



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“IMPLEMENTACION DE UN PROCEDIMIENTO QUE ESTIME  
RESISTENCIAS A COMPRESIÓN EN PASTA DE CEMENTO POR  
TERMOMETRÍA, EN LA EMPRESA UNIÓN CEMENTERA  
NACIONAL UCEM S.A –PLANTA CHIMBORAZO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTORA: JOHANA ESTEFANIA ORNA QUINTANILLA**

**DIRECTOR: ING.MARIO GUSTAVO VILLACRÉS ÁLVAREZ**

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2019**

**©2019, Johana Estefanía Orna Quintanilla**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal de Trabajo de Titulación certifica que: el trabajo de titulación “**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO QUE ESTIME RESISTENCIAS A COMPRESIÓN EN PASTA DE CEMENTO POR TERMOMETRÍA, EN LA EMPRESA UNIÓN CEMENTERA NACIONAL UCEM S.A – PLANTA CHIMBORAZO.**” de responsabilidad de la señorita Johana Estefanía Orna Quintanilla, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal de Trabajo de Titulación, quedando autorizada su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Mario Gustavo Villacrés Álvarez

.....

.....

**DIRECTOR DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

Ing. Segundo Hugo Calderón

.....

.....

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

Yo, JOHANA ESTEFANIA ORNA QUINTANILLA soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este trabajo de titulación y el patrimonio intelectual del trabajo de titulación pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Johana Estefanía Orna Quintanilla

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme llegar hasta donde estoy, por todo lo que me ha dado, cada bendición y lección de vida que me han ayudado a ser más fuerte y por su infinito amor hacia mí.

A mis padres, porque gracias a ellos he podido culminar mi carrera, por su esfuerzo incondicional para que yo pueda seguir adelante, por sus consejos y sus valores que me han inculcado gracias a ustedes soy como soy.

A mi esposo que ha estado a mi lado siempre aconsejándome y dándome ánimo en momentos difíciles.

**Johana**

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme acompañado en el transcurso, y ser mi fortaleza en momentos de debilidad.

A mis padres Narcisa y Guillermo que han sido mi apoyo incondicional para cumplir mi meta, por siempre estar ahí dándome ánimo y mostrándome que en la vida no existen imposibles, que es cuestión de perseverancia, y luchar por lo que uno quiere.

A mi esposo Estalin por estar ahí siempre acompañándome, y siempre dándome ánimo para seguir adelante, y saber que no estoy sola, si no que tengo a una persona maravillosa a mi lado ayudándome siempre a seguir adelante, y apoyándome para no derrotarme fácilmente.

A mi hermana y sobrinos que siempre me han dado ánimo para seguir adelante, a pesar de los obstáculos.

A la empresa Unión cementera nacional UCEM S.A – Planta Chimborazo, por ayudarme a realizar mi trabajo de titulación en sus instalaciones.

A la Ing. Maruma Rodríguez, quien me dedico su tiempo para explicarme, ayudarme y estar preocupada en que el proyecto salga exitoso.

A la Ing. Silvia Ramos, quien me ayudó y estuvo pendiente de mí en el laboratorio de control de calidad.

A mis tutores Ing. Mario Villacrés y Ing. Hugo Calderón, por brindarme de su tiempo y experiencia en la elaboración de mi trabajo de titulación.

**Johana**

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii

### CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Identificación del Problema.....	1
1.2    Justificación del proyecto.....	1
1.3    Objetivos de la investigación .....	2
1.3.1    General.....	2
1.3.2    Específicos .....	2

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	3
2.1    Antecedentes de la Investigación .....	3
2.2    Marco Conceptual.....	4
2.2.1    Recorrido histórico del cemento .....	4
2.2.2    Definición del Cemento.....	5
2.2.3    Puzolana .....	5
2.2.4    Arcilla .....	5
2.2.5    Tipos de Cemento .....	6
2.2.5.1    Cementos Naturales .....	6
2.2.5.2    Cementos Artificiales .....	6
2.2.6    Fabricación del Cemento.....	8
2.2.7    Química del Cemento.....	13
2.2.8    Compuestos químicos del cemento Portland.....	16

2.2.8.1	<i>Silicato tricálcico</i> .....	17
2.2.8.2	<i>Silicato dicálcico</i> .....	17
2.2.8.3	<i>Aluminato tricálcico</i> .....	18
2.2.8.4	<i>Ferro Aluminato Tetracálcico</i> .....	18
<b>2.2.9</b>	<b><i>Hidratación del Cemento</i></b> .....	<b>19</b>
2.2.9.1	<b><i>Hidratación de Silicatos</i></b> .....	<b>19</b>
2.2.9.2	<i>Hidratación de los aluminatos</i> .....	20
<b>2.2.10</b>	<b><i>Factores que influyen en la hidratación del Cemento</i></b> .....	<b>21</b>
2.2.10.1	<i>Finura</i> .....	22
2.2.10.2	<i>Relación Agua / Cemento</i> .....	22
2.2.10.3	<i>Materiales suplementarios de cemento (SCM)</i> .....	22
2.2.10.4	<i>Temperatura inicial</i> .....	23
2.2.10.5	<i>Ceniza volantes</i> .....	23
<b>2.2.11</b>	<b><i>Velocidad de Hidratación</i></b> .....	<b>23</b>
<b>2.2.12</b>	<b><i>Calor de Hidratación del Cemento Portland</i></b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.13</b>	<b><i>Calorimetría</i></b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.14</b>	<b><i>Regresión lineal</i></b> .....	<b>26</b>
2.2.14.1	<i>Recta de regresión</i> .....	27
2.2.14.2	<i>Coefficiente de Correlación de Pearson</i> .....	27
<b>2.2.15</b>	<b><i>Desviación Estándar</i></b> .....	<b>27</b>

### **CAPÍTULO III**

<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Hipótesis</b> .....	<b>29</b>
3.1.1 <i>Hipótesis General</i> .....	29
3.1.2 <i>Hipótesis Específicas</i> .....	29
<b>3.2 Identificación de Variables</b> .....	<b>29</b>
3.2.1 <i>Variables independientes</i> .....	29
3.2.2 <i>Variables dependientes</i> .....	30

<b>3.3</b>	<b>Operacionalización de Variables</b> .....	30
<b>3.4</b>	<b>Matriz de Consistencia</b> .....	31
<b>3.5</b>	<b>Tipo y Diseño de Investigación</b> .....	33
3.5.3	<i>Unidad de Análisis</i> .....	33
3.5.4	<i>Población de Estudio</i> .....	33
3.5.5	<i>Tamaño de Muestra</i> .....	34
3.5.6	<i>Selección de muestra</i> .....	34
3.5.7	<i>Técnicas de recolección de datos</i> .....	34
3.5.7.1	<i>Materiales y Equipos</i> .....	34
3.5.7.2	<i>Metodología para la determinación de temperatura máxima en pasta de cemento</i> . 35	
3.5.7.3	<i>Determinación de resistencia a la compresión de morteros de cemento, con el método de ensayo de la norma INEN 488:2009.</i> .....	36
3.5.7.4	<i>Determinación del residuo de malla T 325 ( 45 <math>\mu\text{m}</math>), según la norma INEN 197..</i> 37	
3.5.7.5	<i>Determinación de pérdidas por calcinación</i> .....	37

## **CAPITULO IV**

<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	38
<b>4.1</b>	<b>Resultados</b> .....	38
<b>4.2</b>	<b>Pruebas de Hipótesis</b> .....	49
4.2.1	<i>Hipótesis general</i> .....	49
4.2.2	<i>Hipótesis Específicas</i> .....	54
<b>4.3</b>	<b>Discusión de resultados</b> .....	60

<b>CONCLUSIONES</b> .....	61
---------------------------	----

<b>RECOMENDACIONES</b> .....	62
------------------------------	----

## **GLOSARIO**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b>	Componentes del Clinker del Cemento .....	14
<b>Tabla 2-2:</b>	Compuestos que forman en el Clinker.....	16
<b>Tabla 1-3:</b>	Calor de Hidratación de cada compuesto principal del Clinker de cemento .....	25
<b>Tabla 2-3:</b>	Operacionalización de Variables .....	30
<b>Tabla 3-3:</b>	Matriz de Consistencia.....	31
<b>Tabla 4-3:</b>	Materiales y equipos .....	34
<b>Tabla 1-4:</b>	Toma de temperatura en la pasta de cemento del método A.....	38
<b>Tabla 2-4:</b>	Toma de temperatura en la pasta de cemento del método B.....	38
<b>Tabla 3-4:</b>	Efecto de la variación de temperatura en el agua de mezclado para la elaboración de pasta de cemento Tipo HE. ....	39
<b>Tabla 4-4:</b>	Temperaturas máximas de hidratación en pasta de cemento Tipo IP .....	40
<b>Tabla 5-4:</b>	Temperaturas máximas de hidratación en pasta de cemento Tipo HE .....	40
<b>Tabla 6-4:</b>	Resistencia a compresión del cemento Tipo IP.....	41
<b>Tabla 7-4:</b>	Resistencia a compresión del cemento Tipo HE.....	42
<b>Tabla 8-4:</b>	Estandarización del cemento puzolánico Tipo IP .....	43
<b>Tabla 9-4:</b>	Estandarización del cemento puzolánico Tipo HE .....	43
<b>Tabla 10-4:</b>	Parámetros que afectan la resistencia a compresión a un día del cemento Tipo IP.....	44
<b>Tabla 11-4:</b>	Parámetros que afectan la resistencia a compresión a un día del cemento Tipo HE .....	45
<b>Tabla 12-4:</b>	Cálculo para la obtención de la ecuación lineal del cemento puzolánico Tipo IP.....	46
<b>Tabla 13-4:</b>	Cálculo para la obtención de la ecuación lineal del cemento puzolánico Tipo HE.....	47
<b>Tabla 14-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a un día del cemento Tipo IP .....	49
<b>Tabla 15-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a 3 días del cemento Tipo IP.....	50
<b>Tabla 22-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a 7 días del cemento Tipo IP.....	51
<b>Tabla 16-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a un día del cemento Tipo HE.....	51
<b>Tabla 17-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a 3 días del cemento Tipo HE .....	52
<b>Tabla 18-4:</b>	Predicción de resistencia a compresión a 7 días del cemento Tipo HE .....	53

<b>Tabla 19-4:</b>	Cálculos para la correlación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión del cemento puzolánico Tipo IP.....	55
<b>Tabla 20-4:</b>	Cálculos para la correlación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión del cemento puzolánico Tipo HE. ....	56
<b>Tabla 21-4:</b>	Repetición para la estandarización del cemento Tipo IP .....	57
<b>Tabla 22-4:</b>	Repetición para la estandarización del cemento Tipo HE .....	58
<b>Tabla 23-4:</b>	Correlación de la resistencia en función de los parámetros más importantes del cemento puzolánico Tipo IP. ....	58
<b>Tabla 24-4:</b>	Correlación de la resistencia en función de los parámetros más importantes del cemento puzolánico Tipo HE.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b>	Empaquetado.....	13
<b>Figura 2-2:</b>	Diagrama del proceso de fabricación del cemento .....	13
<b>Figura 3-2:</b>	Formación de Cristales Alita .....	17
<b>Figura 4-2:</b>	Formación de cristales Belita.....	18
<b>Figura 5-2:</b>	Formación de Ferro aluminato tetracálcico y aluminato tricálcico.....	19
<b>Figura 6-2:</b>	Hidratación de la partícula de cemento.....	19
<b>Figura 7-2:</b>	Curva tipo del desprendimiento de calor durante la hidrolisis de un cemento. ..	24
<b>Figura 8-2:</b>	Evolución de calor en función al tiempo. ....	26

## INDICE DE FOTOGRAFIAS

<b>Fotografía 1-2:</b>	Recepción de Materia Prima .....	8
<b>Fotografía 4-2:</b>	Bandas tripper .....	9
<b>Fotografía 5-2:</b>	Molino de crudo .....	9
<b>Fotografía 6-2:</b>	Torre de Pre-calcinación .....	10
<b>Fotografía 7-2:</b>	Horno Allis Chalmers.....	11
<b>Fotografía 8-2:</b>	Molino de Clinker .....	12
<b>Fotografía 9-2:</b>	Silo de cemento .....	12

## INDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-4:</b>	Resistencia a compresión del cemento Tipo ( IP y HE).....	54
<b>Gráfico 2-4:</b>	Recta de regresión lineal del cemento puzolánico Tipo IP. ....	56
<b>Gráfico 3-4:</b>	Recta de regresión lineal del cemento puzolánico Tipo HE.....	57

## ÍNDICE DE ANEXO

- Anexo A:** Ensamblaje del equipo para medición de la Temperatura máxima en pasta de cemento
- Anexo B:** Resistencia a compresión
- Anexo C:** Equipos para obtener perdida por calcinación del cemento.
- Anexo D:** Obtención de finura del cementó T- 325 (45  $\mu\text{m}$ )
- Anexo E:** Equipo para obtención de datos del C3S, S03.
- Anexo F:** Requerimientos físicos de la Norma INEN 490
- Anexo G:** Requerimientos físicos de la Norma INEN 2380
- Anexo H:** Datos del cementó Tipo IP
- Anexo I:** Datos del cementó Tipo HE
- Anexo J:** Requisitos químicos para el cemento Tipo IP.

