensiones establecidas.

Mezcladora de eje vertical y paletas metálica con velocidad variable de 30 r.p.m. a 2 500 r.p.m.

Recipiente cilíndrico plástico de 1000 ml.

Plancha de acrílico o vidrio de 300 mm de ancho y de 300 mm a 1 200 mm de largo.

Balanza de 2 500 g con .01 g de precisión.

Cronómetro.

Espátula.

Varilla de vidrio de 5 mm de diámetro.

Calibrador.

### Procedimiento

Se pesan  $100 \pm 0.02$  g de cemento y se vierten en el recipiente cilíndrico e inmediatamente se vierte la cantidad de agua calculada para la relación agua/cemento establecida. Se introduce la paleta de la mezcladora dentro del recipiente y se pone en movimiento a la velocidad de 250 r.p.m. durante dos minutos. Se detiene el mezclado, se tapa el recipiente con el plástico ranurado y se deja reposar la mezcla durante tres minutos. Se pone nuevamente en movimiento la mezcladora y se mezcla durante dos minutos finales. Se coloca el minicono sobre la placa de acrílico o vidrio. Se detiene la mezcladora. Se vierte la pasta con la ayuda de la varilla dentro del minicono de tal manera que no queden vacíos. Finalmente, se enrasa con la espátula y se elimina el exceso de pasta en el extremo superior y lateral del minicono. Se mantiene en reposo el minicono durante un minuto y se levanta verticalmente con movimiento rápido dejando caer la pasta hasta que la superficie interior del minicono quede completamente limpia.



Figura 14 Colocación de la muestra mezclada en el molde.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.

La pasta formará una pastilla circular que se mantiene en reposo durante 24 horas como mínimo hasta su total endurecimiento. Una vez cumplidas las 24 horas se toman 8 diámetros de cada muestra.

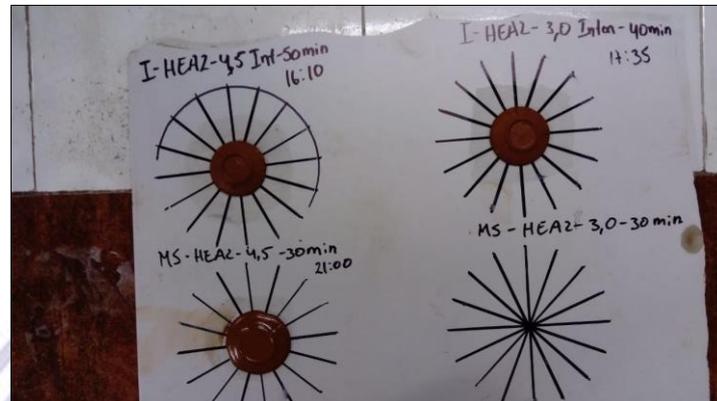


Figura 15 Muestras ensayadas después de quitar el molde.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.



Figura 16 Medición de diámetros de las muestras con el calibrador de Vernier.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.

### 3.3.3. Ensayos que determinan las propiedades mecánicas

**Ensayo de resistencia a la compresión según la norma INEN 488.-** Este Ensayo cubre la determinación de resistencia a la compresión de los morteros, en este caso de los morteros con el material cementicio creado, utilizando muestras en forma de cubo de 50 mm x 50mm x 50 mm.

#### Equipos y materiales

Equipo de ensayo universal de compresión según ASTM C 39.

Arena normada.

Agua.

Aceite mineral.

Probeta graduada.

Mezcladora mecánica.

Cucharón, espátula.

Cemento (en este caso las distintas muestras de materiales cementicios a ensayar).

Moldes para especímenes cúbicos de 50 mm según la norma ASTM C109.

Franela, brocha y esponja.

Enrasador.

Marcador.

Balanza y cinta métrica.

### **Procedimiento**

La proporción, en masa, de los materiales secos para el mortero normalizado deben ser: Una parte de cemento por 2,75 partes de arena normalizada graduada. Se debe utilizar una relación agua – cemento de 0,485 para todos los cementos Portland y 0,460 para todos los cementos Portland con incorporador de aire. La cantidad de agua de mezclado para otros cementos que no sean Portland y Portland con incorporador de aire, debe ser la necesaria, para que produzca una fluidez de  $110 \pm 5$ , por el ensayo de fluidez y se debe expresar como un porcentaje de la masa de cemento.

Las proporciones dependerán de la cantidad de especímenes a ensayar, el amasado debe hacerse mecánicamente según el procedimiento descrito en la NTE INEN 155.

Determinar la fluidez de acuerdo con la NTE INEN 2 502. En caso de cementos diferentes al cemento Portland y Portland con incorporador de aire, hacer morteros de pruebas, con porcentajes variables de agua hasta obtener la fluidez especificada. Hacer cada prueba con mortero fresco.

Inmediatamente después de completar el ensayo de fluidez, regresar el mortero de la mesa de fluidez al tazón de mezclado, rápidamente raspar los lados del tazón y colocar dentro de la mezcla el mortero que pueda haberse adherido en la pared del tazón y mezclar la amasada entera por 15 segundos a velocidad media. Al completar el mezclado, la paleta de la mezcladora debe ser sacudida para remover el

exceso de mortero dentro del tazón de mezclado cuando deba hacerse inmediatamente una amasada duplicada para especímenes adicionales, el ensayo de fluidez puede ser omitido y dejar reposar el mortero en el tazón de mezclado 90 segundos sin cubrir, durante los últimos 15 segundos de este intervalo, rápidamente raspar los lados del tazón y colocar dentro de la amasada el mortero que pueda haberse adherido a la pared.

El llenado de los moldes debe iniciarse dentro de un intervalo de tiempo no mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar el primer mezclado de la amasada del mortero. Los moldes deben llenarse en dos capas. Colocar una capa de mortero de alrededor de 25 mm de espesor (aproximadamente la mitad de la profundidad del molde) en todos los compartimentos cúbicos y apisonar el mortero en cada compartimento cúbico 32 veces en alrededor de 10 segundos, en 4 rondas, en cada ronda se debe compactar con 8 golpes, en dirección perpendicular a la anterior, como se indica en la figura 17.

La presión de compactación debe ser solo la suficiente para asegurar un llenado uniforme de los moldes y se deben completar 4 rondas de apisonado del mortero (32 golpes) en un cubo antes de pasar al siguiente. Una vez terminada la compactación de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos, llenar los compartimentos con el mortero restante y compactar como se ha especificado para la primera capa.

Durante la compactación de la segunda capa, mediante el compactador y los dedos con las manos enguantadas, colocar nuevamente al interior el mortero que haya rebosado sobre el borde superior de los moldes después de cada ronda de compactación, hasta completar cada una de las rondas y antes de empezar la siguiente ronda de apisonado.

Al finalizar la compactación, la superficie de mortero en todos los cubos debe sobresalir ligeramente sobre el borde de los moldes. Retirar con una espátula el mortero que ha rebosado sobre el borde de los moldes y alisar los cubos pasando una vez el lado plano de la espátula (con el borde guía ligeramente levantado), a través de la superficie de cada cubo en sentido perpendicular con el largo del molde;

luego, con el propósito de nivelar el mortero y hacer que el mortero que sobresale del borde del molde sea de espesor más uniforme, se pasa suavemente el lado plano de la espátula (con el borde guía ligeramente levantado) una vez a lo largo de la longitud del molde. Cortar el mortero hasta una superficie plana, coincidente con el borde del molde pasando el borde recto de la espátula (sostenida casi perpendicularmente al molde) con un movimiento de aserrado a lo largo del molde.

Inmediatamente colocar las muestras de ensayo en el gabinete húmedo o cámara de curado, mantener todas las muestras de ensayo, inmediatamente después de moldeadas, en los moldes sobre las placas de base, de 20 a 72 horas, con las caras superiores expuestas al aire húmedo, pero protegidas contra la eventual caída de gotas de agua.

Si los especímenes se retiran de los moldes antes de 24 horas, deben dejarse en las estanterías del gabinete húmedo o cámara de curado hasta que se complete este tiempo, luego las muestras que no van a ensayarse a las 24 horas deben sumergirse en agua saturada con cal, dentro de tanques de almacenamiento contruidos de materiales resistentes a la corrosión. El agua de almacenamiento debe mantenerse limpia cambiándola cuando se requiera.

Ensayar las muestras inmediatamente después de retirarlas del gabinete húmedo, en el caso de las muestras de 24 horas de edad, o del agua de almacenamiento, en el caso de todas las otras muestras. Todas las muestras de ensayo correspondientes a determinada edad de ensayo deben ensayarse dentro de las tolerancias permisibles de tiempo. (Ver tabla 11).

*Tabla 11 Tolerancia admisible de roturas de muestras del Ensayo de resistencia a la compresión.*

<b>Edad de ensayo</b>	<b>Tolerancia admisible</b>
24 horas	± 1/2 hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

*Fuente: Norma INEN 488*

Si se retira del gabinete húmedo más de una muestra a la vez para los ensayos de 24 horas, deben mantenerse cubiertas con un paño húmedo hasta el momento del ensayo. Si se retira del agua del tanque de almacenamiento más de una muestra a la vez para ensayarse, deben mantenerse en agua a una temperatura de  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a una profundidad suficiente para sumergir completamente todas las muestras, hasta el momento del ensayo. Secar cada muestra hasta una condición de superficie seca y eliminar los granos sueltos de arena u otras incrustaciones, de las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo. Controlar las caras aplicando una regla, si hay una curvatura apreciable, se debe esmerilar la cara o caras, hasta lograr superficies planas o se descarta la muestra. Debe hacerse un control periódico del área de la sección transversal de las muestras. Colocar cuidadosamente la muestra en la máquina de ensayo, bajo el centro del cabezal de apoyo superior, de manera que la carga se aplique a dos caras del cubo previamente medidas y que estaban en contacto con las superficies planas del molde.

Antes del ensayo de cada cubo debe asegurarse que el cabezal apoyado en la esfera esté libre para bascular. No utilizar materiales de amortiguamiento o cojín. Llevar el cabezal asentado en una esfera hasta que haga contacto uniforme con la superficie del espécimen. Aplicar la velocidad de carga con un incremento uniforme de velocidad entre los cabezales superior e inferior hasta alcanzar una carga sobre el espécimen entre el rango de 900 a 1.800 N/s, esta velocidad de aplicación de carga debe ser alcanzada durante la primera mitad de la carga máxima estimada y no se debe reajustar la velocidad de carga en la última mitad de la carga, especialmente mientras el cubo está fluyendo con rapidez antes de la falla. Debe registrarse la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo.



*Figura 17 Cubos de 50 x 50 mm para Ensayo de resistencia a la compresión.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

**Ensayo de determinación de tiempo de fraguado Norma ASTM C 191-01.-**Para realizar este ensayo es necesario disponer de los siguientes materiales:

Balanza, capaz de pesar con una precisión de  $\pm 1$  g y bureta o probeta graduada, con una precisión de  $\pm 1$  ml.

Amasadora.

Agua destilada o des-ionizada.

Aparato de Vicat y aguja de Vicat de 50 mm de largo y 1 mm de ancho.

Plato plano no absorbente de vidrio.

Contenedor o anillo cónico fabricado de un material rígido, no absorbente con medidas de altura 40 mm y diámetro de 70 mm.

Material cementicio a ensayar (LC3).

### **Procedimiento**

Para la realización de este ensayo es necesario partir de una pasta de cemento de consistencia normal (la hallada en el ensayo de consistencia) según la norma INEN 157 . Por ello el primer paso es la determinación de la cantidad de agua necesaria para obtener la misma. Una vez, conocida ésta se determina con dicha pasta el principio y final de fraguado.