## ABREVIATURAS

<b>Tipo IP</b>	Cemento Portland Puzolánico.
<b>Tipo HE</b>	Cemento Puzolánico de alta resistencia.
<b>CaO</b>	Óxido de Calcio.
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Óxido de Sílice.
<b>Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub></b>	Óxido de Aluminio.
<b>Fe<sub>2</sub> O<sub>3</sub></b>	Óxido Férrico.
<b>C<sub>3</sub>S</b>	Silicato tricálcico.
<b>C<sub>2</sub>S</b>	Silicato dicálcico.
<b>C<sub>3</sub>A</b>	Aluminato tricálcico.
<b>C<sub>4</sub>AF</b>	Ferro aluminato tetracálcico.
<b>SO<sub>3</sub></b>	Óxido de Azufre.
<b>PPC</b>	Perdida por calcinación
<b>w/c</b>	Relación agua/ cemento
<b>Ti</b>	Temperatura inicial.
<b>Tmáx</b>	Temperatura máxima.
<b>R1</b>	Resistencia a compresión a un día.
<b>R3</b>	Resistencia a compresión a tres días.
<b>R7</b>	Resistencia a compresión a siete días.
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto

## RESUMEN

Estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento, a través de la termometría (o método calorimétrico), que permita predecir la resistencia del cemento Tipo IP y Tipo HE en menos de 24 de horas, para las edades de 1, 3, 7 y 28 días mediante el uso de ecuaciones (o relaciones empíricas), basado en que las resistencias a compresión son producto de la reacción de hidratación de los compuestos principales del cemento, cuando éste entra en contacto con el agua dando origen a una reacción exotérmica que libera calor. Por lo que, se determinó la diferencia máxima de temperatura en las primeras horas de hidratación, y se relacionó con las resistencias obtenidas con el método de la Norma INEN 488:2009. Se aplicó tanto regresión simple como multivariable considerando otras propiedades del cemento, encontrándose buenas expresiones como resultado para el cemento Tipo IP de 0,96 y He 0,95 de su correlación. De acuerdo a los resultados obtenidos a través de la ecuación de la recta; el porcentaje de error promedio para el cemento Tipo IP fue 3,61% y 2,61 % para el Tipo HE. En general, se puede decir que el método calorimétrico (termometría) es confiable para determinar y/o predecir las resistencias a compresión en menor tiempo.

**Palabras clave:** < INGENIERÍA Y TECNOLOGIA QUÍMICA>, <CEMENTO>, <PASTA DE CEMENTO>, <RESISTENCIA A COMPRESIÓN>, <TEMPERATURA>, <CALORIMETRÍA>.

## **ABSTRACT**

To estimate the cement paste compression resistance, through the thermometry (or calorimetric method, which allows to predict the resistance of type IP and Type HE cement in less than 24 hours, for the ages of 1,3,7 and 28 days. Through equations use (or empirical relations), based on the fact that compression resistances are the product of the hydration reaction of the cement main compounds, when it is in contact with water, giving rise to an exothermic reaction that releases heat. Therefore, the maximum temperature difference in the first hours of hydration was determined, and it was related to the resistance obtained with the method of the INEN 488:2009 Standard. Both simple and multivariate regression were applied considering other cement properties, being found good expressions as a result for the IP type cement of 0.96 and 0.95 of its correlation. According to the results obtained through the line equation, the percentage of average error for Type IP cement was 3.61% and 2.61% for Type HE. In general, it can be said that the calorimetric method (thermometry) is reliable to determine and/ or predict compression resistances in less time.

**Keywords:** ENGINEERING AND CHEMICAL TECHNOLOGY – CEMENT-CEMENT PASTE- RESISTANCE TO COMPRESSION-TEMPERATURE- CALORIMETRY

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Identificación del Problema

La Empresa Unión cementera Nacional, UCEM S.A., Planta Chimborazo, con miras siempre a mejorar el proceso productivo y mantener el estricto control de calidad de cada una de las etapas, del proceso de fabricación de cemento (materias primas, productos intermedios y producto terminado); a través del Departamento de Control de Calidad y Procesos; busca optimizar los tiempos de respuesta que permitan tomar decisiones de la manera más expedita. De allí que considere uno de los parámetros más importantes a controlar en los cementos que se producen Tipo IP (Portland Puzolánico) y Tipo HE (Portland Puzolánico de alta resistencia); como es la determinación de la resistencia a la compresión, en el cuyo procedimiento descrito en la Norma INEN 488:2009, “Determinación de Resistencias a Compresión de Morteros de Cubos de 50 mm”. Resalta un aspecto relevante correspondiente a las edades de curado y ensayo de los referidos morteros de 1, 3, 7 y 28 días, aspectos que dificultan tomar acciones correctivas o preventivas en un plazo mucho más corto durante el proceso de molienda del cemento, puesto que las decisiones resultan tardías.

### 1.2 Justificación del proyecto

En el presente trabajo se pretende desarrollar un método alternativo para la determinación de la resistencia a compresión del cemento, a partir de la medición de la temperatura de las muestras de cemento una vez hidratado, con base al hecho de que los componentes mineralógicos del cemento liberan una cierta cantidad de calor durante su fase de hidratación; y se pueda evaluar a partir de las primeras 24 horas. Para ello se seleccionaron muestras de cemento Tipo IP y Tipo HE, además de ciertos parámetros como: finura del cemento, contenido de sulfato, pérdida al fuego y la cantidad de silicato tricálcico. Por lo que, una vez realizado el montaje del equipo a utilizarse en la medición del diferencial de temperatura, en la cual se fundamenta el método calorimétrico; se llevarán a cabo los ensayos sobre muestras tomadas de los mencionados tipos de cementos, y se aplicará el método de regresión numérica con el fin de relacionar las resistencias a compresión, con la temperatura medida durante el proceso de hidratación, adicionalmente, se

validará la confiabilidad del método (termometría) a través de la comparación de resultados obtenidos con el procedimiento de la Norma INEN 488:2009. Si bien el ensayo en el laboratorio de Control de Calidad, para la obtención de la resistencia a compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista esta estandarizado y es el reglamentario; éste debe pasar por un proceso de curado y rotura de 1, 3, 7 y 28 días para obtener los resultados, y así poder realizar las diferentes correcciones de dosificación en la producción, implicando una limitación en las medidas correctivas a corto plazo. Por lo tanto, se justifica el presente estudio ya que por medio de la termometría se aporta una predicción pronta de la resistencia a la compresión; en menos de 24 horas. Puesto que se consigue estimar los valores de resistencias a la compresión a diferentes edades en solo pocas horas, estimación que es de gran ayuda para controlar la calidad del cemento, ya que se pueden realizar ajustes tempranos en el proceso de fabricación evitando una posible desmejora del cemento en cuanto a resistencias se refiere, o tener la oportunidad de llevar a cabo la optimización del proceso de molienda.

### **1.3 Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1 General**

- Estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento, a través de la termometría (o método calorimétrico).

#### **1.3.2 Específicos**

- Determinar las resistencias a compresión en muestras de cementos puzolánicos Tipo **IP** (INEN 490) y Tipo **HE** (INEN 2380), descritos en la Norma INEN 488:2009.
- Determinar la temperatura máxima en pasta de cemento generada cuando ésta se hidrata en función del tiempo, para elaborar una curva y correlacionarla con la resistencia a compresión, obtenida con el método establecido en la Norma INEN 488:2009.
- Evaluar la repetitividad del método termométrico (o calorimétrico), a través de comparaciones durante la estandarización del ensayo.
- Conocer los parámetros más importantes que afecten a la determinación de la resistencia a compresión y temperatura máxima en pasta de cemento, formada cuando éste entra en contacto con el agua (proceso de hidratación).

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

La Compañía "Unión Cementera Nacional, UCEM C.E.M.", se creó como efecto de la fusión de las empresas Industrias Guapán S.A. y Cemento Chimborazo C.A., con el objetivo de fortalecer la industria cementera nacional y reflejar en el mercado una mayor capacidad de producción y venta. Específicamente, Planta Chimborazo, está ubicada Panamericana Sur, Km 14, Vía la Costa en la ciudad de Riobamba.

Actualmente consta con diferentes líneas de producción distribuidas en dos plantas productoras, dependiendo de la capacidad y demanda de la planta; la producción emplea materia prima proveniente de distintas minas, lo cual adjunta un parámetro más a tomar en cuenta en la dosificación de constituyentes para la calidad del producto final. Por lo que, al usar materia prima foránea, el desarrollo e implementación de un método que permita estimar las resistencias en un tiempo menor, y que pueda ser comparado con los resultados obtenidos a través del ensayo convencional establecido en la Norma de referencia INEN 488:2009; se hace interesante.

Lasse Frølich, Lars Wadso & Paul Sandberg (2016). Aportan al presente trabajo de titulación en que la correlación entre la temperatura y resistencia a compresión de cementos; es bastante fuerte en las 24 primeras horas. Conclusión que en su trabajo de ensayo sobre calorimetría encontró que, al medir la precisión de termometría isotérmica en pasta de cemento, con el fin de sustituir las medidas de resistencia tradicionales que se obtienen al analizar morteros como un método de control de calidad. Además, demuestra en este trabajo que la repetitividad de resultados es posible, lo cual muestra que el estudio en pasta de cementos con termometría es una alternativa viable a edad temprana.

M.I. Sánchez de Romas, M. Frías & J. Rivera (2000). En su investigación encontró que la evolución del calor de hidratación con el tiempo, debido a que las relaciones de hidratación del cemento portland son altamente exotérmicas; provoca el calentamiento de la pasta. Éste calor se desarrolla rápidamente en el fraguado y es parte del endurecimiento, disminuyendo así

progresivamente al hacerse la hidratación más lenta hasta estabilizarse. Llegando a la importante conclusión de que en los primeros 3 días se genera el 50% del calor y el 80% hasta los 7 días.

Ana Torre Carrillo & Manuel Aspilcueta Asencios (2016). Compara dos métodos de verificación del desarrollo de la resistencia a compresión. Analiza el método convencional (ASTM C39/C39M – NTP 339.034) que por lo general difiere de la resistencia ya en estructura, además del método de “Madurez del concreto” (ASTM C1074-NTP339.217) el cual estima la resistencia del cemento a partir de la temperatura de hidratación. Lo que aporta a la investigación del presente trabajo, es que el método de madurez del concreto es más apropiado para analizar resistencias a edades menores de 28 días.

Las diferencias principales de este trabajo a los realizados anteriormente radica que en éste, se realizaron regresiones numéricas que relacionan las resistencias del cemento con el calor desprendido del mismo, durante su proceso de hidratación a la vez se realizaron regresiones multivariable en conjunto con otras propiedades medidas en la calidad del cementó, en este caso cemento Tipo IP y Tipo HE

## **2.2 Marco Conceptual**

### ***2.2.1 Recorrido histórico del cemento***

Hacia el año 700 antes J.C. los etruscos utilizaban mezclas de puzolana y cal para realizar morteros, en el año 100 antes J.C. los romanos utilizaban mezclas de puzolana y cal para hacer hormigón de resistencias a compresión de 5 MPa.

Hasta el año 1750 sólo se utilizaban los morteros de cal y materiales puzolánicos (tierra de diatomeas, harina de ladrillos, etc.).

Hacia 1750-1800 se investigaron mezclas calcinadas de arcilla y caliza. Smeaton comparó en el año 1756 el aspecto y dureza con la piedra de Portland al sur de Inglaterra. 40 años más tarde, Parker fabricó cemento natural llamándolo por primera vez "cemento" (anteriormente se interpretaba como "caement" a toda sustancia capaz de mejorar las propiedades de otras).

Vicat explicó en 1818 de manera científica el comportamiento de estos "conglomerantes".

En 1824, Aspdin patentó el cemento portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que les recordaban a las piedras de Portland. Hasta la aparición del mortero hidráulico que auto endurecía, el mortero era preparado en un mortarium (sartén para mortero) por percusión y rotura, tal como se hace en la industria química y farmacéutica.

Entre los años 1825-1872 se manifestaron las primeras fábricas de cemento en Inglaterra, Francia y Alemania.

En el año 1880 se estudiaron las propiedades hidráulicas de la escoria de alto horno.

En el año 1890 aparecieron las primeras fábricas de cemento en España.

En el año 1980 había 1.500 fábricas que producían cerca de 800 millones de toneladas/año.

Hoy en día el cemento es el "conglomerante" más barato que se conoce. Mezclado adecuadamente con los áridos y el agua forma el hormigón, una roca amorfa artificial capaz de tomar las más variadas formas con unas prestaciones mecánicas a compresión muy importantes. Las resistencias a tracción pueden mejorarse con la utilización de armaduras (hormigón armado). (Ing, Giordani, & Leone, n.d.p2)

### ***2.2.2 Definición del Cemento.***

El cemento se define como una sustancia de polvo fino capaz de formar una pasta blanda al mezclarse con agua, y que endurece tanto en el aire como en el agua misma, una vez endurecido es resistente a la acción del agua, debido a esto se dice que el cemento tiene propiedades hidráulicas.

### ***2.2.3 Puzolana.***

Material silíceo-aluminoso, el cual por sí mismo posee poco o ningún valor cementante, pero que en forma finamente dividida y en presencia de humedad; reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. La puzolana o ceniza volcánica es un material generalmente de origen natural, usado en la fabricación de diferentes tipos de cementos como material alternativo, tal es el caso como adición de cemento portland en determinadas proporciones aportando alguna cualidad positiva y mejorando alguna de las características o propiedades de este material.(Grado, La, 2014)

### ***2.2.4 Arcilla.***

Las rocas ígneas se originan por el enfriamiento de magmas, que surgen de masas fundidas procedentes del interior de la Tierra. Las arcillas son el producto de la disgregación parcial o total de las rocas ígneas por acción del agua. Cuando está húmedo, la arcilla se puede moldear en muchos productos útiles. Se puede secar de forma natural con el sol o se puede disparar a temperaturas extremas en las que se endurece hasta convertirse en un material de construcción resistente y duradero. Hay muchos tipos de arcilla, pero todos son similares en el sentido de que

obtienen plasticidad cuando están mojados, pero se secan en un material de construcción fuerte y duro.

### ***2.2.5 Tipos de Cemento.***

#### ***2.2.5.1 Cementos Naturales.***

Estos cementos se producen por calcinación de una mezcla natural de sustancias calcáreas y argiláceas, a una temperatura por debajo de aquella en que sucede la aglomeración. La norma de la ASTM que rige estos cementos naturales, C10, exige que la temperatura no rebase la necesaria para expulsar del material el dióxido de carbono. Puesto que los cementos naturales son derivados de materiales presentes en la naturaleza que, por tanto, no necesitan un esfuerzo específico para ajustar su composición, son cementantes que exhiben grandes fluctuaciones de composición y propiedades. Es decir, algunos tienen propiedades idénticas a las del cemento Portland, pero otros son mucho más débiles.

La principal aplicación de los cementos naturales son los morteros para pegar ladrillo y mampostería, aunque también se emplean como aditivos de bajo costo para concretos de cemento Portland.

#### ***2.2.5.2 Cementos Artificiales.***

Se mezclan calizas y arcillas para su fabricación, en proporción tal, que toda la cal reaccione con los silicatos convenientemente preparados y dosificados. Son más constantes en su composición que los cementos naturales. La cocción de la mezcla se realiza a una temperatura de entre (1450 - 1480) °C. La masa homogénea obtenida se la conoce como Clinker, la cual, después de ser triturada finamente, se convierte en el componente principal para la fabricación del cemento. Entre los cementos artificiales se distinguen los siguientes:

##### **➤ *Portland.***

El Clinker de cemento portland se obtiene por sinterización de una mezcla de materias primas (crudo, pasta o harina finamente dividido, íntimamente mezclado y homogéneo) conteniendo elementos, normalmente expresados en forma de óxidos, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y pequeñas cantidades de otras materias. Las materias primas para la fabricación del cemento Portland consisten esencialmente en caliza, marga, arena silíceas y arcilla. También se usan otras adiciones tales como yeso o materiales puzolánicos.

- ***Cemento portland puzolánico (IP)***

Cemento Pórtland con puzolana para usos cuando no se requiere alta resistencia inicial, (Ecuatoriana, Hidráulicos, Requisitos, et al., 2011)

- ***Cemento portland puzolánico (HE)***

Cemento hidráulico de alta resistencia, está compuesto de clínker de cemento portland, yeso y adiciones de puzolanas naturales, resistencia a los sulfatos, a los cloruros.(Ecuatoriana, Hidráulicos, Edición, 2011)

- ***Aluminosos***

Son ricos en caliza y bauxita (alúmina), obteniéndose aluminatos cálcicos y presentan alta resistencia inicial. Los compuestos que se forman son aluminato monocálcico y silicato dicálcico. No necesita ningún tipo de regulador de fraguado son de endurecimiento muy rápido y, por lo tanto, de muy altas resistencias a tempranas edades.

- ***Siderúrgico***

Mezcla de Clinker de Portland, yeso y escoria de alto horno. La escoria de alto horno es un material hidráulico latente, es decir, que posee propiedades hidráulicas cuando se activa de manera adecuada. Esta escoria debe de estar constituida por lo menos 2/3 en masa de la suma de CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>. El resto contiene Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> junto con pequeñas cantidades de otros óxidos. La escoria granulada del alto horno se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria en estado de fusión de composición adecuada, procedente de la fusión de mineral de hierro en altos hornos y constituida al menos en dos tercios de su masa por escoria vítrea.

- ***Puzolánico***

Mezcla de Clinker de Portland, yeso y puzolana (material silíceo que mezclado con cal y agua produce compuestos hidráulicos). Los materiales puzolánicos son sustancias naturales o industriales de composición silícea o silicoaluminosas, o bien una mezcla de ambas.

Estos materiales no endurecen por sí mismos cuando se amasan con agua, pero finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan a la temperatura ambiente, con el hidróxido de calcio disuelto y forman compuestos de silicato y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia.

### ➤ *Especiales*

Estos no son otros que los cementos de uso general a los cuales se les ha incorporado ciertas propiedades especiales que le agregan utilidad para determinadas aplicaciones particulares. Entre estos se puede mencionar los blancos, de alta resistencia inicial, altamente resistente a los sulfatos, moderadamente resistente a los sulfatos, de bajo calor de hidratación, resistente a la reacción álcali-agregado. (Flores, 2014, pp-26-29)

#### **2.2.6 Fabricación del Cemento.**

El proceso de fabricación de cemento se puede dividir en varias etapas sucesivas: Canteras (materias primas – explotación y recepción), Trituración, Almacenamiento de Materias Primas, Molienda de Crudo y Cocción.

##### **2.2.6.1 Explotación Y Recepción**



**Fotografía 1-2:** Recepción de Materia Prima

**Realizado por:** Johana Orna, 2019.

Las materias primas usadas en la manufactura del cemento Portland deben contener proporciones apropiadas de compuestos de calcio, sílice, aluminio y hierro. Estas se encuentran en la naturaleza y son fundamentalmente materiales: arcillosos (arcillas, pizarras) y calcáreos (calizas, tizas, margas). La piedra caliza es la materia prima principal, y es extraída de canteras mediante explosiones controladas. Luego de la extracción, es triturada y transportada a la fábrica de cemento para su almacenamiento o preparación. Los materiales correctores, como arcillas, bauxitas, mineral de hierro, laminillo de hierro, son comúnmente necesarios para adecuar la química de la mezcla cruda a los requerimientos del proceso y a las especificaciones del producto, y generalmente se utilizan en una proporción baja con relación a las calizas.

### **2.2.6.2 Homogeneización**



**Fotografía 2-2:** Bandas Tripper

Realizado por: Johana Orna, 2019.

En el parque de pre homogeneización, el material se tritura y almacena en capas uniformes para ser posteriormente seleccionado de forma controlada. Para lograr un crudo de composición química homogénea es importante que las materias primas mezcladas se pesen, analicen y dosifiquen con la mayor exactitud posible.

### **2.2.6.3 Molienda de crudo**



**Fotografía 3-2:** Molino de crudo

Realizado por: Johana Orna, 2019.

Los materiales mencionados anteriormente se muelen en molinos verticales o de bolas para reducir su tamaño y favorecer así su cocción en el horno. En el molino vertical se tritura el material a través de la presión que ejercen sus rodillos sobre una mesa giratoria. El material que sale del molino, llamado “harina de crudo”, es muy fino y se almacena en silos para aumentar la

uniformidad de la mezcla. En función de cómo se procese el material antes de su entrada en el horno; se distinguen cuatro tipos de procesos de fabricación:

- **Seca:** la materia prima es introducida en el horno en forma seca y pulverulenta. El sistema del horno está formado por una torre de ciclones para intercambio de calor, en la que se precalienta el material en contacto con los gases provenientes del horno.
- **Húmeda:** este proceso es utilizado normalmente para materias primas de alto contenido en humedad. El material de alimentación se prepara mediante molienda conjunta del mismo con agua, resultando una pasta con un contenido de agua de un 30-40 % que es alimentada en el extremo más elevado del horno de clínker.
- **Semi-seca y semi-húmeda:** el material de alimentación se consigue añadiendo o eliminando agua al material obtenido en la molienda de crudo. Se obtienen “pellets” o gránulos con un 15-20 % de humedad que son depositados en parrillas móviles a través de las cuales se hacen circular gases calientes provenientes del horno. Cuando el material alcanza la entrada del horno, el agua se ha evaporado y comienza la cocción. En la actualidad, la mayoría de las cementeras españolas utilizan la vía seca, dado que es el procedimiento de fabricación más eficiente y donde el consumo de energía es menor



**Fotografía 4-2:** Torre de Pre-calcinación

**Realizado por:** Johana Orna, 2019.

#### **2.2.6.4 Cocción**



**Fotografía 5-2:** Horno Allis Chalmers

Realizado por: Johana Orna, 2019.

La harina cruda debidamente preparada es introducida al horno donde es transformada en Clinker, en un proceso que consta de varias etapas. A medida que aumenta la temperatura en el sistema, el material es secado y precalentado. Al llegar a temperaturas cercanas a los 900 °C, se produce la calcinación de la mezcla cruda, con el desprendimiento de CO<sub>2</sub> y formación de CaO, a partir del CaCO<sub>3</sub> de la caliza. Posteriormente, a temperaturas entre 1400 y 1500 °C se produce la sinterización o clinkerización que implica la reacción de formación de los minerales de Clinker, a partir del óxido de calcio y óxidos de silicio, aluminio y hierro. Estos nuevos minerales, también llamados fases del Clinker, son los responsables de las propiedades hidráulicas del cemento. (Alita: C<sub>3</sub>S silicato tricálcico, Belita: C<sub>2</sub>S silicato dicálcico, Aluminato: C<sub>3</sub>A aluminato tricálcico y Ferrito: C<sub>4</sub>AF ferroaluminato de calcio). El material que sale del horno tiene aspecto de gránulos redondeados y se conoce con el nombre de Clinker y este se obtiene enfriado con aire a temperaturas entre 100 y 200 °C, transportado y almacenado en depósitos adecuados.

#### **2.2.6.5 Enfriamiento**

A la salida del horno, el Clinker se introduce en el enfriador que tiene dos tareas: por un lado, recuperar el calor del Clinker caliente tanto como sea posible (el Clinker sale del horno con una temperatura cercana a los 1.450 °C) para devolverlo al proceso; mejorando así su eficiencia energética, y por otro, reducir la temperatura del Clinker para consolidar sus propiedades mineralógicas.

#### **2.2.6.6 Molienda de Cemento**

El cemento es producido a partir de la molienda conjunta de Clinker con un porcentaje de yeso, de origen natural o artificial, que se añade como regulador del tiempo de fraguado. Los cementos compuestos contienen además otros constituyentes adicionados, como, por ejemplo: escoria

granuladas de alto horno, puzolanas, cenizas volantes, o materiales inertes, como la piedra caliza las condiciones y de acuerdo a los requerimientos existentes.



**Fotografía 6-2:** Molino de Clinker

Realizado por: Johana Orna, 2019.

#### ***2.2.6.7 Almacenamiento***

Esta última etapa consiste en almacenar el cemento en silos, separado según sus clases, antes de ser ensacado y cargado para su transporte.



**Fotografía 7-2:** Silo de cemento

Realizado por: Johana Orna, 2019.

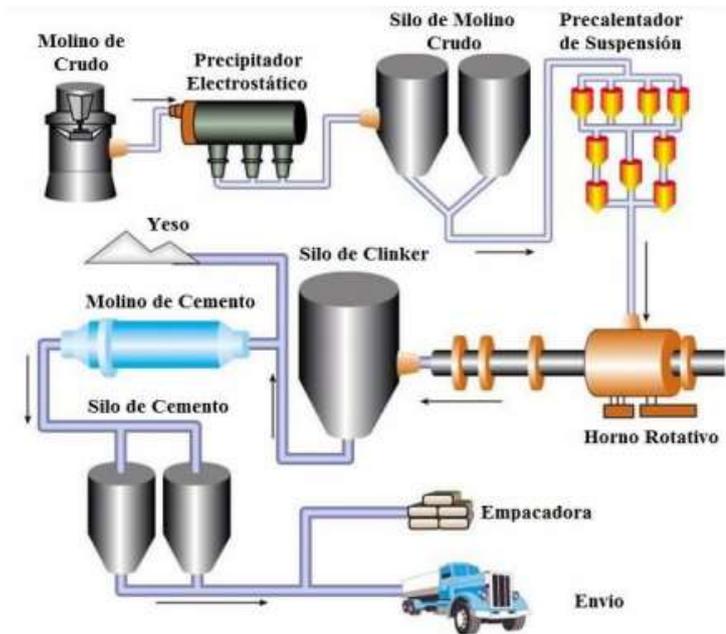
#### ***2.2.6.8 Empaquetado***

El cemento es despachado en fundas de papel de 50 kg teniendo el equipo de ensacadora la capacidad de envasar un saco de cemento por minuto, y para las personas o empresas que necesitan mayor cantidad se despacha en camiones cisternas.



**Figura 1-2:** Empaquetado

Fuente:(José et al., 2016)



**Figura 2-2:** Diagrama del proceso de fabricación del cemento

Fuente: (ITÚRBURU, ORTÍZ, 2018)

### 2.2.7 Química del Cemento

El proceso de formación de Clinker, implica varias etapas en las que el material crudo va sufriendo transformaciones muy importantes que permiten la obtención de un producto con las propiedades deseadas. Cuando el calcio reacciona con la sílice, se forman compuestos con propiedades hidráulicas, llamados silicatos cálcicos, cuya composición final depende de las condiciones de reacción. Para que esta transformación ocurra, por fusión parcial de la mezcla, se requieren

temperaturas muy elevadas 1900 °C. Por este motivo, se utilizan materiales correctores o fundentes, que permiten que la fusión ocurra a temperaturas menores. Así, cuando se alcanzan temperaturas superiores a 1250 °C comienza a producirse la fusión parcial de la mezcla que permite la reacción del calcio con la sílice, la alúmina y el óxido férrico, para formar los minerales o fases del Clinker. (Prato, Abril 2007)

Todas las transformaciones químicas ocurren dentro del horno llamadas reacciones de clinkerización, estas reacciones se forman en diferentes fases del horno debido que el crudo necesita altas temperaturas para que los minerales de origen natural se mezclen y consigan propiedades hidráulicas prácticamente, el 95 % del Clinker está formado por óxidos de cal, sílice, aluminio y hierro. El resto lo forman óxidos que proceden de las impurezas y entre los cuales están los de magnesio, sodio, potasio, titanio, azufre, fósforo y manganeso, aunque la presencia de éstos depende de la materia prima utilizada y de los correctores aplicados. (Estrella C., 2017, p.10)

**Tabla 1-2:** Componentes del Clinker del Cemento

COMPONENTES MAYORITARIOS	FÓRMULA
Óxido de calcio	$CaO$
Óxido de sílice	$SiO_2$
Óxido de aluminio	$Al_2 O_3$
Óxido férrico	$Fe_2 O_3$
IMPUREZAS	
Óxido de magnesio	$MgO$
Óxido de sodio	$Na_2 O$
Óxido de potasio	$K_2 O$
Óxido de titanio	$TiO_2$
Tri óxido de azufre	$SO_3$
Óxido de fosforo	$P_2 O_5$

Fuente:(Aranda, 2014)

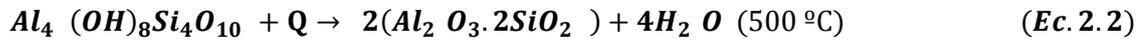
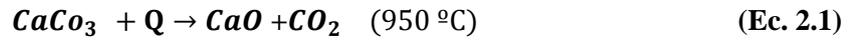
Realizado por: Johana Orma, 2019.