*Figura 18 Moldes con muestras para el Ensayo de tiempo de fraguado.*

*Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

**Determinación del tiempo de fraguado inicial. INEN 158.-** Con la pasta de cemento obtenida se forma una bola y se la lanza 6 veces de una mano a la otra, manteniendo las manos separadas aproximadamente 150 mm. Presionar la bola, con

la palma de la mano, dentro del extremo más ancho del anillo cónico G, sostenido con la otra mano, llenando completamente el anillo con la pasta. Dejar que el espécimen para tiempo de fraguado, descansa en el gabinete húmedo o en la cámara de curado durante 30 minutos después del moldeo sin ser perturbado.

Después de un tiempo adecuado, el molde, la placa base y el contenedor se llevan al aparato de Vicat y se sitúan debajo de la aguja. Se baja la aguja despacio hasta que entre en contacto con la pasta. Se espera en esta posición entre 1 segundo y 2 segundos, con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la aguja debe penetrar verticalmente en la pasta. Se lee la escala cuando haya terminado la penetración, o 30 segundos después de la liberación de la aguja, lo que ocurra primero.



*Figura 19 Penetración de la aguja de Vicat.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Se anota la lectura de la escala, que indica la distancia entre el extremo de la aguja y la placa base, junto con el tiempo desde el instante cero. Se repite el ensayo de penetración sobre la misma probeta en posiciones convenientemente separadas, a no menos de 8mm del borde del molde, o 5 mm entre ellas, y al menos a 10 mm de la última posición, a intervalos de tiempo, convenientemente espaciados, por ejemplo 10 min. Entre los sucesivos ensayos de penetración, se mantiene la probeta en la cámara o recinto de temperatura controlada. Se limpia la aguja de VÍcat

inmediatamente después de cada penetración. Si se tiene que hacer el ensayo de final de fraguado se conserva la probeta.



*Figura 20 Lectura de la penetración de la aguja de Vicat.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

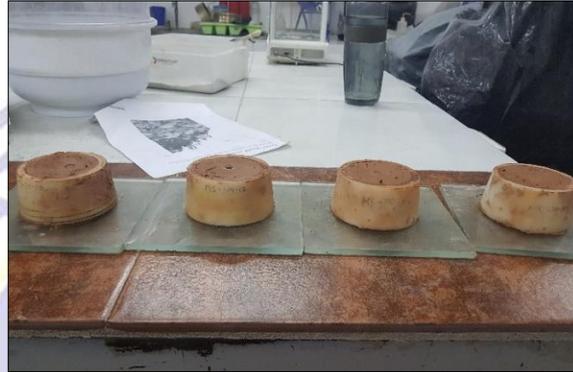
El tiempo de principio de fraguado del cemento es el tiempo transcurrido entre el tiempo cero y el tiempo en el cual la distancia entre la aguja y la placa base es 25 mm, medido al minuto más cercano con una aproximación de 5 min.

**Determinación del tiempo de final de fraguado.**-Se invierte el molde lleno utilizado sobre su placa base, de modo que los ensayos de final de fraguado se efectúan sobre la cara de la probeta que originalmente está en contacto con la placa base. Se sumerge el molde y la placa base en el contenedor y se almacena en la cámara o recinto de temperatura controlada a  $(20,0\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1,0\text{ }^{\circ}\text{C})$ .

Tras un tiempo adecuado, se coloca el contenedor, el molde y la placa base bajo la aguja del aparato de VÍcat. Se baja la aguja despacio hasta que entre en contacto con la pasta.

Se espera en esta posición entre 1 segundo y 2 segundos, con el fin de evitar una velocidad inicial o aceleración forzada de las partes móviles. Se sueltan rápidamente las partes móviles y la aguja debe penetrar verticalmente en la pasta. Se lee la escala cuando haya terminado la penetración, o 30 segundos después de la liberación de la aguja, lo que ocurra primero.

Se repite el ensayo de penetración sobre la misma probeta en posiciones convenientemente separadas, a no menos de 8 mm del borde del molde, o 5 mm entre ellas, y al menos a 10 mm de la última penetración, a intervalos de tiempo convenientemente espaciados, por ejemplo a intervalos de 30 min. Entre las sucesivas penetraciones, se mantiene la probeta en la cámara o recinto de temperatura controlada.



*Figura 21 Determinación de tiempo fraguado final.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

Se limpia la aguja de Vicat inmediatamente después de cada penetración. Se anota el tiempo transcurrido desde el instante cero hasta el momento en el que la aguja penetra, por primera vez, sólo 0,5 mm en la .pasta. El tiempo final de fraguado se debe confirmar repitiendo la medida en otras dos posiciones.



*Figura 22 Muestras ensayadas para tiempo de fraguado.  
Fuente: Félix Castillo Jumbo – Ronny Reyes Villamar.*

## CAPÍTULO IV

### INTERPRETACION DE LOS RESULTADOS

#### 4.1. Análisis de resultados para la etapa de selección de intensificador de molienda.

##### 4.1.1. Análisis de resultados del Ensayo de la distribución de partículas

*Tabla 12 Resultados del ensayo de granulometría por DRX*

DESCRIPCIÓN	0,1 (µm) < 1 %	0,5 (µm) 6-10 %	0,9 (µm) < 50%
INT-HEA2-15M	0,89	13,87	57,86
INT-HEA2-20M	0,75	8,72	43,84
INT-MTDA514-15M	0,87	13,50	57,24
INT-MTDA514-20M	0,75	8,66	44,55
INT-MTDA290-15M	0,88	13,52	57,93
INT-MTDA290-20M	0,73	8,06	40,28
MS-HEA2-15M	0,76	8,44	47,16
MS-HEA2-20M	0,69	6,56	37,51
MS-MTDA514-15M	0,76	8,34	47,06
MS-MTDA514-20M	0,69	6,50	36,53
MS-MTDA290-15M	0,74	8,05	45,19
MS-MTDA290-20M	0,69	6,59	37,65

*Fuente: Investigación propia.*

Como se puede apreciar en la tabla 12, existen 12 muestras aplicadas con 3 tipos de intensificadores de molienda en tiempos de 15 min y 20 minutos respectivamente, los cuales fueron hechos mediante el proceso de intermolienda y molienda separada, proporcionando resultados tales como:

De acuerdo a las muestras de intermolienda (INT) con el intensificador HEA2 cuyos tiempos de molienda son de 15 min y 20 min, se pudo determinar que a mayor tiempo de molienda se obtienen granulometrías más finas, según las muestras de intermolienda (INT) con el intensificador MTDA 514 cuyos tiempos de molienda son de 15min a 20 min, se pudo determinar que a mayor tiempo de molienda se obtienen granulometrías más finas.

Basados en las muestras de intermolienda (INT) con el intensificador MTDA 290, cuyos tiempos de molienda son de 15 min a 20 min, se pudo determinar que a mayor tiempo de molienda se obtienen granulometrías más finas. Además, se aplicaron 6 muestras, con 3 tipos de intensificadores de molienda en tiempos de 15 min y 20 min respectivamente, los cuales fueron hechos mediante el proceso de molienda separada, en los que se obtuvieron los siguientes resultados:

Según las muestras MS con el intensificador HEA2, cuyos tiempos de molienda fueron de 15 min y 20 min para fabricar el LC2 y de 120 min para fabricar el cemento Portland, los cuales fueron mezclados posterior a su molienda. Obteniendo mejores resultados por el tiempo de molienda del cemento Portland. Cabe mencionar que en los 20 min los resultados de los ensayos de granulometría fueron más finos que en el de 15 min.

De acuerdo a las muestras MS con el intensificador MTDA 514, cuyos tiempos de molienda fueron de 15 min y 20 min para fabricar el LC2 y de 120 min para fabricar el cemento Portland, los cuales fueron mezclados posterior a su molienda. Obteniendo mejores resultados por el tiempo de molienda del cemento Portland. Cabe mencionar que en los 20 min los resultados de los ensayos de granulometría fueron más finos que en el de 15 min.

Según las muestras MS con el intensificador MTDA 290, cuyos tiempos de molienda fueron de 15 min y 20 min para fabricar el LC2 y de 120 min para fabricar el cemento Portland, los cuales fueron mezclados posterior a su molienda. Obteniendo mejores resultados por el tiempo de molienda del cemento Portland. Cabe mencionar que en los 20 min los resultados de los ensayos de granulometría fueron más finos que en el de 15 min.

Una vez analizado y revisado todos los resultados con los 3 diferentes tipos de intensificador de molienda se llegó a la conclusión que el intensificador actúa de manera proporcional al tiempo de molienda a mayor tiempo mayor efecto del intensificador para lograr granulometrías más finas. En la tabla 12 se observa rangos que son valores obtenidos de la distribución de partículas del cemento Portland convencional, partiendo de estos rangos como punto de referencia para el análisis de

los resultados con los distintos intensificadores. Se observa en el gráfico del anexo A las diferencias que existen entre las muestras con el mismo intensificador pero diferente tiempo de molienda tanto en el proceso de intermolienda y molienda separada y se obtiene como resultado que en las muestras de intermolienda tienen menores diferencias con el intensificador MTDA 514 y HEA 2 y en molienda separada con el intensificador MTDA 290 y HEA 2 por lo tanto se escoge el intensificador HEA 2 por mantenerse constantes en los resultados para los dos procesos de molienda.

#### 4.1.2. Análisis de resultados del Ensayo de Blaine

Tabla 13 Resultados del Ensayo de Blaine

INTENSIFICADOR	TIEMPO (s)	MASA (gr)	SUPERF. ESPC. (cm <sup>2</sup> /g)
INT-MTDA 290-15	134	2,5141	5995,30
INT-MTDA 290-20	152	2,514	6385,30
INT-MTDA 514-15	151	2,5141	6364,20
INT-MTDA 514-20	194	2,5141	7213,70
INT-HEA 2-15	143	2,5141	6193,40
INT-HEA 2-20	180	2,514	6948,60
MS-MTDA 290-15	189	2,5142	7120,20
MS-MTDA 290-20	220	2,514	7681,90
MS-MTDA 514-15	155	2,5142	6448,00
MS-MTDA 514-20	168	2,5139	6712,90
MS-HEA 2-15	178	2,5139	6909,80
MS-HEA 2-20	220	2,5139	7681,90

Fuente: Investigación propia



Gráfico 2 Comparación de resultados del ensayo de Blaine

Fuente: Investigación propia.

Como se observa en la tabla 13 se tiene los resultados del ensayo de Blaine que determina la permeabilidad de un material cementicio en este caso de las 12 muestras ensayadas clasificadas en intermolienda INT y molienda separada MS y con 3 tipos de intensificadores de molienda detallados a continuación:

- MTDA 290
- MTDA 514
- HEA 2

Analizando las 6 muestras de intermolienda se encontró un patrón que se repite en cada par de muestras del mismo intensificador siendo este patrón el que a mayor tiempo de molienda en este caso a 20 min da tiempos más extensos en el Ensayo de Blaine lo que demuestra que tienen menor permeabilidad.

Por otro lado, para las 6 muestras por el proceso de molienda separada el patrón se sigue repitiendo dando como resultados que al tiempo de 20 min de molienda se tiene tiempos más largos demostrando así que las muestras son menos permeables.

Otro dato muy importante es el resultado final de este ensayo que es obtener la superficie específica de cada muestra y en la cual deja un resultado muy parecido al del tiempo obtenido, es decir, que la superficie específica es directamente proporcional al tiempo obtenido para cada muestra. Las muestras ensayadas con 20 min de molienda tienen mayor superficie específica que las muestras ensayadas a 15 min.