### 2.2.7.1 La transformación del crudo ocurre de la siguiente manera:

#### *Descomposición de los carbonatos*

El crudo pasa por la torre de precalentamiento donde se da el proceso de descarbonatación y calcinación en la cual, se desprende  $CO_2$  de la caliza y la descomposición de la arcilla dando

como resultado CaO. Así como la descarbonatación de la caliza y pérdida de agua de constitución de las arcillas (antes de 1000 °C – entre 550 °C y 600 °C).



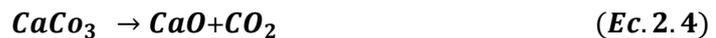
Después ingresa al horno donde se generará mayor temperatura para fundir el material crudo precalentado, en el cual existen 3 zonas importantes en su interior; zona de transición, zona de clinkerización y zona de enfriamiento, dado como resultado las diferentes reacciones.

***Reacción entre fase solida***

- Descomposición de la meta-caolinita y otros componentes con formación de una mezcla de óxidos reactivos.

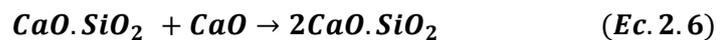


- Descomposición de la caliza y formación de CS y CA (carbonatos)



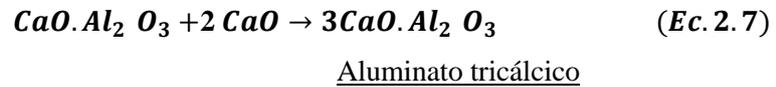
CS                      CA

- A 1300 °C se forma el silicato dicálcico (Belita):



Silicato dicálcico

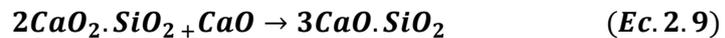
- Se funde la  $Al_2O_3$  y el  $Fe_2O_3$  y reaccionan con  $CaO$  para dar el aluminato y el ferrito. Es el único fundido que se produce y facilita la formación de los silicatos de calcio (en fase sólida) a una temperatura de  $1338\text{ }^\circ C$ ; para formar los siguientes compuestos:



Ferro aluminato tetracálcico

### ***Reacciones en presencia de fase líquida-fundida***

- A temperaturas superiores en las regiones donde hay exceso de cal y sílice; el  $C_2S$  reaccionará con más cal para formar  $C_3S$ .
- A  $1450\text{ }^\circ C$  el Silicato dicálcico reacciona con la cal restante para formar Alita (Silicato tricálcico):



Silicato tricálcico

- Enfriamiento: el material pasa de  $1450\text{ }^\circ C$  a  $1200\text{ }^\circ C$  (dentro del horno)

### ***2.2.8 Compuestos químicos del cemento Portland***

**Tabla 2-2:** Compuestos que forman en el Clinker

Compuesto	Fórmula	Abreviación	Fases	Clinker (%)
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	Alita	45-65
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	Belita	15-35
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	Celita	4-14

Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$C_4AF$	Ferrita	6-12
---------------------------------	---	---------	---------	------

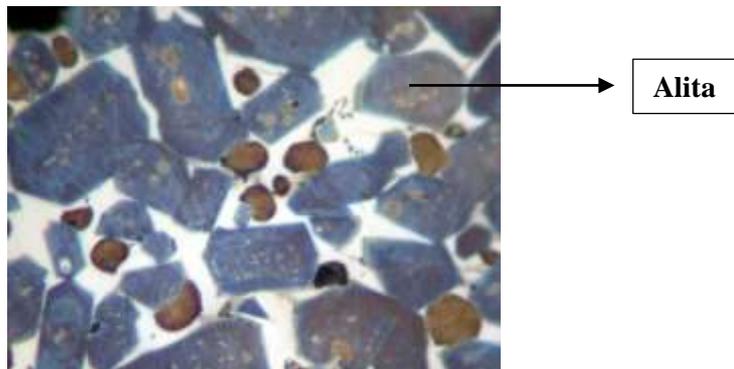
Fuente:(VALDIVIA, 2010)

Realizado por: Johana Orna, 2019

### 2.2.8.1 Silicato tricálcico

El C3S es la fase principal en la mayoría de los cementos Portland, también se lo conoce con el nombre de cristales de alita, resulta de la combinación de tres mol de CaO con uno de SiO<sub>2</sub> (SiO<sub>2</sub>·3CaO). Este mineral desarrolla un gran calor de hidratación, así como elevadas resistencias a corto plazo (1 a 3 días), además durante la hidratación libera abundante cal (cal de hidrólisis), la cual es sensible al ataque de aguas ácidas.

A su vez, le otorga al cemento una alta velocidad de hidratación, que se relaciona íntimamente con su estructura cristalina, ya que cuando los cristales de alita son pequeños y alargados se pueden hidratar con mayor rapidez que cuando son grandes y regulares, aunque ambos sean posteriormente molidos a la misma superficie específica.



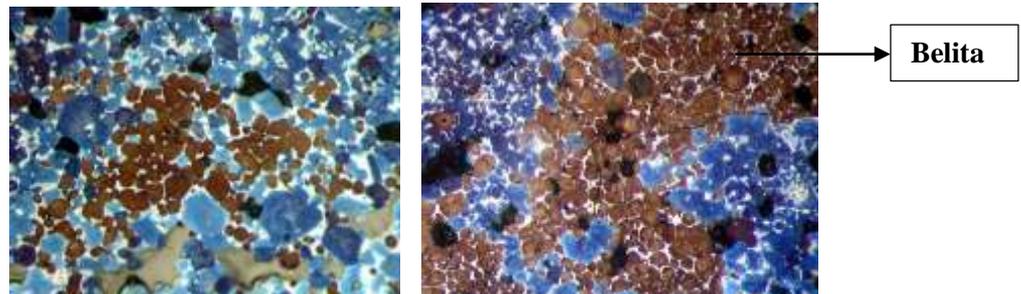
**Figura 3-2: Formación de Cristales Alita**

Fuente:(Chaturvedi, National, 2013)

### 2.2.8.2 Silicato dicálcico

El C2S, también conocido en su forma cristalina con el nombre de Belita, resulta de la combinación de dos mol de CaO con una mol de SiO<sub>2</sub> (SiO<sub>2</sub>·2CaO). Este mineral desarrolla un calor de hidratación bastante menor que del silicato tricálcico, aunque le otorga buenas resistencias mecánicas a plazo largo, casi tan elevadas como las del C3S; su estabilidad química es buena. Los cristales de Belita pueden presentarse en varias modificaciones polimórficas, entre las cuales está la forma β y menos cantidad de cal y proporciona menores resistencias a corto plazo, y la forma γ. El enfriamiento del clinker influye en la estabilidad del C2S, así cuando el

C2S es enfriado rápidamente la forma beta es estable indefinidamente, en cambio cuando se realiza lentamente se obtiene la forma gamma la cual no tiene propiedades hidráulicas, ésta es la razón por la cual el clinker debe ser enfriado rápidamente. Cabe destacar que en los cementos Portland la suma del C3S y C2S está por el orden de 70 a 90 % en peso, es un compuesto de hidratación lenta para formar el mismo tipo de compuestos que el C3S (CSH), que proporciona una ganancia gradual de resistencia; esto ocurre en un período largo: después de 28 días.



**Figura 4-2: Formación de cristales Belita**

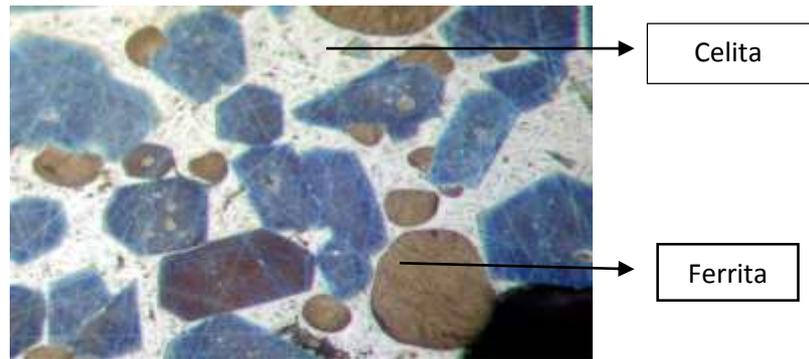
Fuente:(Chaturvedi, National, 2013)

#### ***2.2.8.3 Aluminato tricálcico***

El C3A, se origina de la combinación de tres mol de CaO con una mol de  $Al_2O_3$  ( $Al_2O_3 \cdot 3CaO$ ). Este cristal le otorga una alta velocidad de hidratación al cemento, hasta el punto de ser ésta casi instantánea y con ello un calor de hidratación elevado, también le confiere al cemento alguna resistencia dentro de las primeras 24 horas, además, no libera calor en su hidratación, por el contrario, puede fijar una cierta proporción de la cal liberada por los dos silicatos. Es el constituyente que mayor aporte tiene la plasticidad del cemento y a la vez colabora fuertemente en el fraguado rápido del mismo. Es muy sensible a los sulfatos con los que reacciona dando lugar a productos expansivos, los cuales provocan la destrucción del hormigón.

#### ***2.2.8.4 Ferro Aluminato Tetracálcico***

El C4AF resulta de la combinación de cuatro mol de CaO con una mol de  $Al_2O_3$  y uno de  $Fe_2O_3$  ( $Fe_2O_3 \cdot Al_2O_3 \cdot 4CaO$ ). Éste tiene una velocidad de hidratación moderada y un calor de hidratación relativamente pequeño, confiere al cemento una resistencia muy escasa o prácticamente nula, pero le brinda protección contra agentes químicos externos como los sulfatos y álcalis. Éste es el que le proporciona el color al cemento, así a mayor cantidad de este mineral más oscuro será el producto.(ICP, 2014, p 1-2)

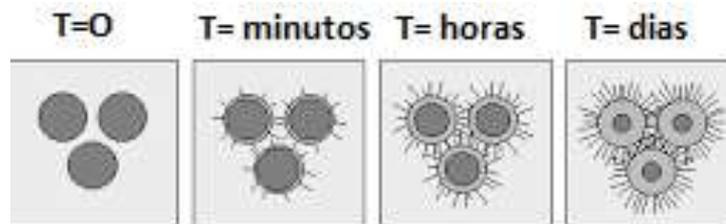


**Figura 5-2: Formación de Ferro aluminato tetracálcico y aluminato tricálcico**

Fuente:(Chaturvedi, National, 2013)

### 2.2.9 Hidratación del Cemento

La hidratación comprende la reacción del cemento no hidratado o uno de sus constituyentes con agua, ligados con los cambios físicos y químicos del sistema en particular con el endurecimiento y fraguado. Para una hidratación del cemento completo se debe mezclar con suficiente agua. La relación de agua y cemento en la mezcla (w/c) afecta la reología de la pasta producida, así como el progreso de la hidratación y las propiedades del material hidratado. (Posgrado, 2011)



**Figura 6-2: Hidratación de la partícula de cemento**

Fuente:(Chaturvedi, National, 2013)

Algunas de las fases del cemento son muy solubles cuando entra en contacto con el agua, estas se disuelven rápidamente (menos de un minuto). Este período es seguido por un tiempo (aproximadamente de dos horas) donde no sucede nada. Sigue un periodo de reacción rápida donde el punto máximo se da aproximadamente a las 24 horas, el cual está caracterizado por la precipitación de los productos que dan las características de resistencia y cohesión a la pasta de cemento. (ANON., [sans date])

#### 2.2.9.1 Hidratación de Silicatos

La hidratación de los silicatos se da algunas horas después del inicio de la hidratación del cemento.

La hidratación del silicato dicálcico (C2S) y del silicato tricálcico (C3S) origina silicatos de calcio hidratados que poseen una composición química muy variada, y son representados genéricamente por C-S-H (también llamado Tobermorita gel) e hidróxido de calcio (2 Ca(OH)), estos compuestos llenan el espacio ocupado por el agua y por las partículas de cemento en disolución.

➤ **Silicato tricálcico**



Tobermorita + Cal apagada

- Gran velocidad de hidratación.
- Reacción bastante exotérmica.
- El que aporta para mayor resistencia.

➤ **Silicato dicálcico**



Tobermorita + Cal apagada

- Baja velocidad de hidratación.
- Baja liberación de calor.

### ***2.2.9.2 Hidratación de los aluminatos***

La reacción del aluminato tricálcico (C3A) con el agua es instantánea, por esto es necesario la adición de yeso (sulfato de calcio) en la fabricación del cemento, pues retarda el endurecimiento de la pasta. La hidratación de los aluminatos en presencia de sulfato da como resultado etringita positiva (aquella que se forma durante la hidratación del cemento).

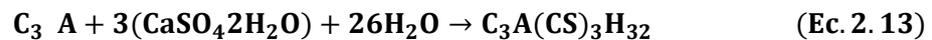
La formación de las agujas de Etringita comienza unos minutos después del inicio de la hidratación, lo que es responsable de la resistencia inicial y adherencia. Después de algunos días, dependiendo de la proporción alúmina - sulfato del cemento Portland, la etringita puede tornarse inestable y descomponerse para formar monosulfato de calcio hidratado que es una forma más estable. El proceso de hidratación del ferro-aluminato tetracálcico (C4 AF ), genera una serie de compuestos de difícil caracterización y de poca influencia en el endurecimiento de la pasta de cemento.(VALDIVIA, 2010,p13)

➤ Aluminato tricálcico (si no hubiera sulfatos)



- Muy alta velocidad de hidratación.
- Elevada liberación de calor.
- Solo colabora a la resistencia en temprana edad.

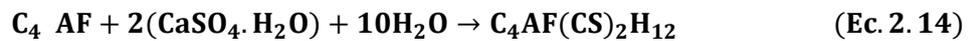
➤ Aluminato tricálcico en presencia de sulfatos (yeso)



Etringita

La etringita se forma en los primeros momentos, recubre la superficie expuesta del aluminato tricálcico dificultando su rapidez de hidratación.

➤ Ferro aluminato tetracálcico



Etringita

- Su influencia en el cemento es muy secundaria.
- Está presente porque debe haber óxidos de Fe para facilitar la cocción del Clinker.
- Hidrata, se hidroliza y reacciona con el yeso.

### ***2.2.10 Factores que influyen en la hidratación del Cemento***

La velocidad y la cantidad de calor liberado dependen del tipo de cemento, la composición química y propiedades físicas del cemento, la relación w/c, y materiales de cemento suplementarios (SCM) tales como cenizas volantes, aditivos químicos y condiciones de curado. (Kim, 2010, p16)

### **2.2.10.1 Finura**

La finura es la distribución del tamaño de partícula del cemento por la descripción de la superficie específica que viene dada en ( $m^2 / kg$ ). La fineza del cemento se determina por dos métodos; Prueba de turbidímetro de Wagner y prueba de permeabilidad al aire de Blaine. La finura del cemento tiene un efecto considerable en la capacidad de colocación, trabajabilidad y contenido de agua del concreto.

La cantidad de hidratación depende de la finura del cemento porque la hidratación empieza en la superficie de las partículas de cemento. Representa el material disponible para hacer contacto con el agua y por lo tanto hidratar. Una mayor finura proporciona un área mayor de superficie para humedecerse, generando una aceleración de la reacción entre el cemento y el agua. Aumentando la liberación de calor en edades tempranas, pero puede no influir en la cantidad total de calor desarrollado durante varias semanas, una alta finura aumenta rápidamente el calor de hidratación a una edad temprana.

### **2.2.10.2 Relación Agua / Cemento**

El espacio ocupado por el agua es parcial o completamente reemplazado por la hidratación. Los productos de hidratación se producen por una reacción entre el cemento y el agua. Si la relación w/c es baja, la hidratación completa no es posible porque no hay espacio suficiente para los productos de hidratación. A la inversa, si existe agua disponible en el cemento, la hidratación progresará continuamente y el espacio disponible dentro de la pasta se llenará completamente. En general, se supone que la hidratación completa del cemento requiere una relación w/c 0,35:1, la evolución del calor comienza a disminuir a medida que la relación w/c baja después de cierto tiempo.

### **2.2.10.3 Materiales suplementarios de cemento (SCM)**

Los SCM, como el puzolánico se usan ampliamente como sustitutos parciales de cemento Portland. El uso adecuado de los SCM tiene las ventajas de la reducción del calor de hidratación, economía y trabajabilidad. Las propiedades del concreto SCM se describen a través de una reacción puzolánica (Ecuación 2.15) entre una puzolana y un hidróxido de calcio. La reacción puzolánica genera menos calor que el cemento portland ordinario porque la reacción es similar a una reacción C2S.



(Ec. 2. 15)

#### ***2.2.10.4 Temperatura inicial***

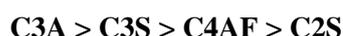
Es importante para determinar el calor de hidratación la temperatura ambiente. La hidratación del cemento a una temperatura ambiental más alta se acelera a edades tempranas, pero luego se desacelera. El calor de hidratación del cemento es más rápido cuando aumenta la temperatura ambiente porque aumenta la velocidad de reacción del calor.

#### ***2.2.10.5 Ceniza volantes***

Las cenizas volantes retrasan la hidratación del cemento portland, especialmente a inicios de cada Etapa, y aumenta el período de inactividad. La contribución de calor de las cenizas volantes en la edad temprana puede estimarse de manera conservadora entre el (15 - 35) % de la contribución de calor del mismo peso del cemento. A medida que aumenta el nivel de reemplazo de las cenizas volantes, la generación de calor máximo disminuye y el pico de hidratación se retrasa. Las resistencias a la compresión del concreto que usan cenizas volantes en los primeros 28 días son bajas, mientras que las resistencias a largo plazo son satisfactorias. Esto ilustra que las cenizas volantes pueden usarse para estructuras de hormigón en masa donde no se necesitan altas resistencias tempranas. (Kim, 2010,p 16-18)

#### ***2.2.11 Velocidad de Hidratación***

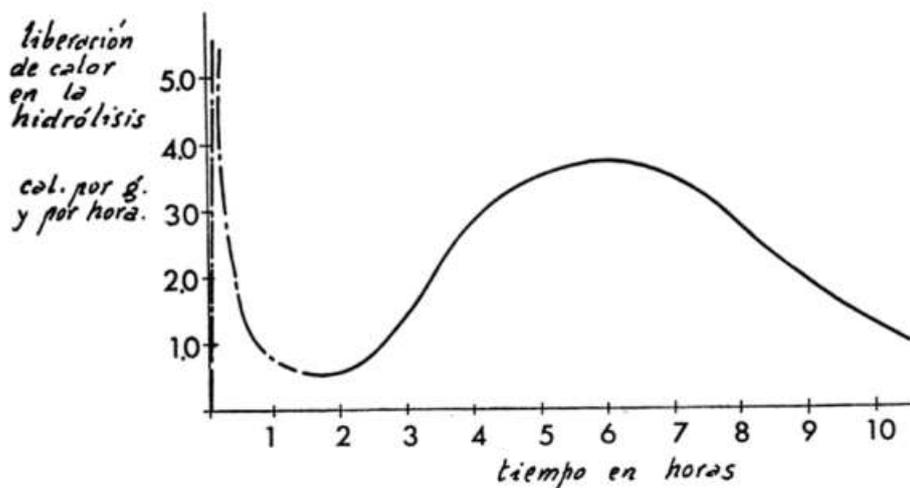
La velocidad con la cual las distintas reacciones de hidratación de las fases minerales del cemento portland no suceden por separado, son reacciones que se dan en serie e involucran diferentes mecanismos de reacción, para formar los productos de hidratación se ha hecho un orden del grado de reactividad de las diferentes fases minerales del cemento portland con el agua:



Los aluminatos reaccionan primero, y son los principales responsables del fraguado, es decir, la solidificación de la pasta de cemento. La hidratación del C3A y del C4AF, en presencia de yeso, da lugar principalmente a sulfoaluminatos hidratados de calcio. El endurecimiento de la pasta de cemento, es decir, el desarrollo de resistencia que sigue a la solidificación, está gobernada por la hidratación de los silicatos. La hidratación del C3S y del C2S da lugar a silicatos hidratados de

calcio. Debido a la gran área superficial, el S-CH puede dar una resistencia considerable a la pasta de cemento. La relación entre los óxidos de silicio y calcio puede variar según el grado de hidratación, la relación (w/c) y la temperatura. (Aranda, 2014, p25)

La velocidad y la extensión de la hidratación del cemento se siguen con facilidad midiendo el calor desprendido, para medir este desprendimiento de calor se pueden emplear diferentes métodos, como el empleo de calorímetros. Las reacciones de hidratación de todos los cementos presentan al menos dos ciclos de velocidades crecientes y decrecientes. En la figura 7-2 se observa el comportamiento típico del desprendimiento de calor en la hidrólisis del cemento.



**Figura 7-2:** Curva tipo del desprendimiento de calor durante la hidrólisis de un cemento.

Fuente: (F.Goma, 1979)

El primer ciclo es el que ocurre inmediatamente después que el cemento se mezcla con agua; la velocidad de liberación de calor aumenta a un valor muy alto, en este ciclo se producen principalmente las reacciones del C3A durante los cinco primeros minutos y después disminuye rápidamente a un valor muy bajo. Durante este ciclo se producen principalmente las reacciones violentas del C3A al entrar en contacto con el agua y disminuir drásticamente cuando el yeso comienza a actuar como retardante. Este ciclo continúa durante un periodo de 1 o 2 horas, siendo la velocidad de liberación de calor relativamente baja, y no cambiando apreciablemente la plasticidad de la pasta.

En el segundo ciclo, después de un intervalo de tiempo que puede extenderse desde 1 hora a casi 3 horas, según la composición del cemento, la velocidad de liberación de calor empieza a aumentar, pasando por un máximo entre las 6 a 8 horas de la mezcla y después disminuye lentamente. Aunque los tiempos correspondientes al principio y al fin del fraguado se definen por ensayos prácticos sin consideraciones teóricas, sucede que, en el caso del cemento adecuadamente retardado, la aparición de este segundo pico en la liberación de calor ocurre muy cerca al final del

fraguado. El principio del fraguado (pérdida de plasticidad y de facilidad para manipulación del cemento), se halla generalmente en la región inferior del pico, esto es en donde la velocidad de liberación de calor está aumentando. Parece entonces como si las acciones químicas que predominan en el segundo ciclo fueran las principales responsables del endurecimiento de la pasta. Dos reacciones dominan en esta etapa, la reacción entre C3A y CaSO<sub>4</sub> para formar un sulfoaluminato cálcico hidratado, y la reacción de la alita presente en el cemento.

### 2.2.12 Calor de Hidratación del Cemento Portland

El calor de hidratación de los cementos, que se expresan generalmente en cal/g, se obtiene midiendo la diferencia entre calor desprendido en un calorímetro por la disolución de un ácido fuerte, y el del mismo cemento hidratado en pasta dura, en un plazo conveniente, es producido por los calores parciales de cada uno de los componentes del Clinker.

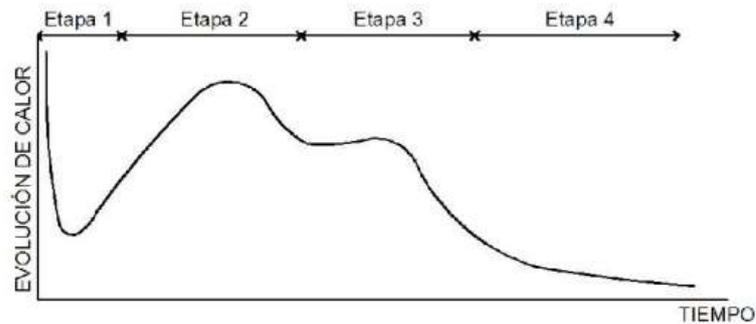
**Tabla 3-3:** Calor de Hidratación de cada compuesto principal del Clinker de cemento

Compuesto	Nombre	Calor de hidratación
<b>C3S</b>	Sulfato tricálcico (Alita)	120 cal/g
<b>C2S</b>	Sulfato dicálcico (Belita)	62 cal/g
<b>C3A</b>	Aluminato tricálcico (Celita)	207 cal/g
<b>C4AF</b>	Ferro aluminato tetracálcico (Ferrita)	100 cal/g

Fuente: (F.Goma, 1979)

Es importante controlar este fenómeno debido a que, si no se disipa este calor rápidamente, puede ocurrir un importante incremento de la temperatura en el concreto ocasionando cambios de volumen, no obstante, en ocasiones es beneficioso para climas fríos, ya que ayuda a mantener temperaturas de curado favorables. La cantidad de calor generado, depende de la composición química del cemento, siendo el C3A y el C3S los compuestos más importantes para la evolución del calor.

Es importante conocer que los cementos no generan calor a una tasa constante en el tiempo. En los cementos tipo Portland convencionales, aproximadamente la mitad de calor total se libera entre uno y tres días, alrededor de tres cuartas partes en siete días y el 90 % en seis meses. (Neville, 1998). En la Figura 8-2, podemos observar una curva que nos indica de manera aproximada la evolución del calor de hidratación en el tiempo.



**Figura 8-2:** Evolución de calor en función al tiempo.

Fuente:(LEAL, 2010)

En la primera etapa, se da el primer pico debido al componente químico C3A; después de unas horas, en la segunda etapa, aparece un nuevo pico debido a la hidratación del C3S. Pasadas las primeras 12 horas, se inicia un nuevo incremento para así generar un tercer pico en la tercera etapa debido a la reacción renovada del aluminato tricálcico; por último, luego de 90 horas entra en una etapa donde la generación de calor se reduce y se estabiliza.(VELA, 2015,p14)

### **2.2.13 Calorimetría**

La calorimetría es una técnica experimental en la que, mediante algún tipo de sensor térmico, se detecta directamente el flujo de calor o el gradiente de temperatura de un sistema respecto a un foco calorífico o fuente térmica, cuando tiene lugar un proceso fisicoquímico de naturaleza endotérmica o exotérmica. Las técnicas calorimétricas tienen mucha utilidad en la termodinámica para realizar la caracterización de los sistemas que generan o absorben calor. Debido a la diversidad de sistemas y a la manera como se generan los efectos térmicos, se presentan diversidad de equipos calorimétricos y es prácticamente imposible tener un tipo que sea útil para realizar todas las determinaciones.