De este ensayo los resultados observados en el Anexo B indican la diferencia que existe entre las muestras de 15 min y 20 min de molienda dejando un dato importante que el intensificador HEA 2 es el que tiene menor diferencia en la muestra intermolienda mientras el MTDA 290 y 514 muestran resultados muy cercanos entre si al intensificador HEA 2. Para las muestras de molienda separada el intensificador MTDA 514 es el que menor diferencia tiene en sus resultados, pero dejando en segundo lugar al intensificador HEA2 demostrando en este ensayo que el intensificador HEA 2 muestra menores diferencias entre distintos tiempos de molienda y es constante en los dos procesos de molienda.

### 4.1.3. Análisis de resultados del ensayo de compresibilidad

Tabla 14 Resultados del Ensayo de compresibilidad

INTENSIFICADOR	P.V.S.	P.V.C.	% Compresibilidad
INT-MTDA 290-15	355,1	502,3	29,31
INT-MTDA 290-20	85,4	139,8	38,91
INT-MTDA 514-15	88,6	127,5	30,51
INT-MTDA 514-20	86,8	128,8	32,61
INT-HEA 2-15	90	127,8	29,58
INT-HEA 2-20	87,7	130,5	32,80
MS-MTDA 290-15	84,9	124,4	31,75
MS-MTDA 290-20	81,9	135,7	39,65
MS-MTDA 514-15	84,9	129,3	34,34
MS-MTDA 514-20	83,9	131	35,95
MS-HEA 2-15	84	130,2	35,48
MS-HEA 2-20	82,6	129,9	36,41

*Fuente: Investigación propia.*

En la tabla 14 mostrada, se puede observar un patrón que se repite en cada pareja de muestras, tanto por el proceso de intermolienda y el de molienda separada y es que a mayor tiempo de molienda con los distintos intensificadores se tiene mayor porcentaje de compresibilidad; es decir, las muestras de 20 min son más compresibles debido a su mayor homogeneidad, en sus tamaños de partículas producto de tener un mayor tiempo de molienda.

Según el gráfico 3 que muestra los resultados del ensayo de compresibilidad vs tiempo de molienda se observa la tendencia de las muestras ensayadas siendo la muestra INT-HEA2 la que presenta menor compresibilidad en ambos tiempos de molienda demostrando que esta tiene mejor distribución granulométrica por la variabilidad de tamaño de partículas.

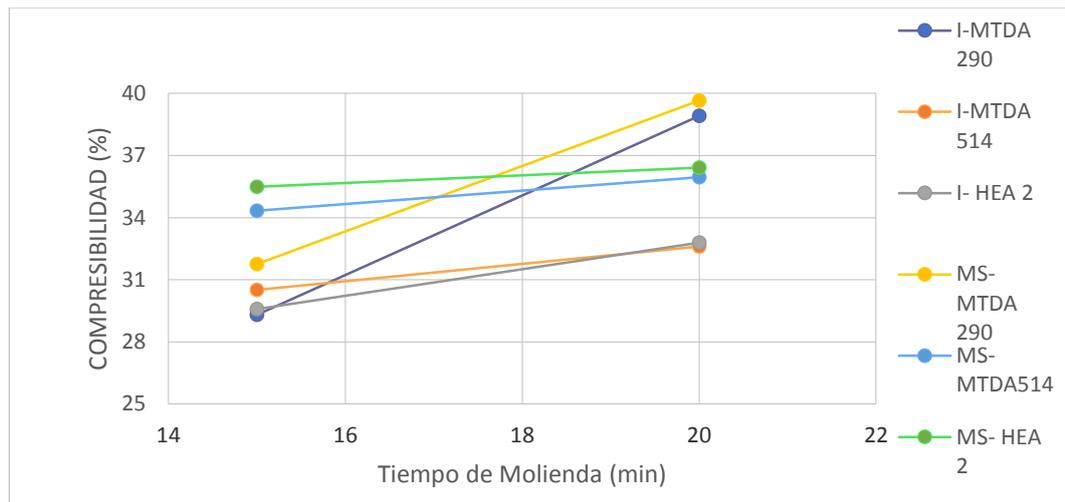


Gráfico 3 Resultados del Ensayo de compresibilidad vs. Tiempo de molienda  
Fuente: Investigación propia.

#### 4.1.4. Análisis de resultados del ensayo de determinación de la consistencia normal

Tabla 15 Resultados del Ensayo de determinación de la consistencia normal

INTENSIFICADOR	CANTIDAD DE AGUA (ml)	PENETRACIÓN (mm)	% DE AGUA
INT-MTDA 290-15	222,00	12,00	34,15
INT-MTDA 290-20	225,00	9,50	34,62
INT-MTDA 514-15	220,00	11,00	33,85
INT-MTDA 514-20	227,00	8,00	34,92
INT-HEA 2-15	223,00	9,00	34,31
INT-HEA 2-20	228,00	10,00	35,08
MS-MTDA 290-15	231,00	9,00	35,54
MS-MTDA 290-20	245,00	11,00	37,69
MS-MTDA 514-15	232,00	11,00	35,69
MS-MTDA 514-20	249,00	10,00	38,31
MS-HEA 2-15	232,00	11,50	35,69
MS-HEA 2-20	239,00	9,00	36,77

Fuente: Investigación propia.

Luego de un respectivo análisis de los resultados del Ensayo de consistencia normal como se muestra en la tabla 15, se logra obtener la cantidad de agua necesaria para que cada muestra tuviera una penetración de la aguja de Vicat de 10 mm +/- 2, mostrándose un dato muy importante, que a mayor tiempo de molienda, es decir, mientras más fino es el material cementicio, necesita más agua para llegar a su consistencia normal. Esto

quiere decir, que se genera mayor absorción de agua; por lo tanto, con estos resultados determinamos que las muestras absorben cantidades de agua muy parecidas para llegar a su consistencia normal, siendo así, que para este ensayo no existen diferencias significativas entre las muestras con los distintos intensificadores.

#### 4.1.5. Análisis de resultados del ensayo de minicono

En el Anexo D y en el gráfico 4, las 6 muestras que pasaron por el proceso de intermolienda se obtuvieron los siguientes resultados. Para las 4 primeras que tienen los intensificadores MTDA 290 y MTDA 514 respectivamente en parejas de 15 min y 20 min de molienda se puede observar que a mayor tiempo de molienda las muestras de 20 min tienen menor diámetro y por ende menor área, dando a entender que tienen menor plasticidad, mientras las de 15 min tienen mayor área, es decir, mayor deformación y esto posiblemente se relacione al tiempo de molienda y al intensificador usado, que provoca que a mayor tiempo de molienda su plasticidad disminuya.

Las 2 muestras restantes de intermolienda presentan otro patrón, en la muestra de 20 min nos da como resultado mayor área y mayor diámetro promedio que las de 15 min indicando que este intensificador actúa de manera que a mayor tiempo de molienda aumenta también su área. Los resultados de área y diámetro están ligados a la plasticidad de este material.



Gráfico 4 Resultados del Ensayo de minicono.  
Fuente: Investigación propia.

El caso se repite para las muestras de molienda separada, de igual manera que en las intermoliendas que contienen el intensificador MTDA 290 y MTDA 514 disminuyen su plasticidad con mayor tiempo de molienda mientras que las que contienen el intensificador HEA2 es todo lo contrario, a mayor tiempo de molienda mejor plasticidad. Las muestras que tienen en su adición el intensificador HEA 2 muestran un patrón clave para la elección del intensificador que a mayor tiempo de molienda sus diámetros son mayores, los mismos que se relacionan a la plasticidad de las muestras.

#### 4.1.6. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de fluidez

Se observa en el gráfico 5 los resultados obtenidos del Ensayo de fluidez (Ver Anexo C) y se analiza las variaciones de los diámetros luego del ensayo se tiene que, para las muestras de intermolienda la de MTDA290 15 min es ligeramente menor a la muestra de 20 min mientras que las muestras MTDA 514 y HEA 2 son mayores las muestras de 15 min vs las de 20 min.

Para las muestras de molienda separada se repite este patrón tanto para el intensificador MTDA290 y MTDA514 siendo mayor sus diámetros promedio en la muestra de 20 min y para las muestras HEA2 las de 15 min son superiores a las de 20 .min

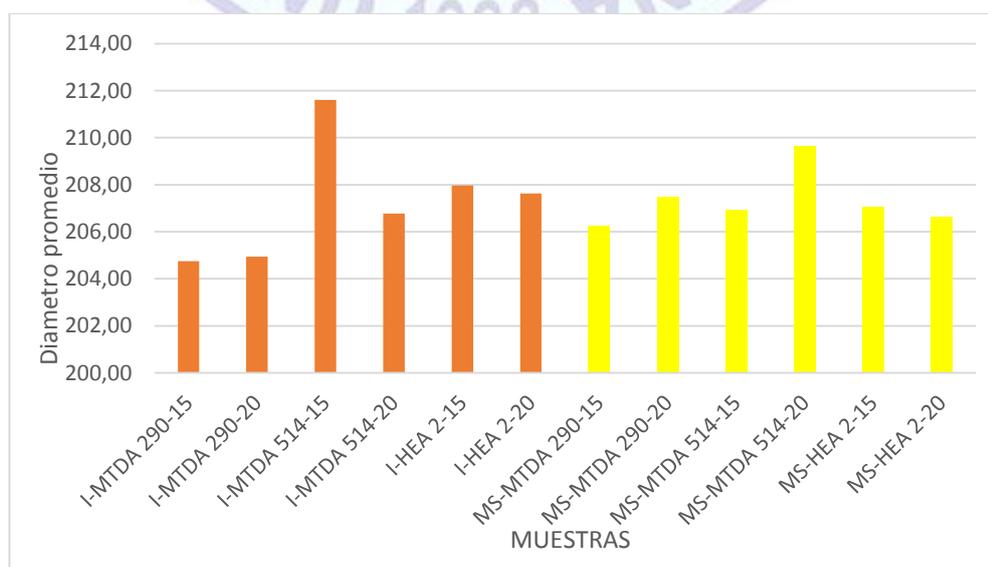


Gráfico 5 Resultados del Ensayo de fluidez.  
Fuente: Investigación propia.

Tomando en consideración este parámetro los intensificadores MTDA 514 y HEA 2 por el proceso de intermolienda consiguen en menos tiempo de molienda tener mayor flujo, mientras con el intensificador MTDA 290 necesitan de mayor tiempo de molienda para lograr un mayor flujo; sin embargo, de todas las muestras ensayadas a 15 min en el proceso intermolienda destacan por tener mejores resultados las muestras con MTDA 514 en primer lugar, seguido del intensificador HEA 2 y en las moliendas separadas se tiene en primer lugar al intensificador HEA 2, seguido del MTDA 514.