Existen varias formas de clasificarlos; una forma de hacerlo es según el principio de medida entre los cuales se tiene una diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ) local como función de tiempo; también se puede clasificar según el modo de operación la cual va referida a la forma en la que opera el calorímetro, entre éstas se tienen: isotérmico, adiabático.(LEAL, 2010)

### **2.2.14 Regresión lineal**

El modelo de regresión trata de explicar la relación que existe entre una variable dependiente Y un conjunto de variables independientes X.

### **2.2.14.1 Recta de regresión**

Se llama así a la recta que atraviesa la nube de puntos y que mejor se ajusta a ellos. Supongamos que medimos la distancia vertical de cada punto a la recta (líneas de trazos en la figura adjunta). La recta buscada sería aquella para la que la suma de estas distancias fuera mínima. La ecuación de una recta es:

$$y = a \cdot x + b \quad (\text{Ec 2. 16})$$

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{Ec 2. 17})$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n} \quad (\text{Ec 2. 18})$$

### **2.2.14.2 Coeficiente de Correlación de Pearson**

El grado de asociación se mide mediante un coeficiente de correlación, indicado por  $r$  y es una medida de asociación lineal. Si se necesita una línea curva para expresar la relación, se deben usar otras medidas más complicadas de la correlación.

El coeficiente de correlación se mide en una escala que varía de + 1 a 0 a - 1. La correlación completa entre dos variables se expresa mediante + 1 o -1. Cuando una variable aumenta a medida que aumenta la otra, la correlación es positiva; cuando uno disminuye a medida que el otro aumenta, es negativo.(Limeres, 2012)

$$r = \frac{\sum(x - \bar{X})(y - \bar{y})}{\sqrt{[\sum(x - \bar{X})^2(\sum(y - \bar{y})^2)]}} \quad (\text{Ec 2. 19})$$

### **2.2.15 Desviación Estándar**

La desviación estándar es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\mathbf{x} - \mathbf{x}^2)}{\mathbf{n} - 1}} \quad (\text{Ec 2. 20})$$

**Donde:**

**x:** es la media de muestra promedio.

**n:** es el tamaño de la muestra.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Hipótesis

##### 3.1.1 *Hipótesis General*

- Por termometría (o método calorimétrico), se podrá estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento.

##### 3.1.2 *Hipótesis Específicas*

- Se podrá obtener las resistencias a compresión de las muestras de cementos puzolánicos Tipo IP y Tipo HE; mediante la Norma INEN 488:2009.
- Será posible elaborar una curva y correlacionarla con las resistencias obtenidas por medio del procedimiento descrito en la Norma INEN 488:2009 tomada como referencia; al obtener la temperatura máxima en pasta de cemento cuando éste se hidrata, a través de la medición termométrica (o método calorimétrico) en función del tiempo.
- Se podrá estandarizar el ensayo mediante la repetitividad del método termométrico (o calorimétrico), para validar la funcionalidad y confiabilidad del mismo, y hacer las respectivas comparaciones.
- Es posible conocer los parámetros más importantes que afecten a la determinación de la resistencia a compresión, y a la temperatura máxima medida en la pasta de cemento al ser éste hidratado.

#### 3.2 Identificación de Variables

##### 3.2.1 *Variables independientes*

- Temperatura de pasta de cemento.

### 3.2.2 Variables dependientes

- Resistencia a la compresión.
- Pérdidas por calcinación.
- Finura del cemento.
- Porcentaje de SO<sub>3</sub>.

### 3.3 Operacionalización de Variables

**Tabla 1-3:** Operacionalización de Variables

<b>Variables</b>	<b>Concepto</b>	<b>Instrumento de medición</b>	<b>Rangos</b>
<b>Temperatura de la pasta de cemento.</b>	Es una magnitud física que refleja la cantidad de calor, ya sea de un cuerpo, de un objeto o del ambiente. (Gardey, 2012)	Termómetros	Cemento Tipo IP 40 - 45 °C Cemento Tipo HE 50 - 70 °C
<b>Resistencia a compresión.</b>	El Esfuerzo máximo que presenta un material a la compresión sin romperse. (Diccionario de Arquitectura y Construcción, 2009)	Equipo de Compresión	Cemento Tipo IP 13 MPa a 3 días. Cemento Tipo HE 12 MPa a 1 día.
<b>Finura del cemento.</b>	Es la distribución del tamaño de partícula del cemento).(Kim, 2010)	Malla 325 ( 45 micras)	Cemento Tipo IP Retenido 3.0 a 3.5 % Cemento Tipo HE Retenido 1.0 a 1.5 %
<b>Fluidez del Mortero de Cemento</b>	Es el peso del agua utilizada, y este debe ser siempre menor que el peso del cemento.	Mesa de flujo	110 ± 5 %

Realizado por: Johana Orna, 2019

### 3.4 Matriz de Consistencia

**Tabla 2-3:** Matriz de Consistencia

<b>Problema General</b>	<b>Objetivo General</b>	<b>Hipótesis General</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si bien la empresa UCEM, S.A., Planta Chimborazo, determina resistencias a la compresión en los cementos Tipo IP y HE basándose en el método establecido en la Norma INEN 488; los resultados se obtienen a las edades de 1, 3, 7 y 28 días (normado). Además, no se dispone de un método que permita resultados en un tiempo menor al indicado en la referida norma (un poco menos de 24 horas), con el que se pudiera tomar decisiones operativas de manera más expedita.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento, a través de la termometría (o método calorimétrico).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Por termometría (o método calorimétrico), se podrá estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento.</li> </ul>
<b>Problema específico</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Hipótesis Específicas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para correlacionar la temperatura máxima medida sobre el cemento cuando entra en contacto con el agua, con el resultado obtenido a través de la determinación de resistencias a compresión por el método de la Norma INEN 488:2009; se requiere conocer los datos (resultados) obtenidos por ambos métodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar las resistencias a compresión en muestras de cementos puzolánicos Tipo IP y Tipo HE, descritos en la Norma 488:2009.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Será posible elaborar una curva y correlacionarla con las resistencias obtenidas por medio del procedimiento descrito en la Norma INEN 488:2009 tomada como referencia; al obtener la temperatura máxima en pasta de cemento cuando éste se hidrata, a través de la medición termométrica (o</li> </ul>

		método calorimétrico) en función del tiempo.
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dada la naturaleza de los procesos productivos en la empresa, y debido a la necesidad de un método que permita resultados en un tiempo menor al indicado, y que permita tomar decisiones operativas de manera más rápida; en el presente trabajo no se dispone de datos de temperatura en pasta de cemento, lo cual se necesitará para analizar y correlacionar las temperaturas máximas de hidratación con las resistencias a compresión, obtenidas a través del método mencionado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Determinar la temperatura máxima en pasta de cemento, generada cuando éste se hidrata en función del tiempo para elaborar una curva y correlacionarla con la resistencia a compresión, obtenida con el método establecido en la Norma INEN 488:2009.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se podrá estandarizar el ensayo mediante la repetitividad del método termométrico (o calorimétrico), para validar la funcionalidad y confiabilidad del mismo, y hacer las respectivas comparaciones.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al tomar varias temperaturas de diferentes muestras, no se conoce si al momento de repetir las existirá una variación o den el mismo resultado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluar la repetitividad del método termométrico a través de comparaciones durante la estandarización del ensayo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se podrá estandarizar el ensayo mediante la repetitividad del método termométrico (o calorimétrico), para validar la funcionalidad y confiabilidad del mismo, y hacer las respectivas comparaciones.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Al tomar algunos parámetros que afectan la resistencia a compresión y la temperatura máxima medida en pasta de cemento, no se conocerá con gran precisión cual tiene mayor influencia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocer los parámetros más importantes que afecten a la determinación de la resistencia a compresión, y temperatura máxima en pasta de cemento formada cuando</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible conocer los parámetros más importantes que afecten a la determinación de la resistencia a compresión, y a la temperatura</li> </ul>

	ésta entra en contacto con el agua (proceso de hidratación)	máxima medida en la pasta de cemento al ser éste hidratado.
--	---	---

Realizado por: Johana Orna, 2019

### 3.5 Tipo y Diseño de Investigación

Debido a que las variables temperatura y resistencia están directamente relacionadas entre sí, el tipo de investigación que se acopla a este hecho es la correlación, dado que si las condiciones al obtener la pasta de cemento cambian; éstas variarán directamente la temperatura de reacción y por ende la resistencia. En primera instancia se empleará la investigación descriptiva, ya que sus fundamentos son precisamente las etapas a emplear en el presente trabajo: examinar los parámetros que conlleva el obtener resistencias altas en cementos, definir y formular hipótesis, así como seleccionar la técnica óptima de recolección de datos y fuentes fiables de información, además, la investigación exploratoria ofrece el acercamiento del tema, que permite familiarizarnos para poder obtener la información inicial para continuar con una investigación más rigurosa.

El diseño de investigación que se perfila de mejor manera a las necesidades del proyecto es la Experimental, debido a que se tomarán muestras aleatorias con el fin de practicar ensayos y obtener datos objetivos al variar parámetros, para luego validarlos hasta conseguir estandarizar el ensayo con datos fiables.

#### 3.5.3 Unidad de Análisis

La unidad de análisis en esta investigación se centró en el estudio de obtener una aproximación de resistencias a compresión de cementos puzolánicos, a través de la determinación de la temperatura máxima en pasta de cemento formada una vez que éste se ha hidratado, por medio de la termometría (método calorimétrico) y los factores que intervienen a la resistencia a compresión en el cemento.

#### 3.5.4 Población de Estudio

La población de estudio de esta investigación corresponde a la producción de la empresa “Unión Cementera Nacional UCEM S.A –Planta Chimborazo”, tanto en el cemento puzolánico Tipo IP como en el cemento Tipo HE; que se encuentran almacenados en el laboratorio de control de calidad.

### 3.5.5 Tamaño de Muestra

Dado que en el laboratorio de control de calidad se toma una muestra diaria de 2kg de cemento de los dos tipos producidos; la población de muestras al ser moderada es igual al tamaño de la muestra empleada en la presente investigación.

### 3.5.6 Selección de muestra

Al tener una población de muestras moderada, resulta conveniente estudiar cada uno de los elementos que la conforman, para ello se requiere de un tipo de muestra no probabilística también conocida como censal, es decir, no se requiere de un tamaño de muestras.

### 3.5.7 Técnicas de recolección de datos

Para obtener información y lograr los objetivos esperados es necesario emplear técnicas, que permitan la obtención de datos fiables mediante pruebas de ensayo en el laboratorio de control de calidad de la empresa.

#### 3.5.7.1 Materiales y Equipos

**Tabla 3-3:** Materiales y equipos

<b>Determinación de la temperatura máxima en pasta de cemento</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Aparato para termometría (o calorimetría).</li><li>• Mezcladora mecánica.</li><li>• Vasos térmicos</li><li>• Termo (Polipropileno) de 1 galón.</li><li>• Balanza para carga de 1000 g <math>\pm</math> 0.5 g de variación y clase de exactitud II.</li><li>• Cronómetro con mecanismo de arranque y parada de aproximadamente 0.5 segundos o menos.</li><li>• Probeta graduada de 500 ml de capacidad.</li><li>• Espátula.</li><li>• Cuchara para tomar muestra.</li><li>• Guantes de goma.</li></ul>
<b>Determinación de resistencia a la compresión</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Mezcladora mecánica.</li><li>• Balanza para carga de 1000 g <math>\pm</math> 0.5 g de variación y clase de exactitud II.</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cronómetro con mecanismo de arranque y parada de aproximadamente 0.5 segundos o menos.</li> <li>• Moldes de bronce.</li> <li>• Mesa de flujo.</li> <li>• Apisonador de caucho o goma.</li> <li>• Espátula.</li> <li>• Cuchara para tomar la muestra.</li> <li>• Guantes de goma.</li> </ul>
<b>Determinación del Residuo de malla T 325</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tamiz de 325.</li> <li>• Plancha de calentamiento o estufa.</li> <li>• Balanza con sensibilidad de 0,0005 g.</li> <li>• Espátula pequeña.</li> </ul>
<b>Determinación de pérdidas por calcinación</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crisol de platino.</li> <li>• Espátula pequeña.</li> <li>• Balanza con sensibilidad de 0,0005 g.</li> <li>• Mufla de 1000 °C.</li> <li>• Guantes para altas temperaturas.</li> <li>• Pinza larga.</li> </ul>

Fuente: NTE INEN, 2009

Realizado por: Johana Orna, 2019

### 3.5.7.2 Metodología para la determinación de temperatura máxima en pasta de cemento.

#### Método de preparación A:

- a) Pesar 800 g de cemento.
- b) Utilizar una relación de agua/cemento igual a 0,35:1.
- c) Colocar el agua y el cemento dentro del recipiente de la mezcladora, y dejar en reposo durante 30 s.
- d) Mezclar durante 30 s a velocidad baja ( $140 \pm 5$  rpm).
- e) Parar la mezcladora y raspar con una paleta los bordes del recipiente durante 15 s.
- f) Mezclar a velocidad rápida ( $285 \pm 10$  rpm) durante 60 s.