#### 4.1.7. Análisis de resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros

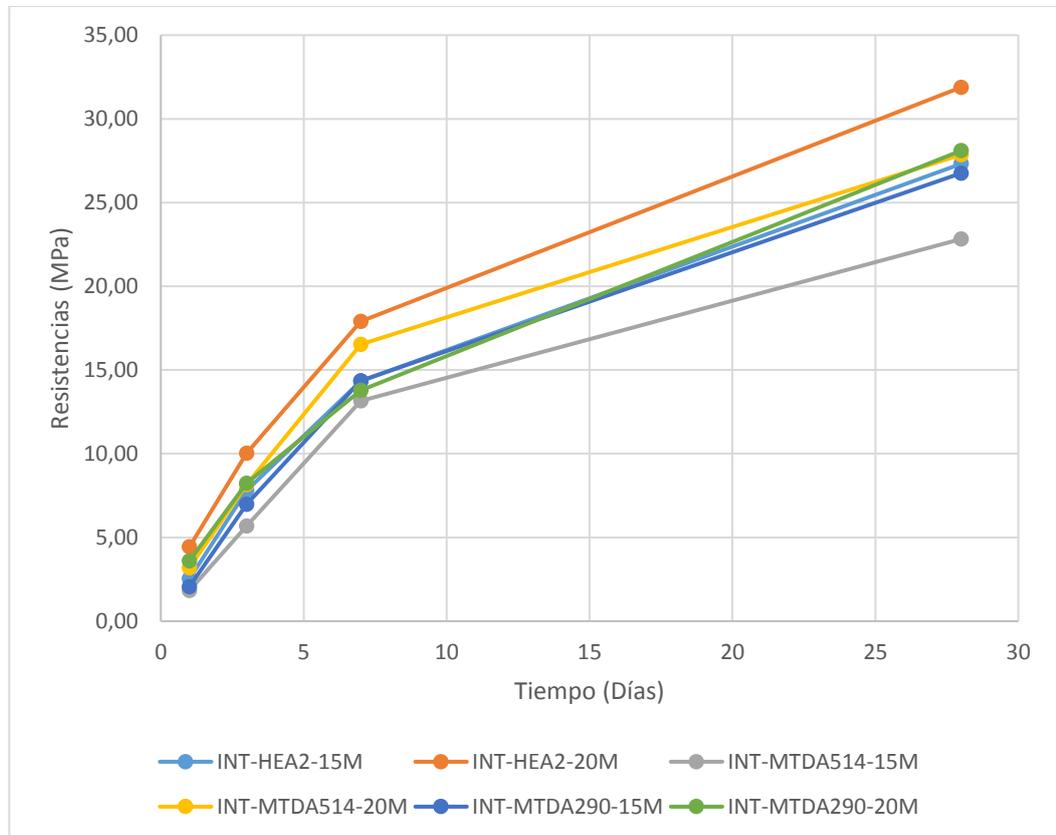
Tabla 16 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros

DESCRIPCIÓN	1D kg/cm <sup>2</sup>	3D kg/cm <sup>2</sup>	7D kg/cm <sup>2</sup>	28D kg/cm <sup>2</sup>
INT-HEA2-15M	2,53	7,79	14,34	27,31
INT-HEA2-20M	4,43	10,03	17,90	31,89
INT-MTDA514-15M	1,83	5,67	13,16	22,82
INT-MTDA514-20M	3,19	8,16	16,52	27,86
INT-MTDA290-15M	2,07	6,98	14,36	26,76
INT-MTDA290-20M	3,60	8,24	13,78	28,10
MS-HEA2-15M	5,11	10,15	13,91	23,19
MS-HEA2-20M	5,59	9,31	17,45	27,74
MS-MTDA514-15M	5,25	9,35	16,62	26,01
MS-MTDA514-20M	5,33	9,57	17,73	28,62
MS-MTDA290-15M	5,68	10,24	16,96	28,53
MS-MTDA290-20M	6,22	10,42	17,71	29,54

Fuente: Investigación propia.

Como se observa en la tabla 16 las muestras de 20 min, en todos los casos, dan mejores resistencias a la compresión que las de 15 min empezando por las roturas al día, que muestran un aumento de casi un 80% en promedio en el tercer día y ya en el séptimo día las resistencias de 20 min se mantienen por encima de las de 15 min hasta el día 28 que se sigue con el mismo patrón.

Para las 6 muestras de intermolienda se obtiene como resultado que el intensificador HEA 2, tiene las mejores resistencias en todas las edades (ver gráfico 6) siendo este un factor importante a considerar para la selección del intensificador.



*Gráfico 6 Resistencias a la compresión vs edad de la muestra.  
Fuente: Investigación propia.*

Para el proceso de molienda separada en las 6 muestras se observa mejores resistencias con el intensificador MTDA 290 en todas las edades, pero esto es por poca diferencia en comparación con los resultados del intensificador HEA2, siendo casi similares en los resultados como muestra en el gráfico 6.

El intensificador HEA 2 demuestra tener los mejores parámetros en lo que se refiere a resistencia a la compresión resaltando en el proceso de intermolienda.

#### 4.1.8. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de tiempo de fraguado

Tabla 17 Resultados del Ensayo de tiempo de fraguado inicial y final.

INTENSIFICADOR	TIEMPO DE MOLIENDA	T.INICIAL (min)	T .FINAL (min)
INT-MTDA 290-15	15	182	299
INT-MTDA 290-20	20	162	309
INT-MTDA 514-15	15	177	311
INT-MTDA 514-20	20	161	301
INT-HEA 2-15	15	162	297
INT-HEA 2-20	20	158	303
MS-MTDA 290-15	15	100	220
MS-MTDA 290-20	20	120	205
MS-MTDA 514-15	15	115	230
MS-MTDA 514-20	20	117	210
MS-HEA 2-15	15	125	205
MS-HEA 2-20	20	115	199

*Fuente: Investigación propia.*

Una vez analizado y comparado los resultados de la tabla 17 se observa un patrón que se repite en las muestras de intermolienda, el tiempo de fraguado inicial en las muestras de molienda que tuvieron 20 min es más rápido que las de 15 min; mientras que, en el fraguado final se observa que no hay un patrón definido pero, sin embargo, todos rondan dentro de un rango de 290 min y 315 min de tiempo final y resaltando las muestras I-HEA 2-15 y I-HEA 2-20 con los mejores tiempos de fraguado inicial y final, ambas tienen en común la adición del intensificador HEA 2 .

Para las muestras de molienda separada hubo diferencias en los tiempos iniciales de fraguado, ya que en las muestras con el intensificador MTDA 290 y MTDA 514 el tiempo fue mayor en las de 20 min que las de 15 min, a excepción de las muestras con intensificador HEA 2 que continuaron mostrando el patrón de las intermolienda teniendo mayor tiempo de fraguado inicial para las muestras de 15 min. Por otro lado, el tiempo de fraguado final tuvo como resultado que: todas las muestras de molienda separadas a 20 min dieron tiempos menores que las muestras de 15 min.

El aditivo HEA 2, también, resaltó en las muestras de molienda separada, no por su fraguado inicial sino por su fraguado final, teniendo tiempos menores a los dos aditivos

contrarios y, por conservar un mismo patrón en todas sus muestras, teniendo un comportamiento constante tanto en molienda separada e intermolienda.

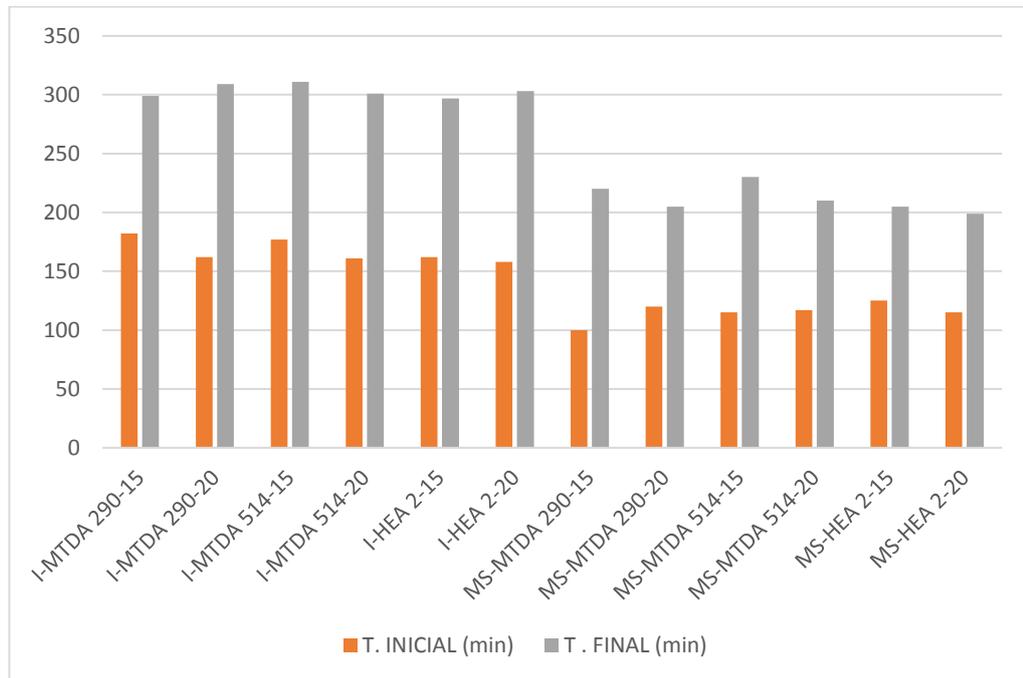


Gráfico 7 Resultados de tiempo de fraguado inicial y final  
Fuente: Investigación propia.

## 4.2. Análisis de resultados para la etapa de obtención de tiempos de molienda y efectos del intensificador en las propiedades

### 4.2.1. Análisis de resultados del Ensayo de la distribución de partículas

Tabla 18 Resultados del ensayo de distribución de partículas por DRX de la segunda etapa

DESCRIPCIÓN	0,1 ( $\mu\text{m}$ ) < 1 %	0,5 ( $\mu\text{m}$ ) 6-10 %	0,9 ( $\mu\text{m}$ ) < 50%
INT-HEA2-4,5g-50min	0,60	4,60	28,98
INT-HEA2-3g-40min	0,65	5,61	33,86
LC2-HEA2-4,5g-30min	0,66	5,51	39,38
LC2-HEA2-3g-30min	0,63	4,92	38,52
MS-HEA2-4,5g	0,65	5,43	31,47
MS-HEA2-3g	0,64	5,15	30,57
LC2-PATRONF-OPC	0,69	7,76	33,72

Fuente: Investigación propia.

En este ensayo se pudo determinar los tiempos exactos de molienda para alcanzar la granulometría establecida, obteniendo diferentes tiempos de molienda con dosificaciones de 3% y 4.5% del intensificador de molienda. A continuación, se detallan los resultados obtenidos:

1. Según las muestras INT con el intensificador HEA2, cuyos tiempos de molienda fueron de 40 min y 50 min, con dosificaciones de 3% y 4.5% de intensificador de molienda respectivamente. Obteniendo que, a mayor dosificación de intensificador se obtuvieron granulometrías más finas.
2. Según las muestras MS con el intensificador HEA 2, cuyos tiempos de molienda fueron de 30 min para fabricar el LC2 – HEA 2 y de 120 min para fabricar el cemento Portland, los cuales fueron mezclados posterior a su molienda, con dosificaciones de 3% y 4.5% de intensificador de molienda respectivamente, resultó que a menor dosificación de intensificador se obtuvieron granulometrías más finas, tanto en su etapa de LC2 y posterior a su mezclado con el cemento Portland. En ambas dosificaciones el tiempo ideal fue de 30 minutos.