### **Método de preparación B:**

- a) Pesar 800 g de cemento.
- b) Utilizar una relación de agua/cemento igual a 0,35:1.
- c) Colocar el agua dentro de la mezcladora.
- d) Encender la mezcladora a velocidad baja ( $140 \pm 5$  rpm) y agregar el cemento progresivamente durante 60 s.
- e) Detener la mezcladora y raspar con una paleta los bordes del recipiente durante 15 s.
- f) Mezclar durante 90 s a velocidad rápida ( $285 \pm 10$  rpm).

### ***3.5.7.3 Determinación de resistencia a la compresión de morteros de cemento, con el método de ensayo de la norma INEN 488:2009.***

- a) Alistar tres moldes limpios, cada uno con 3 compartimientos, es decir en total debe ser 9 cubos.
- b) Cubrir las caras interiores con una capa delgada de aceite haciendo uso de una brocha.
- c) Las proporciones de masa deben consistir, en 1 parte de cemento con 2,75 partes de arena normalizada, en este caso pesar 740 g de cemento y 2035 g de arena, para mezclar usando de 368 a 370 ml de agua. Estas tres proporciones colocar en un tazón de acero.
- d) Amasar la mezcla mecánicamente de forma automática con velocidad lenta y rápida, luego de la velocidad lenta hay un tiempo muerto, en éste mover rápidamente con la espátula todo el mortero adherido a la pared hacia el centro, luego automáticamente pasa a velocidad rápida.
- e) Retirar el mortero y dejar en reposo durante 90 segundos.
- f) Llenar los moldes con una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor en cada compartimiento cúbico, y apisonar el mortero en cada compartimiento 32 veces completando las 4 vueltas, los golpes deben darse siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior. Una vez terminada la primera etapa; llenar los cubos con el mortero restante y apisonar al igual que en la primera capa.
- g) Durante la compactación de la segunda capa, recoger el mortero rebosado sobre la parte superior del molde y retenerlo con las yemas de los dedos para que no se desborde. Finalmente, la compactación del mortero debe sobresalir ligeramente de los moldes.
- h) Terminada la operación de llenado; colocar los moldes llenos en un gabinete húmedo durante 24 horas.
- i) Desmoldar los morteros y marcarlos, estos serán colocados en recipientes sumergidos en agua saturada con cal en un cuarto húmedo hasta completar su edad.
- j) Medir la resistencia a la compresión mediante un equipo.

#### **3.5.7.4 Determinación del residuo de malla T 325 (45 μm), según la norma INEN 197.**

Pesar una muestra de 1 g de cemento, después colocar en el equipo normalizado de malla 325, la muestra se lava con una boquilla rociadora durante 60 segundo con una presión de  $10 \pm 0.5$  psi, para luego colocarla en la plancha de calentamiento, una vez seco, el residuo se retira cuidadosamente evitando la pérdida del mismo y se pesa.

Se determina el residuo por medio de la fórmula:

$$\%Residuo = \text{Peso Residuo} \times 100 \quad (\text{Ec 3.21})$$

#### **3.5.7.5 Determinación de pérdidas por calcinación**

- a) Pesar 1 crisol de platino y anotar el peso.
- b) Tarar el crisol.
- c) Pesar 1 g de muestra de cemento en el crisol.
- d) Colocar en la mufla a  $950 \pm 50$  °C durante 1 hora.
- e) Enfriar el crisol en un desecador hasta la temperatura ambiente.
- f) Pesar el crisol con la muestra calcinada.

Se determina la pérdida por medio de la fórmula:

$$\%PPC = [(P1+1) - P2] \times 100 \quad (\text{Ec 3.22})$$

Donde:

PPC: Perdidas por calcinación en %.

P1: Peso del crisol en g.

P2: Peso del crisol más la muestra calcinada en g.

## CAPITULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 RESULTADOS

##### 4.1.1 Toma de temperatura de la pasta de cemento Tipo HE, para el método A y B

Para la elección del método a utilizar, se analiza en cuál de ellos en un menor tiempo se genera la mayor diferencia entre temperatura máxima e inicial, empleando la misma muestra de cemento tanto para el método A y B.

**Tabla 1-4:** Toma de temperatura en la pasta de cemento del método A.

Método A				
Muestra	Ti °C	Tmáx °C	$\Delta T$ °C	t (h)
Tipo HE	22,3	60,2	37,9	6:15
Tipo HE	23,1	60,1	37,0	5:44
Tipo HE	22,9	55,4	32,5	5:55
<b>Promedio</b>			35,80	5:49

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Tabla 2-4:** Toma de temperatura en la pasta de cemento del método B.

Método B				
Muestra	Ti °C	Tmáx °C	$\Delta T$ °C	t (h)
Tipo HE	22,3	58,6	36,3	6:48
Tipo HE	23,1	59,5	36,4	6:05
Tipo HE	22,9	53,6	30,7	6:15
<b>Promedio</b>			34,47	6:22

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Donde:**

**Ti:** temperatura del agua.

**Tmáx:** temperatura máxima en pasta de cemento al ser hidratada.

**t:** tiempo horas.

En la tabla 7-4, se observó que el método A dio mejor resultado que con el identificado como método B (tabla 8-4). Ya que con el método A, se alcanzaron mayores temperaturas máximas y en menor tiempo.

A partir de estos resultados se seleccionó el método A para realizar los ensayos calorimétricos subsiguientes.

#### ***4.1.2 Efecto de la variación de la temperatura del agua de mezclado en la obtención de temperatura máxima en pasta de cemento Tipo HE.***

Se realizaron pruebas con una misma muestra de cemento y varias temperaturas de agua de mezclado (agua de hidratación), para determinar la temperatura permisible en la aplicación del ensayo. Ya que se tiene como referencia que la temperatura ideal de mezclado es de 23 °C, sin embargo, por diversas razones no siempre se puede cumplir con esa condición; debido al cambio climático, por ello fue necesario determinar un rango para la aceptación del ensayo como válido.

**Tabla 3-4:** Efecto de la variación de temperatura en el agua de mezclado para la elaboración de pasta de cemento Tipo HE.

<b>Variación de Temperatura</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Tmáx °C</b>	<b>t (h)</b>
<b>Tipo HE</b>	18	54,8	6:51
<b>Tipo HE</b>	20	55,5	6:40
<b>Tipo HE</b>	23	55,6	6:13
<b>Tipo HE</b>	26	55,8	6:09
<b>Tipo HE</b>	28	57,6	6:06
<b>PROMEDIO</b>		56,22	6:23

Realizado por: Johana Orna, 2019

En la Tabla 9-4 se puede observar la temperatura más baja de 18 °C y a la más alta de 28 °C, lo cual indica que la diferencia de temperaturas durante la hidratación; se aleja significativamente de la alcanzada con la temperatura ideal de 23 °C y por ello es fácil notar que la temperatura de agua de mezclado debe estar en un rango de 20 y 26 °C. %

#### ***4.1.3 Temperatura máxima de pasta de cemento puzolánico Tipo IP y Tipo HE.***

**Tabla 4-4:** Temperaturas máximas de hidratación en pasta de cemento Tipo IP

<b>Tipo IP</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Tmáx °C</b>	<b>t (h)</b>
1	22,8	44,4	6:40
2	22,9	48,2	6:46
3	23,1	48,1	7:58
4	22,5	46,4	7:42
5	23,2	46,1	6:05
6	22,5	51,5	7:23
7	22,8	54,2	6:30
8	22,7	52,0	6:34
9	21,1	47,6	7:06
10	22,3	42,6	7:48
11	22,8	40,5	7:34
12	22,3	41,5	7:34
13	23,8	43,1	6:58
14	23,8	42,5	6:51
15	22,2	49,7	8:05
16	22,7	41,2	8:05
17	22,7	45,5	7:29
18	22,7	46,3	6:47
19	22,8	47,9	6:45
20	22,3	47,9	7:43
21	22,7	47,9	6:23

Realizado por: Johana Orna, 2019

El rango de temperaturas máximas mostradas en la Tabla 10-4, muestra un límite inferior y superior de 40.5 °C y 49.5 °C respectivamente. Obtenidas en un lapso de tiempo entre 6 a 8 horas.

**Tabla 5-4:** Temperaturas máximas de hidratación en pasta de cemento Tipo HE.

<b>Tipo HE</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Ti °C</b>	<b>Tmáx °C</b>	<b>t (h)</b>
1	22,3	61,2	6:19
2	21,5	59,2	6:16

3	21,5	62,6	6:19
4	23,1	61,6	5:55
5	23,5	64,8	5:49
6	22,8	66,9	5:58
7	22,4	57,1	6:25
8	23,4	57,4	6:12
9	23,3	58,7	6:40
10	22,1	56,5	6:05
11	23,3	62,3	5:59
12	22,5	55,9	6:09
13	22,9	55,4	6:33
14	22,3	62,2	5:56
15	20,2	50,7	6:43
16	21,3	57,6	6:16
17	22,1	65,6	6:04
18	21,5	62,6	7:09
19	22,5	63,1	6:20
20	22,5	64,2	6:08
21	22,5	64,3	6:11

Realizado por: Johana Orma, 2019

De igual manera el rango de temperaturas máximas mostradas en la Tabla 10-4, muestra un límite inferior y superior de 50.7 °C y 66.9 °C respectivamente. Obtenidas en un lapso de tiempo entre 6 a 7 horas. Además, es importante resaltar que la temperatura del agua de mezclado tanto para el cemento Tipo IP y Tipo HE; se mantuvieron en un promedio de 22 °C, lo cual coincide con los valores sugeridos de la Tabla 9-4.

#### **4.1.4 Obtención de resistencias a compresión de cementos Tipo IP y HE, según la Norma INEN 488:2009.**

**Tabla 6-4:** Resistencia a compresión del cemento Tipo IP (INEN 490).

<b>Cemento Tipo IP</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R1 día</b>	<b>R3 días</b>	<b>R7 días</b>
1	5,8	14,0	20,1
2	6,3	14,5	20,3
3	6,3	14,6	20,5
4	6,5	14,1	21,0

5	6,9	14,0	20,1
6	7,2	14,0	20,3
7	7,4	14,7	21,5
8	7,6	14,5	20,0
9	7,9	14,3	20,0
10	8,2	14,8	22,1
11	8,3	14,9	20,6
12	8,3	14,0	20,2
13	8,4	14,5	20,5
14	9,0	14,4	20,0
15	9,1	14,5	20,1
16	9,1	14,1	21,9
17	9,3	16,9	22,3
18	9,4	16,1	21,9
19	10,2	16,2	21,1
20	10,2	17,1	20,8
21	11,2	17,9	23,1
Promedio	8,2	15,0	20,9

Realizado por: Johana Orma, 2019

En la tabla 6-4 se muestran los promedios de resistencias a compresión del cemento Tipo IP de 1, 3 y 7 días. Notándose que el valor de resistencia para 3 días es próximo a los 13 MPa indicados en la Norma INEN 490; de igual forma el valor promedio para 7 días cumple con el valor de 20 MPa sugerido en la misma Norma. Cabe recalcar que para 1 día la norma no sugiere resistencias a compresión.

**Tabla 7-4:** Resistencia a compresión del cemento Tipo HE (INEN 2380).

<b>Cemento Tipo HE</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R1 día</b>	<b>R3 días</b>	<b>R7 días</b>
1	12,0	24,0	28,1
2	12,3	24,0	28,2
3	13,1	24,7	30,3
4	13,2	24,5	29,8
5	13,3	24,8	28,0
6	14,1	24,5	29,2
7	14,2	24,0	29,2
8	14,5	24,3	28,0
9	14,8	24,0	28,0
10	14,9	24,0	29,3

11	15,0	24,3	28,4
12	15,1	24,7	27,2
13	15,3	24,6	28,0
14	15,3	24,0	30,3
15	15,7	24,6	26,9
16	16,1	24,8	28,7
17	16,2	24,3	28,7
18	16,5	24,2	30,1
19	16,8	24,9	32,5
20	16,8	25,4	31,2
21	17,7	26,6	35,4
Promedio	14,9	24,5	29,3

Realizado por: Johana Orna, 2019

La tabla 7-4 muestra promedios de resistencias a compresión del cemento Tipo HE de 1, 3 y 7 días. Se observa que el valor de resistencia para 1 día es próximo a los 12 MPa indicados en la Norma INEN 2380; de igual forma el valor promedio para 3 días cumple con el valor de 24 MPa sugerido en la misma Norma. Cabe recalcar que para 7 días la norma no sugiere resistencias.

#### 4.1.5 Estandarización del cemento puzolánico Tipo IP y HE.

**Tabla 8-4:** Estandarización del cemento puzolánico Tipo IP

Tipo IP				
	T <sub>máx</sub> en pasta de cemento °C			
Muestra	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4
1	51,3	51,5	51,2	51,6
2	47,8	47,9	47,9	47,7
3	42,0	42,3	42,2	42,4
4	48,1	48,3	48,4	48,6

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Tabla 9-4:** Estandarización del cemento puzolánico Tipo HE

Tipo HE				
	T <sub>máx</sub> en pasta de cemento °C			
Muestra	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4
1	65,0	65,0	65,3	65,4
2	63,0	63,4	63,1	63,4

3	50,6	50,8	50,5	51,0
4	54,3	54,5	54,1	54,8

Realizado por: Johana Orma, 2019

#### 4.1.6 Resultados de parámetros que afectan la resistencia a compresión de cementos Tipo IP y HE a la edad de un día.