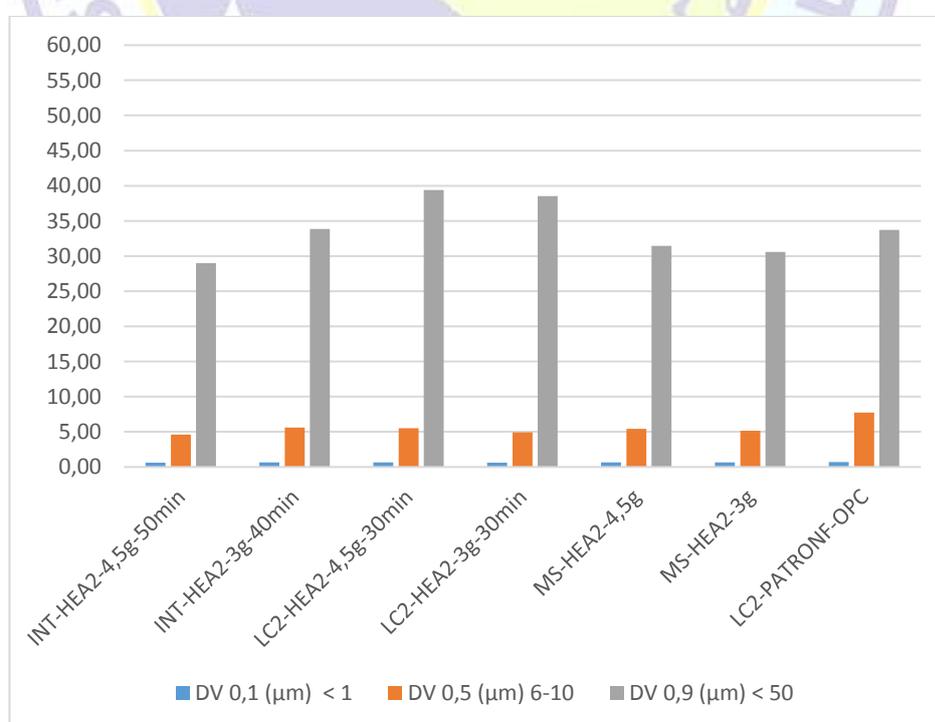


Gráfico 8 Comparación de resultados del Ensayo de distribución de partículas  
Fuente: Investigación propia.

Cabe mencionar que, para obtener los tiempos ideales de molienda separada, se realizó el Ensayo de distribución de partículas al LC2-HEA2 con dosificaciones de 3% y 4.5% de intensificador de molienda, efectuando además, el mismo ensayo al cemento Portland.

Los mejores resultados respecto a la granulometría se obtuvieron por el proceso de intermolienda a 50 min y con dosificación de 4.5%; es decir, tiene la granulometría más fina de todas las muestras ensayadas.

Se ensayó, también, una muestra del cemento Portland normal y el resultado obtenido como se observa en el gráfico 8 todas las muestras intermolienda y molienda separada son más finas que el cemento Portland convencional.

#### 4.2.2. Análisis de resultados del Ensayo de Blaine

*Tabla 19 Resultados del Ensayo de Blaine en la segunda etapa*

<b>INTENSIFICADOR</b>	<b>TIEMPO (S)</b>	<b>MASA (gr)</b>	<b>SUPERF. ESPC. (cm<sup>2</sup>/gr)</b>
INT-HEA2-4,5g-50min	391	2,5140	10241,10
INT-HEA2-3g-40min	272	2,5139	8510,20
MS-HEA2-4,5g	339	2,5140	9535,80
MS-HEA2-3g	385	2,5142	10162,20

*Fuente: Investigación propia.*

En la tabla 19 se observó los resultados del Ensayo de Blaine con 2 muestras por el proceso de intermolienda denominadas INT-HEA2-4,5g-50min y INT-HEA2-3g-40min con distintas dosificaciones del aditivo intensificador de molienda HEA2 de 4.5g y 3g y, por otro lado, 2 muestras más por el proceso de molienda separada denominadas MS-HEA2-4,5g y MS-HEA2-3g con 4.5 g y 3 g del mismo intensificador.

Analizando los resultados de las muestras intermolienda y comparando sus superficies específicas se tiene que: a mayor dosis del aditivo intensificador mayor superficie específica se obtiene; es decir, es menos permeable y, por ende, es un

material más fino. La proporción del aditivo si influye en el resultado de finura es decir que el aditivo está cumpliendo su función de intensificar el proceso de molienda.

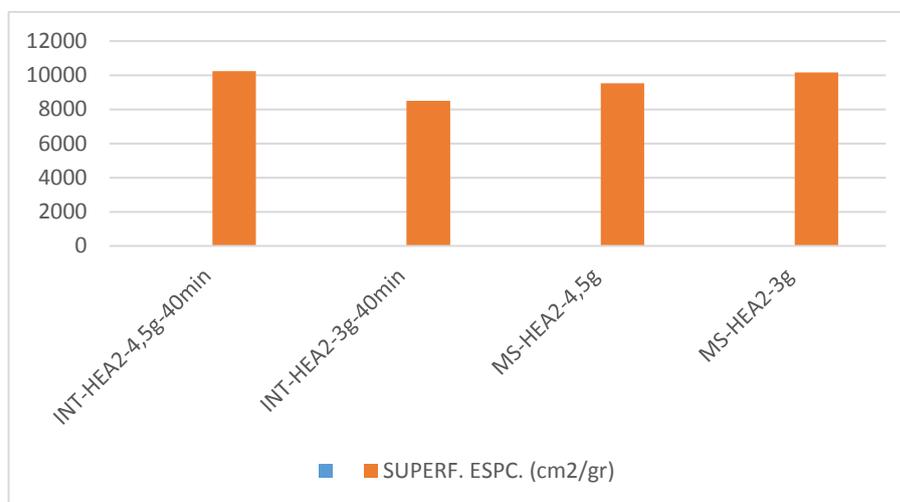


Gráfico 9 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el Ensayo de Blaine  
Fuente: Investigación propia.

Para el caso de las muestras de molienda separada, ocurre lo contrario, teniendo mayor superficie específica en la de 3g de adición del intensificador; pero, cabe recalcar que el intensificador solo actúa en la molienda del LC2, mas no, en la del cemento Portland normal.

#### 4.2.3. Análisis de resultados del Ensayo de Compresibilidad

Tabla 20 Resultados de Ensayo de compresibilidad en la segunda etapa

INTENSIFICADOR	P.V.S.	P.V.C.	% Compresibilidad
INT-HEA2-4,5g-50min	83,8	139,1	39,76
INT-HEA2-3g-40min	85,9	138,5	37,98
MS-HEA2-4,5g	87,4	132,5	34,04
MS-HEA2-3g	83,7	135,5	38,23

Fuente: Investigación propia.

En la tabla mostrada, se observa cómo actúa el intensificador en distintas proporciones de 3 g y 4.5 g, respectivamente, para los procesos de intermolienda y de molienda separada. En las muestras de intermolienda se tiene, mayor compresibilidad

en la dosificación de 4.5 g en comparación a la de 3 g, dando a entender que: el intensificador a mayor dosificación da como resultado una compresibilidad mayor.

En el caso de la molienda separada ocurre lo contrario, teniendo mayor compresibilidad en las muestras de 3 g por encima de las de 4.5 g pero se debe tomar en cuenta que solo actúa el intensificador en la molienda del LC2.

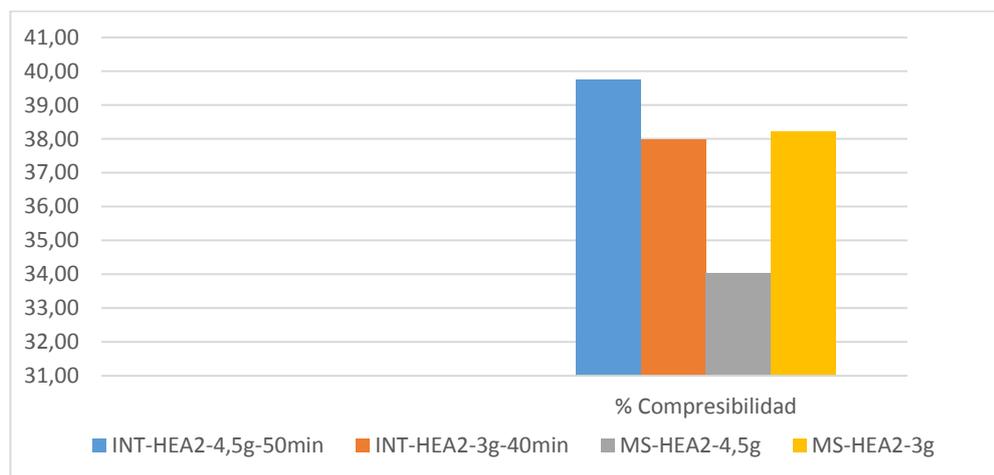


Gráfico 10 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el Ensayo de compresibilidad

Fuente: Investigación propia.

Si se compara las muestras de intermolienda vs. las muestras de molienda separada, bajo sus mismos parámetros de dosificación y tiempo de molienda, se tiene como resultado que: con dosificación de 4.5 g la intermolienda tiene mayor compresibilidad que, las demás muestras. Dando como resultado que, por el proceso de intermolienda con dosificación de 4.5 g, se obtiene el mayor porcentaje de compresibilidad.

#### 4.2.4. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de la consistencia normal

Tabla 21 Resultados del Ensayo de consistencia normal en la segunda etapa

INTENSIFICADOR	TIEMPO DE MOLIENDA	CANTIDAD DE AGUA (ml)	PENETRACIÓN (mm)	% DE AGUA
INT-HEA2-4,5g-50min	50 min	234,00	10,00	36,00
INT-HEA2-3g-40min	40 min	227,00	10,00	34,92
MS-HEA2-4,5g	30 min	242,00	13,00	37,23
MS-HEA2-3g	30 min	235,00	11,00	36,15

Fuente: Investigación propia.

Se observa en la tabla 21 que en las muestras de intermolienda, la que se le agregó una cantidad de 4.5 g de intensificador necesitó de mayor cantidad de agua para alcanzar su consistencia normal.

Para las muestras de molienda separada, se repite el mismo caso, a mayor cantidad de intensificador mayor cantidad de agua necesita la muestra para alcanzar su consistencia normal. El intensificador actúa de manera que mientras más intensificador se le añade mayor porcentaje de agua requiere para obtener una consistencia normal.

#### **4.2.5. Análisis de resultados del Ensayo de minicono**

En la Anexo E se observa que; a la muestra que se le añadió 4.5 g de intensificador de molienda tiene un menor diámetro promedio en comparación con la muestra de 3 g de intensificador y, esto, da como resultado una mayor área en la muestra de 3 g; luego de un análisis, se puede determinar que: al aumentar la dosis de intensificador no se produce un cambio positivo en la plasticidad del material.

Mientras que, en las dos muestras de molienda separada, el resultado es viceversa; es decir: la muestra con 4.5 g da un diámetro mayor que la de 3g; en otras palabras, el área es mayor para la muestra de 4.5 g, en este caso el intensificador actúa diferente: a mayor dosis da una mayor área y plasticidad, esto puede tener relación al proceso de molienda, en el que, el intensificador solo se le añade al proceso de molienda del LC2 y no al cemento Portland.

El tener que adicionar menos intensificador para alcanzar una mejor plasticidad es un punto muy favorable a considerar en el proceso de intermoliendas ya que genera ahorro en costos de intensificador.

#### **4.2.6. Análisis de resultados del Ensayo de fluidez**

En el Anexo F se puede corroborar los resultados obtenidos en el Ensayo de minicono, ya que, a mayor dosificación de intensificador de molienda la fluidez disminuye para el caso de intermoliendas y es viceversa para el caso de molienda separada es decir a mayor dosificación de intensificador de molienda la fluidez

aumenta. Usar menos dosificación de intensificador de molienda y obtener una fluidez mayor es un punto favorable para el aspecto económico y sería un efecto positivo; cabe recalcar que este efecto de mayor fluidez en menor dosificación del intensificador de molienda solo se produce por el proceso de intermolienda.

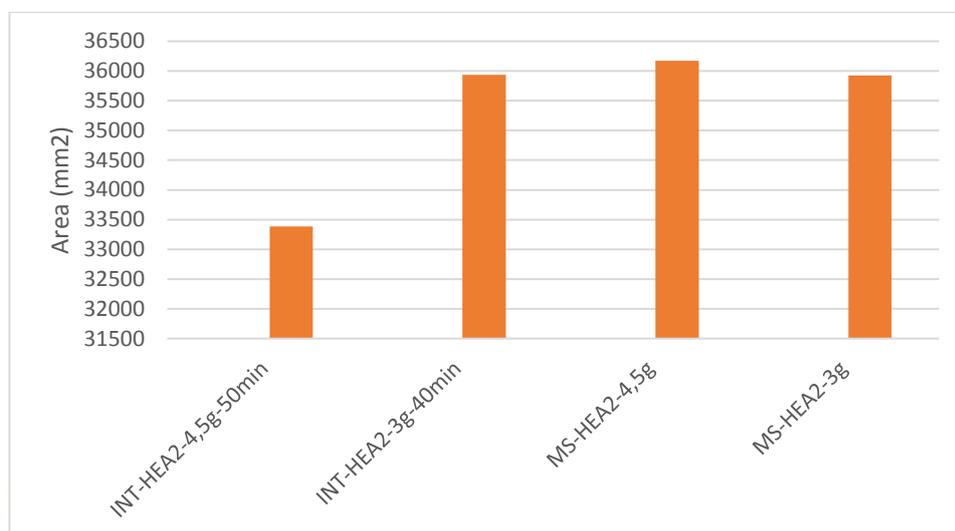


Gráfico 11 Gráfica comparativa de los resultados obtenidos en el ensayo de fluidez  
Fuente: Investigación propia.

#### 4.2.7. Análisis de resultados del Ensayo de resistencias a la compresión de morteros

Tabla 22 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros en la segunda etapa

DESCRIPCIÓN	1 Día (Mpa)	3 Días (Mpa)	7 Días (Mpa)	28 Días(Mpa)
MS-HEA2-30M 3%	5,10	11,90	19,75	31,96
MS-HEA2-30M 4,5%	5,50	12,20	20,10	31,13
INT-HEA2-40M 3%	4,20	10,80	20,13	33,97
INT-HEA2-50M 4,5%	5,29	11,40	21,30	29,52

Fuente: Investigación propia.

Como se observa en la tabla 22, las muestras de intermolienda dan como resultado que mayor resistencia obtiene el espécimen al que se le añade 4.5 g de intensificador; cabe recalcar que el patrón se repite solo hasta la edad de 7 días, porque a los 28 días la resistencia aumenta en la muestra que contiene 3 g de intensificador superando a la

de 4.5 g, siendo este un dato interesante, ya que, al tener menos cantidad de intensificador representa un ahorro en el aspecto económico.

Para las muestras de molienda separada se repite el mismo caso en todas las edades de la misma manera que en las muestras de intermolienda confirmando el efecto del intensificador en el tema de resistencias a la compresión y siendo favorable, ya que, es un punto a considerar en el presupuesto por la dosificación del intensificador.

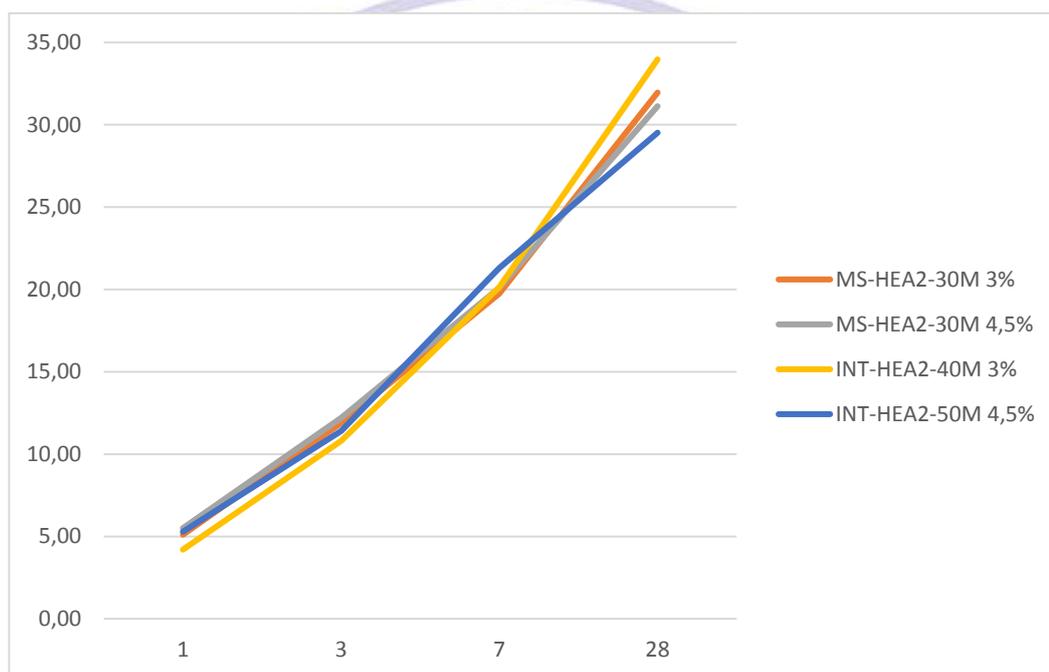


Gráfico 12 Resultados del Ensayo de resistencia a la compresión de morteros  
Fuente: Investigación propia.

#### 4.2.8. Análisis de resultados del Ensayo de determinación de tiempo de fraguado

Tabla 23 Resultados del Ensayo de tiempo de fraguado inicial y final en la segunda etapa

INTENSIFICADOR	TIEMPO DE MOLIENDA	T. INICIAL (min)	T. FINAL (min)
NT-HEA2-4,5g-50min	50	104	230
INT-HEA2-3g-40min	40	101	210
MS-HEA2-4,5g	30	147	228
MS-HEA2-3g	30	143	212

Fuente: Investigación propia de autores.

En la tabla 23 se tiene 4 muestras, las cuales, están clasificadas en 2 muestras de intermolienda y 2 muestras de molienda separadas con sus tiempos de molienda especificados. Los tiempos de fraguado tanto inicial y final son menores en las muestras con dosificación de 3g de aditivo intensificador demostrando que a mayor dosificación los tiempos de fraguado aumentan.

Queda demostrado que, el intensificador influye en el resultado del fraguado, siendo la variable su dosificación y tiempos de molienda, ya que, comparando los tiempos con los de 15 min y 20 min se tiene resultados mayores en dichas muestras, a excepción de las de molienda separada que muestran tiempos mayores en las de 30 min de molienda; es decir, 10 min más que las muestras anteriores. Demostrando que las muestras de intermoliendas siguen un mismo patrón, a mayor dosificación y tiempo de molienda se obtiene menores tiempos de fraguado.

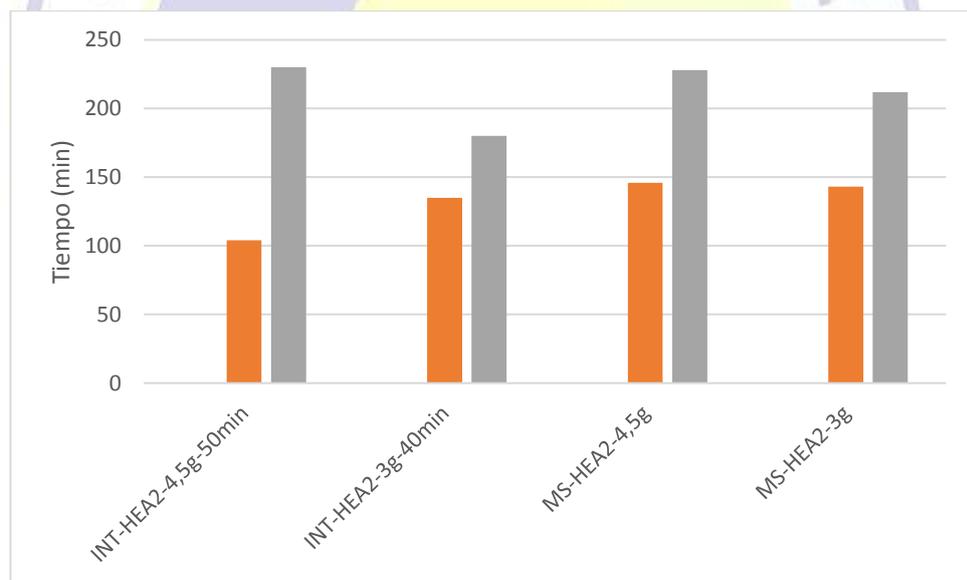


Gráfico 13 Comparación de resultados del Ensayo de tiempo de fraguado  
Fuente: Investigación propia.

## CAPÍTULO V

### ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

#### 5.1. Costo de la producción del cemento Portland convencional

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
<b>RUBRO: Cemento Portland</b>			<b>UNIDAD: Ton</b>	
DESCRIPCIÓN	UNIDAD		COSTO	
Mano de obra calificada	Global		\$4,65	
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$4,65</b>	
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	TOTAL
Caliza	kg	50	0,02	\$1,00
Clinker	kg	890	0,08	\$69,42
Yeso	kg	60	0,04	\$2,40
Lubricantes	kg	0,39	2,87	\$1,12
Energía eléctrica	Kwh	40,16	0,03	\$1,00
Bolas de molienda	kg	0,1	1,00	\$0,10
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$75,04</b>	
OTROS				
Gastos indirectos de producción	Global		\$ 4,10	
Gastos de administración	Global		\$0,16	
Gastos de distribución y venta	Global		\$ 1,69	
Gastos bancarios	Global		\$ 0,05	
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$ 6,00</b>	
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>			<b>\$ 79,69</b>	
<b>TOTAL COSTO INDIRECTO</b>			<b>\$ 6,00</b>	

<b>COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN:</b>	<b>\$ 85,69</b>
-----------------------------------	-----------------

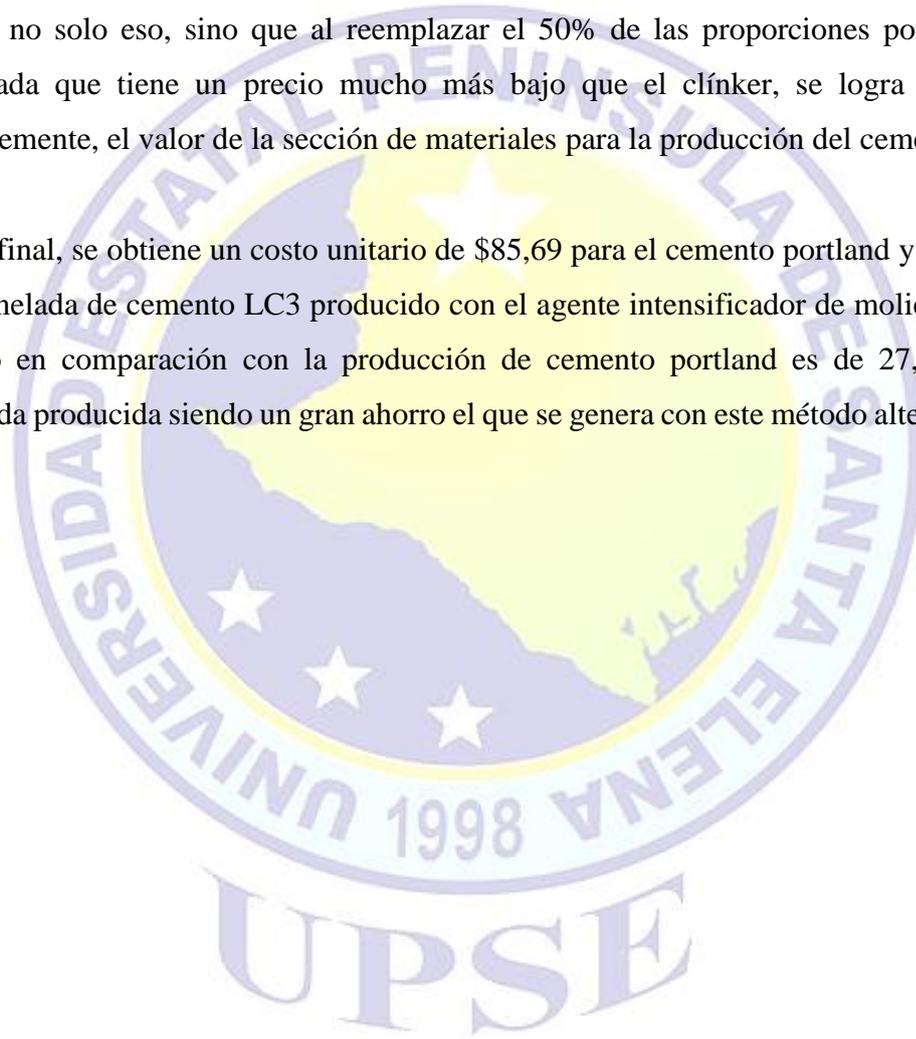
## 5.2. Costo de la producción del cemento LC3 por el proceso de intermolienda

<b>ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS</b>				
<b>RUBRO: LC3 - 50% CON 0,03% DE INTENSIFICADOR</b>			<b>UNIDAD: Ton</b>	
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDAD</b>		<b>COSTO</b>	
Mano de obra calificada	Global		\$4,65	
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$4,65</b>	
<b>MATERIALES</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>PRECIO UNIT.</b>	<b>TOTAL</b>
Caliza	kg	150	0,02	\$3,00
Arcilla calcinada	kg	315	0,04	\$12,60
Clinker	kg	470	0,08	\$36,66
Yeso	kg	65	0,04	\$2,60
Lubricantes	kg	0,39	2,87	\$1,12
Energía eléctrica	Kwh	13,39	0,03	\$0,33
Intensificador de molienda HEA 2	kg	0,3	1,00	\$0,3
Bolas de molienda	kg	0,1	1,00	\$0,10
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$56,71</b>	
<b>OTRO</b>				
Gastos indirectos de producción	Global		\$ 4,10	
Gastos de administración	Global		\$0,16	
Gastos de distribución y venta	Global		\$ 1,69	
Gastos bancarios	Global		\$ 0,05	
<b>SUBTOTAL:</b>			<b>\$ 6,00</b>	
<b>TOTAL COSTO DIRECTO</b>			<b>\$ 61,36</b>	

	<b>TOTAL COSTO INDIRECTO</b>	<b>\$ 6,00</b>
	<b>COSTO TOTAL DE PRODUCCIÓN:</b>	<b>\$ 67,36</b>

Para obtener el costo de producción de una tonelada de LC3 con el aditivo intensificador de molienda se procede a realizar el análisis de costo unitario, considerando que el tiempo de molienda se reduce de 120 min a 40 min, factor que se pudo lograr por el efecto del agente intensificador y la energía necesaria para producir una tonelada de este material es de apenas 13.39 Kwh, reduciendo su costo en este rubro; no solo eso, sino que al reemplazar el 50% de las proporciones por arcilla calcinada que tiene un precio mucho más bajo que el clínker, se logra reducir, notablemente, el valor de la sección de materiales para la producción del cemento.

Al final, se obtiene un costo unitario de \$85,69 para el cemento portland y \$ 67.36 por tonelada de cemento LC3 producido con el agente intensificador de molienda. El ahorro en comparación con la producción de cemento portland es de 27,2% por tonelada producida siendo un gran ahorro el que se genera con este método alternativo.



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

Luego de haber realizado los ensayos de finura, reología y propiedades físicas con el fin de conocer el comportamiento de 3 distintos intensificadores de molienda entre los cuales están el intensificador MTDA 290, MTDA 514, HEA 2, se logró elegir el intensificador HEA 2 por tener resultados favorables en los ensayos ya mencionados.

El intensificador HEA 2 con dosificación de 0.03% es decir 300 gr por tonelada influye de manera favorable en la finura, reología y propiedades físico-mecánicas mejorando las prestaciones de la adición mineral LC2 y teniendo mejores resultados por el proceso de intermolienda en el cual es mezclado con el clínker creando el LC3.

El tiempo de molienda óptimo es de 40 min por el proceso de intermolienda reduciendo el tiempo normal de molienda de un cemento portland convencional que es de 120 minutos.

El costo real de producción de una tonelada de LC3 es de \$67.36 generando un ahorro del 27,2% comprándolo con el cemento portland convencional.

Se genera un ahorro de recursos energéticos comparando el LC3 con el cemento portland convencional, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> de 800 kg a 267 kg por cada tonelada producida siendo este material menos contaminante.

## 6.2. Recomendaciones:

Se recomienda efectuar estudios micro estructurales para determinar el componente activo del aditivo; también, estudios de calorimetría para determinar el calor de hidratación del LC3.

Se recomienda efectuar estudios con reemplazos diferentes a 50% de clínker y LC2 y ver sus prestaciones en ensayos de reología, finura y propiedades mecánicas.

Se recomienda industrializar este tipo de cemento por dar mejores prestaciones y ser más económico y de bajo de carbono.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cement and concrete research (2012). Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone.
- [2] Cementos Tenquedama (2017). **¿Qué es el cemento y cuál es su composición?** <http://www.cetesa.com.co/que-es-el-cemento-y-cual-es-su-composicion/>
- [3] Clasificación de (2010). Tipos de cemento. <https://www.clasificacionde.org/tipos-de-cemento/>
- [4] Construction and buildings materials (2010). additivity effects in the rheology of fresh concrete containing water-reducing admixtures
- [5] Dialnet (2012). Comportamiento reológico de las pastas de cemento con adiciones minerales y aditivos superplastificantes. Dialnet-EfectoDeLaVariacionAguacementoEnElConcreto-4835626.pdf
- [6] Dianet (2011). Efectos de la relación agua/cemento en el concreto. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4034611>
- [7] Ecured (2011). Cemento. <https://www.ecured.cu/Cemento>
- [8] Fanny Araujo (2015). “Efecto de la finura del caolín calcinado como material de sustitución del cemento portland en morteros”.
- [9] Grisel Garcia Guillen (2011). “Estudio del proceso de hidratación de pastas de cemento portland reemplazadas con escoria granulada de alto horno, ceniza volante y metacaolin, utilizando dos aditivos superplastificantes”. <http://eprints.uanl.mx/2416/1/1080221573.pdf>
- [10] Jean Ambroise (1994). Properties of metakaolin blended cements.
- [11] Materconstrucc (2013) .Influencia de los aditivos de clínker en las características intrínsecas del cemento y el comportamiento de los morteros. <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/292/338>
- [12] Materiales de construcción Vol 20 [1970]. Sobre el empleo de aditivos de molienda en la molturación del cemento.(pp 193-201).

[13] Materials and structures (2009). Effect of specific energy consumption on fineness of portland cement incorporating amine or glycol-based grinding aids.

[14] Normas UNE-EN 196-3 (2010). Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen

[15] Revista Ekos negocios (2014). Cemento¿Oligopolio? Industria prospera pero controversial. <http://www.ekosnegocios.com/revista/pdftemas/305.pdf>

[16] Revista Lideres (2013). En Ecuador, el consumo de cemento crece a ritmo sostenido.<https://www.revistalideres.ec/lideres/ecuador-consumo-cemento-crece-ritmo.html>

[17] Rolan Stulz Kiran (1993). Materiales de construcción apropiados. <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>

[18] Scielo (2008). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento pòrtland. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532006000300012](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000300012)

[19] Scielo (2008). Molienda de clinker de cemento: influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n158/a07v76n158.pdf>

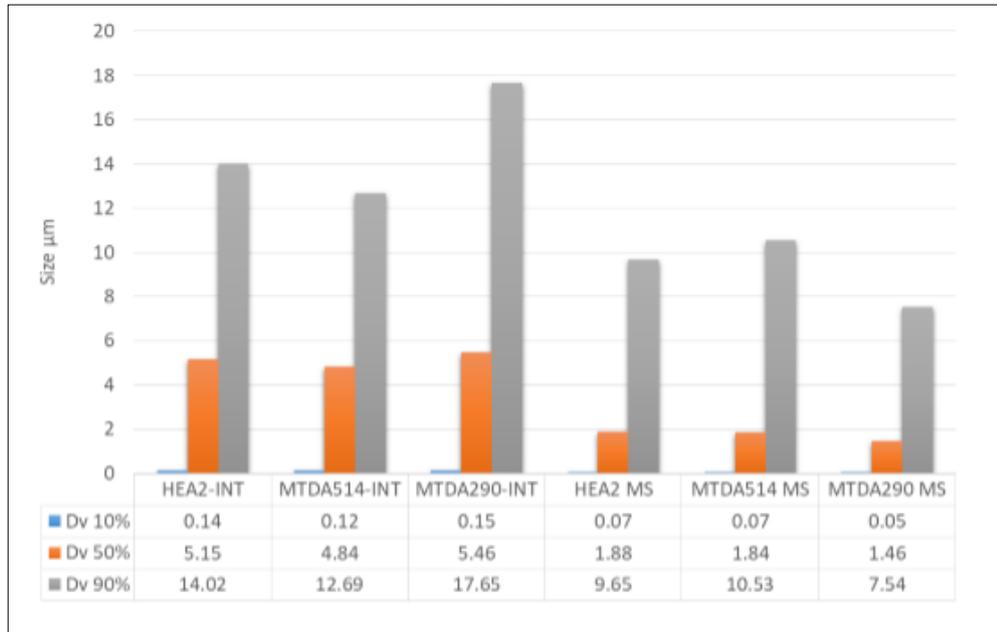
[20] Sciencedirect (2007). The influence of grinding technique on the liberation of minerals and cement properties

[21] Sonni Vasquez (2017). Cemento hidrofóbico: fabricación, propiedades y usos. <https://www.yoingeniero.xyz/civil/cemento-hidrofobico-fabricacion-propiedades-usos/>

## ANEXOS

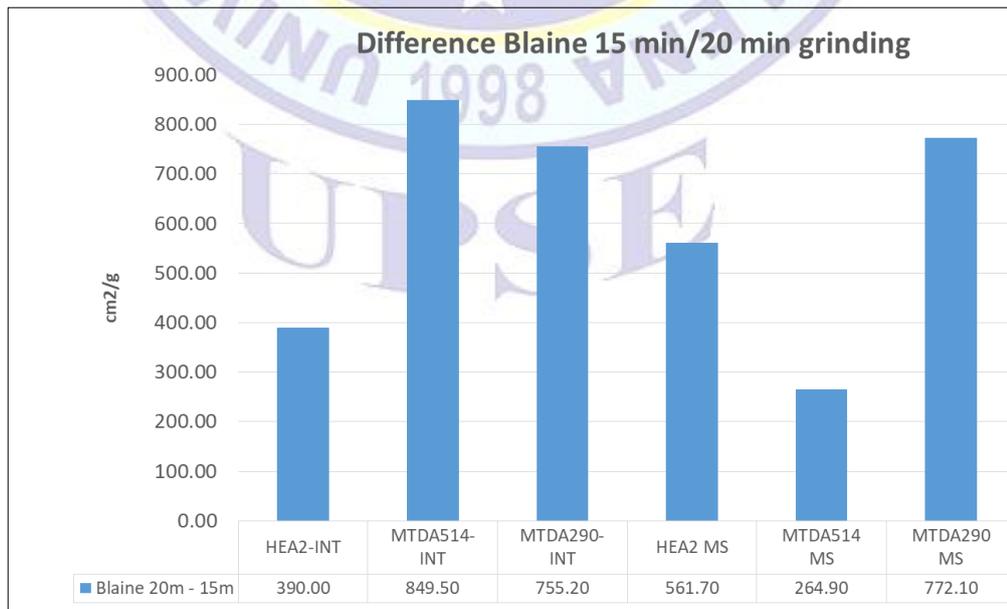
### Anexo A

Gráfica comparativa de diferencias entre la distribución de partículas de tiempo de molienda de 15min y 20 min.



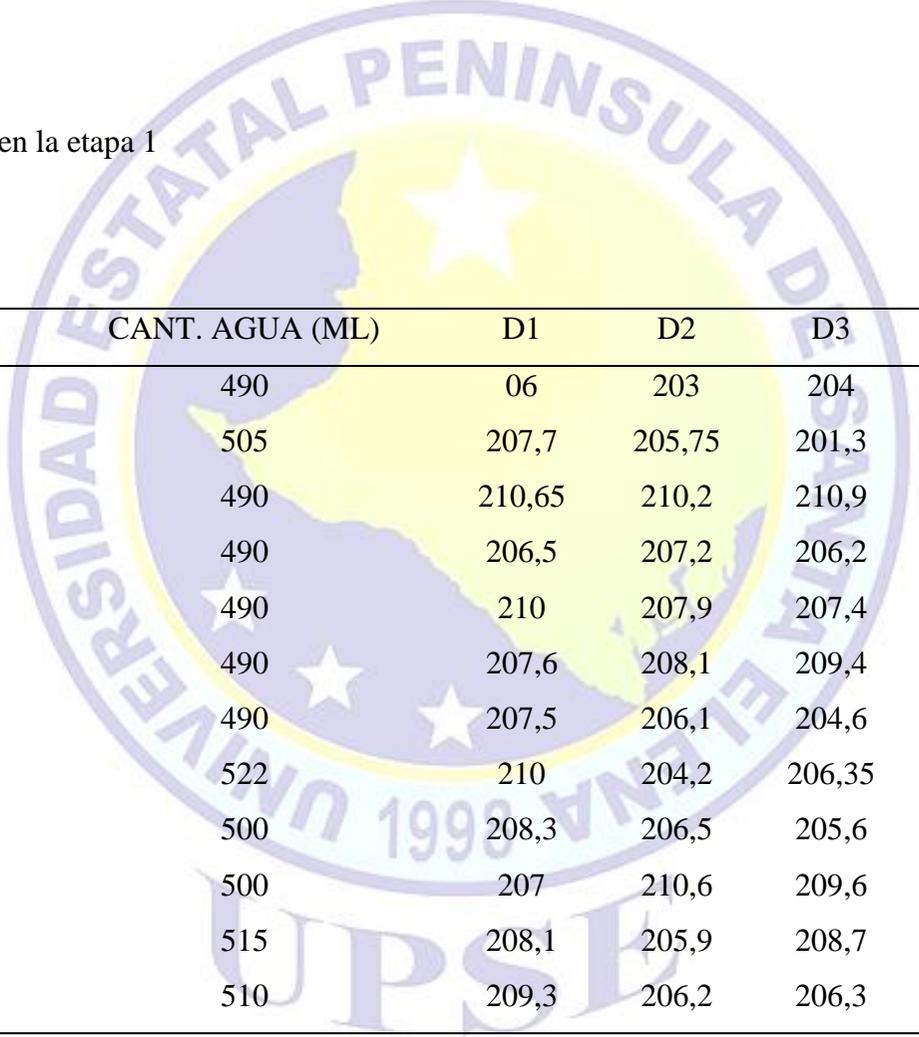
### Anexo B

Diferencias entre superficies específicas de 15 min y 20 min



## Anexo C

Resultados del Ensayo de fluidez en la etapa 1



INTENSIFICADOR	CANT. AGUA (ML)	D1	D2	D3	D4	D (MM)
I-MTDA 290-15	490	06	203	204	206	204,75
I-MTDA 290-20	505	207,7	205,75	201,3	205	204,94
I-MTDA 514-15	490	210,65	210,2	210,9	214,7	211,61
I-MTDA 514-20	490	206,5	207,2	206,2	207,2	206,78
I-HEA 2-15	490	210	207,9	207,4	206,6	207,98
I-HEA 2-20	490	207,6	208,1	209,4	205,4	207,63
MS-MTDA 290-15	490	207,5	206,1	204,6	206,8	206,25
MS-MTDA 290-20	522	210	204,2	206,35	209,4	207,49
MS-MTDA 514-15	500	208,3	206,5	205,6	207,3	206,93
MS-MTDA 514-20	500	207	210,6	209,6	211,4	209,65
MS-HEA 2-15	515	208,1	205,9	208,7	205,5	207,05
MS-HEA 2-20	510	209,3	206,2	206,3	204,8	206,65

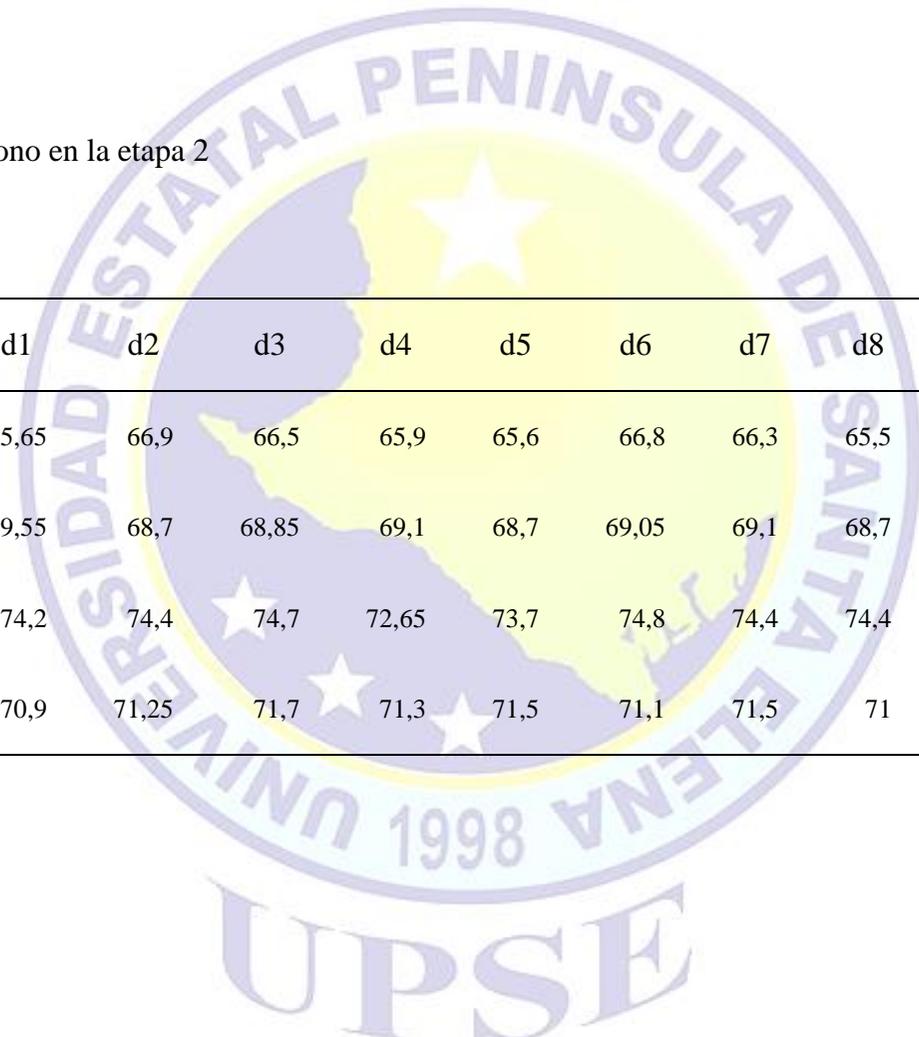
## Anexo D

Resultados del Ensayo de minicono en la etapa 1

INTENSIFICADOR	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	D (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )
I-MTDA 290-15	87,98	87,86	86,5	85,55	85,65	86,29	86,95	87,16	86,74	5909,54
I-MTDA 290-20	79,48	78,14	78,12	78,19	77,27	78,22	78,83	76,75	78,13	4793,69
I-MTDA 514-15	90,07	88,7	89,88	86,29	85,59	85,78	87,47	89,11	87,86	6062,96
I-MTDA 514-20	74,92	75,79	75,37	76,28	76,52	76,4	77,2	76,16	76,08	4546,02
I-HEA 2-15	78,83	78,14	75,63	78,71	79,27	78,66	78,78	78,93	78,37	4823,65
I-HEA 2-20	84,38	84,74	85,28	86	84,7	85,17	84,06	84,23	84,82	5650,49
MS-MTDA 290-15	78,11	77,61	78,28	79,45	78,62	79,32	78,71	78,74	78,61	4852,78
MS-MTDA 290-20	76,77	75,48	75,07	74,71	73,55	75,5	75	74,81	75,11	4430,98
MS-MTDA 514-15	79,08	79,97	79,14	79,98	81,47	80,12	79,12	78,73	79,70	4989,08
MS-MTDA 514-20	69	70,65	71,31	70,7	70,75	69,59	68,95	69,86	70,10	3859,59
MS-HEA 2-15	76,83	77,63	78,44	77,32	76,71	76,15	76,6	76,19	76,98	4654,66
MS-HEA 2-20	75,83	78,11	80,16	83,86	85,19	84,25	81,1	76,99	80,69	5113,15

## Anexo E

Resultados del Ensayo de minicono en la etapa 2



INTENSIFICADOR	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	D (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )
INT-HEA2-4,5g-50min	65,65	66,9	66,5	65,9	65,6	66,8	66,3	65,5	66,14	3436,11
INT-HEA2-3g-40min	69,55	68,7	68,85	69,1	68,7	69,05	69,1	68,7	68,97	3735,89
MS-HEA2-4,5g	74,2	74,4	74,7	72,65	73,7	74,8	74,4	74,4	74,16	4319,02
MS-HEA2-3g	70,9	71,25	71,7	71,3	71,5	71,1	71,5	71	71,28	3990,62

## Anexo F

Resultados del Ensayo de fluidez en la etapa 2

<b>INTENSIFICADOR</b>	<b>CANT. AGUA (ml)</b>	<b>d1</b>	<b>d2</b>	<b>d3</b>	<b>d4</b>	<b>D (mm)</b>	<b>ÁREA (mm<sup>2</sup>)</b>
INT-HEA2-4,5g-50min	512	205,9	207,95	204,95	205,9	206,18	33.385,81
INT-HEA2-3g-40min	512	214,5	213,3	213,65	214,15	213,90	35.934,49
MS-HEA2-4,5g	515	215,1	215,1	213,5	214,7	214,60	36.170,07
MS-HEA2-3g	515	215,1	215,3	212,7	212,4	213,88	35.926,09