**Tabla 10-4:** Parámetros que afectan la resistencia a compresión a un día del cemento Tipo IP

Tipo IP				
Muestra	% T-325	% SO3	% C3S	% PPC
1	3,2	3,13	28,8	6,84
2	2,8	3,72	30,9	6,86
3	3,1	3,32	31,6	5,94
4	3,1	3,16	29,9	6,88
5	3,5	3,14	30,7	6,66
6	3,3	3,14	30,3	6,51
7	3,5	1,80	40,3	4,38
8	3,9	2,10	32,1	5,78
9	2,7	1,85	38,5	3,87
10	4,6	2,29	40,8	2,36
11	3,0	1,90	39,1	4,76
12	3,8	2,10	37,3	4,59
13	3,1	2,16	31,8	5,34
14	3,1	2,58	34,3	4,81
15	3,2	2,97	32,2	5,48
16	3,3	2,24	35,4	5,36
17	3,3	2,00	43,2	4,42
18	1,7	2,10	35,8	5,36
19	4,0	2,67	40,6	4,28
20	3,5	2,13	40,2	3,43
21	2,9	2,29	42,0	3,96
Promedio	3,3	2,5	35,5	5,1

Realizado por: Johana Orma, 2019

**Donde:**

**% T-325:** Porcentaje de finura del cemento.

**% SO3:** Contenido de Sulfato en cemento.

**% C3S:** Porcentaje de silicato tricálcico.

**% PPC:** Pérdida por calcinación.

En la tabla 10-4 se muestra la presencia en promedio de los elementos T-325, SO3, C3S y PPC, en el cemento Tipo IP. Al verificar en la Norma INEN 490:2011 los requisitos de 5% de PPC y 4% de SO3; es fácil notar que los valores para el PPC y SO3 de 5,1% y 2,5% respectivamente; están próximos a los requeridos. Cabe mencionar que para el resto de elementos de la tabla la norma no sugiere porcentajes.

**Tabla 11-4:** Parámetros que afectan la resistencia a compresión a un día del cemento Tipo HE.

<b>Tipo HE</b>				
<b>Muestra</b>	<b>% T-325</b>	<b>% SO3</b>	<b>% C3S</b>	<b>% PPC</b>
1	1,0	2,23	45,2	4,50
2	1,2	2,33	46,4	5,11
3	0,8	2,15	50,1	3,79
4	1,2	2,41	46,2	4,49
5	1,4	2,29	50,6	3,67
6	1,1	2,24	51,6	3,91
7	1,3	2,20	48,8	3,71
8	1,2	2,23	49,2	4,59
9	1,0	2,35	48,5	4,66
10	1,0	2,45	51,8	3,26
11	1,0	2,37	53,3	3,52
12	1,1	2,37	52,7	3,83
13	1,0	2,52	47,3	4,29
14	1,1	2,46	49,8	4,40
15	1,0	3,24	45,1	5,16
16	1,1	2,80	45,2	4,89
17	1,2	2,45	54,7	3,66
18	1,0	3,10	48,9	4,60
19	1,0	3,10	45,4	5,38
20	1,2	2,80	46,1	5,02
21	1,1	2,75	53,5	3,34
<b>Promedio</b>	<b>1,1</b>	<b>2,5</b>	<b>49,1</b>	<b>4,3</b>

Realizado por: Johana Orna, 2019

La tabla 11-4 muestra la presencia en promedio de los elementos T-325, SO3, C3S y PPC, en el cemento Tipo HE. Debido a que en la Norma INEN 2380:2011 no contempla el análisis químico para este cemento; no se pueden comparar los resultados.

4.1.7 Obtención de la ecuación lineal de cementos puzolánicos Tipo IP y HE.

**Tabla 12-4:** Cálculo para la obtención de la ecuación lineal del cemento puzolánico Tipo IP

Tipo IP				
Muestra	Tmáx °C	R1 día	X <sup>2</sup>	X.Y
1	40,5	5,8	1640,25	234,90
2	41,2	6,3	1697,44	259,56
3	42,6	6,3	1814,76	268,38
4	41,5	6,5	1722,25	269,75
5	42,5	6,9	1806,25	293,25
6	43,1	7,2	1857,61	310,32
7	44,4	7,4	1971,36	328,56
8	45,5	7,6	2070,25	345,80
9	46,1	7,9	2125,21	364,19
10	48,1	8,2	2313,61	394,42
11	48,2	8,3	2323,24	400,06
12	47,8	8,3	2284,84	396,74
13	47,9	8,4	2294,41	399,96
14	47,9	9,0	2294,41	431,10
15	47,7	9,1	2275,29	434,07
16	47,9	9,1	2294,41	435,89
17	47,6	9,3	2265,76	442,68
18	48,4	9,4	2342,56	454,96
19	51,5	10,2	2652,25	525,30
20	52,0	10,2	2704,00	530,40
21	54,2	11,2	2937,64	607,04
Σ	976,6	172,55	45687,8	8127,34

Realizado por: Johana Orna, 2019

$$a = \frac{n \sum x \cdot y - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{(21 * 8127,34) - (976,6 * 172,55)}{(21 * 45687,8) - (976,6)^2} = 0,3795$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

$$b = \frac{172,55 - (0,3795 * 976,6)}{21} = -9,4317$$

$$y = a \cdot x + b$$

Ecuación para estimar resistencia a compresión de 1 día:

$$y = 0,3795 \cdot x - 9,4317$$

Ecuación para estimar la resistencia a compresión de 3 días:

$$y = 0,23x + 4,2599$$

Ecuación para estimar la resistencia a compresión de 7 días:

$$y = 0,1259x + 15,021$$

**Tabla 13-4:** Cálculo para la obtención de la ecuación lineal del cemento puzolánico  
Tipo HE

Tipo HE				
Muestra	Tmáx °C	R1 día	X <sup>2</sup>	X.Y
1	50,7	12,0	2570,49	608,40
2	55,4	12,3	3069,16	680,31
3	56,5	13,1	3192,25	737,32
4	55,9	13,2	3124,81	737,88
5	57,1	13,3	3260,41	759,43
6	58,7	14,1	3445,69	825,32
7	57,4	14,2	3294,76	812,78
8	57,6	14,5	3317,76	835,20
9	59,2	14,8	3504,64	877,93

10	62,2	14,9	3868,84	926,15
11	61,6	15,0	3794,56	920,92
12	62,3	15,1	3881,29	937,61
13	61,2	15,3	3745,44	936,36
14	62,6	15,3	3918,76	954,65
15	62,6	15,7	3918,76	982,82
16	63,1	16,1	3981,61	1015,91
17	64,8	16,2	4199,04	1049,76
18	65,6	16,5	4303,36	1082,40
19	64,2	16,8	4121,64	1078,56
20	64,3	16,8	4134,49	1080,24
21	66,9	17,7	4475,61	1186,137
$\Sigma$	1269,9	312,7	77123,37	19026,12

Realizado por: Johana Orna, 2019

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{(21 * 19026,12) - (1269,9 * 312,7)}{(21 * 77123,37) - (1269,9)^2} = 0,362$$

$$b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

$$b = \frac{19026,12 - (0,362 * 1269,9)}{21} = -7,0048$$

$$y = a \cdot x + b$$

Ecuación para estimar la resistencia a compresión de 1 día.

$$y = 0,362 \cdot x - 7,0048$$

Ecuación para estimar la resistencia a compresión de 3 días.

$$y = 0,0716x + 20,203$$

Ecuación para estimar la resistencia a compresión de 7 días.

$$y = 0,2143x + 16,351$$

## 4.2 PRUEBAS DE HIPÓTESIS

### 4.2.1 Hipótesis general

Por termometría o método calorimétrico, se podrá estimar las resistencias a compresión en pasta de cemento, formado una vez que ha sido hidratado.

**Tabla 14-4:** Predicción de resistencia a compresión a un día del cemento Tipo IP.

Tipo IP			
	Resistencia a compresión (MPa)		
Muestra	R1 día (Práctica)	R1 día (Teórica)	% ERROR
1	5,8	5,9	2,4
2	6,3	6,2	1,5
3	6,3	6,7	6,9
4	6,5	6,3	2,8
5	6,9	6,7	2,9
6	7,2	6,9	3,8
7	7,4	7,4	0,2
8	7,6	7,8	3,1
9	7,9	8,1	2,1
10	8,2	8,8	7,6
11	8,3	8,9	6,8
12	8,3	8,7	4,9
13	8,4	8,8	4,8
14	9,0	8,8	2,8
15	9,1	8,7	4,7
16	9,1	8,8	3,9
17	9,3	8,6	7,2
18	9,4	8,9	4,9
19	10,2	10,1	0,9
20	10,2	10,3	1,0
21	11,2	11,1	0,6
Promedio			3,6

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Donde:**

**R1 día Práctica:** Resistencia práctica a compresión a un día.

**R1 día Teórica:** Predicción de la resistencia a compresión en base a la temperatura máxima de pasta de cemento, formada una vez que ha sido hidratado.

**% Error:** Porcentaje de error entre la resistencia práctica y la resistencia que se predijo.

**Tabla 15-4:** Predicción de resistencia a compresión a 3 días del cemento Tipo IP.

<b>Tipo IP</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R3 días (Práctica)</b>	<b>R3 días (Teórica)</b>	<b>% ERROR</b>
1	14,0	13,57	3,04
2	13,7	13,74	0,26
3	13,6	14,06	3,37
4	13,5	13,80	2,26
5	13,4	14,03	4,74
6	14,0	14,17	1,21
7	14,7	14,47	1,55
8	13,0	14,72	13,27
9	14,3	14,86	3,94
10	14,8	15,32	3,53
11	14,9	15,35	2,99
12	13,5	15,25	12,99
13	13,3	15,28	14,86
14	14,4	15,28	6,09
15	14,5	15,23	5,04
16	15,0	15,28	1,85
17	16,9	15,21	10,01
18	16,1	15,39	4,4
19	16,2	16,10	0,59
20	17,1	16,22	5,15
21	17,9	16,73	6,56
Promedio			5,13

Realizado por: Johana Orna,2019

**Tabla 16-4:** Predicción de resistencia a compresión a 7 días del cemento Tipo IP.

<b>Tipo IP</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R7 días (Práctica)</b>	<b>R7 días (Teórica)</b>	<b>% ERROR</b>
1	20,1	20,12	0,10
2	20,3	20,21	0,45
3	20,5	20,38	0,56
4	21,0	20,25	3,59
5	20,1	20,37	1,35
6	20,3	20,45	0,73
7	21,5	20,61	4,14
8	20,0	20,75	3,75
9	20,0	20,82	4,12
10	22,1	21,08	4,63
11	20,6	21,09	2,38
12	20,2	21,04	4,15
13	20,5	21,05	2,69
14	20,0	21,05	5,26
15	20,1	21,03	4,61
16	21,9	21,05	3,87
17	22,3	21,01	5,77
18	21,9	21,11	3,37
19	21,1	21,50	1,92
20	20,8	21,57	3,69
21	23,1	21,84	5,43
Promedio			3,17

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Tabla 17-4:** Predicción de resistencia a compresión a un día del cemento Tipo HE.

<b>Tipo HE</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R1 día (Práctica)</b>	<b>R1 día (Teórica)</b>	<b>% ERROR</b>
1	12,0	11,37	5,22
2	12,3	13,07	6,26
3	13,1	13,47	2,8,0
4	13,2	13,25	0,38
5	13,3	13,68	2,88
6	14,1	14,26	1,14

7	14,2	13,79	2,88
8	14,5	13,86	4,39
9	14,8	14,44	2,42
10	14,9	15,52	4,19
11	15,0	15,31	2,05
12	15,1	15,56	3,05
13	15,3	15,16	0,89
14	15,3	15,67	2,41
15	15,7	15,67	0,20
16	16,1	15,85	1,56
17	16,2	16,46	1,62
18	16,5	16,75	1,52
19	16,8	16,25	3,30
20	16,8	16,28	3,08
21	17,7	17,22	2,71
Promedio			2,62

Realizado por: Johana Orna,2019

**Tabla 18-4:** Predicción de resistencia a compresión a 3 días del cemento Tipo HE.

<b>Tipo HE</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R3 días (Práctica)</b>	<b>R3 días (Teórica)</b>	<b>% ERROR</b>
1	24,0	23,8	0,70
2	24,0	24,2	0,71
3	24,7	24,2	1,83
4	24,5	24,2	1,20
5	24,8	24,3	2,05
6	24,5	24,4	0,38
7	24,0	24,3	1,30
8	24,3	24,3	0,11
9	24,0	24,4	1,84
10	24,0	24,7	2,74
11	24,3	24,6	1,29
12	24,7	24,7	0,15
13	24,6	24,6	0,06
14	24,0	24,7	2,85
15	24,6	24,7	0,35
16	24,8	24,7	0,32

17	24,3	24,8	2,23
18	24,2	24,9	2,89
19	24,9	24,8	0,40
20	25,4	24,8	2,34
21	26,6	25,0	6,04
Promedio			1,51

Realizado por: Johana Orna,2019

**Tabla 19-4:** Predicción de resistencia a compresión a 7 días del cemento Tipo HE.

<b>Tipo HE</b>			
	<b>Resistencia a compresión (MPa)</b>		
<b>Muestra</b>	<b>R7 días (Práctica)</b>	<b>R7 días (Teórica)</b>	<b>% ERROR</b>
1	28,1	27,22	3,15
2	28,2	28,22	0,08
3	30,3	28,46	6,08
4	29,8	28,33	4,93
5	28,0	28,59	2,10
6	29,2	28,93	0,92
7	29,2	28,65	1,88
8	28,0	28,69	2,48
9	28,0	29,04	3,71
10	29,3	29,68	1,30
11	28,4	29,55	4,06
12	27,2	29,70	9,20
13	28,0	29,47	5,24
14	30,3	29,77	1,76
15	26,9	29,77	10,65
16	28,7	29,87	4,09
17	28,7	30,24	5,36
18	30,1	30,41	1,03
19	32,5	30,11	7,36
20	31,2	30,13	3,43
21	35,4	30,69	13,31
Promedio			4,39

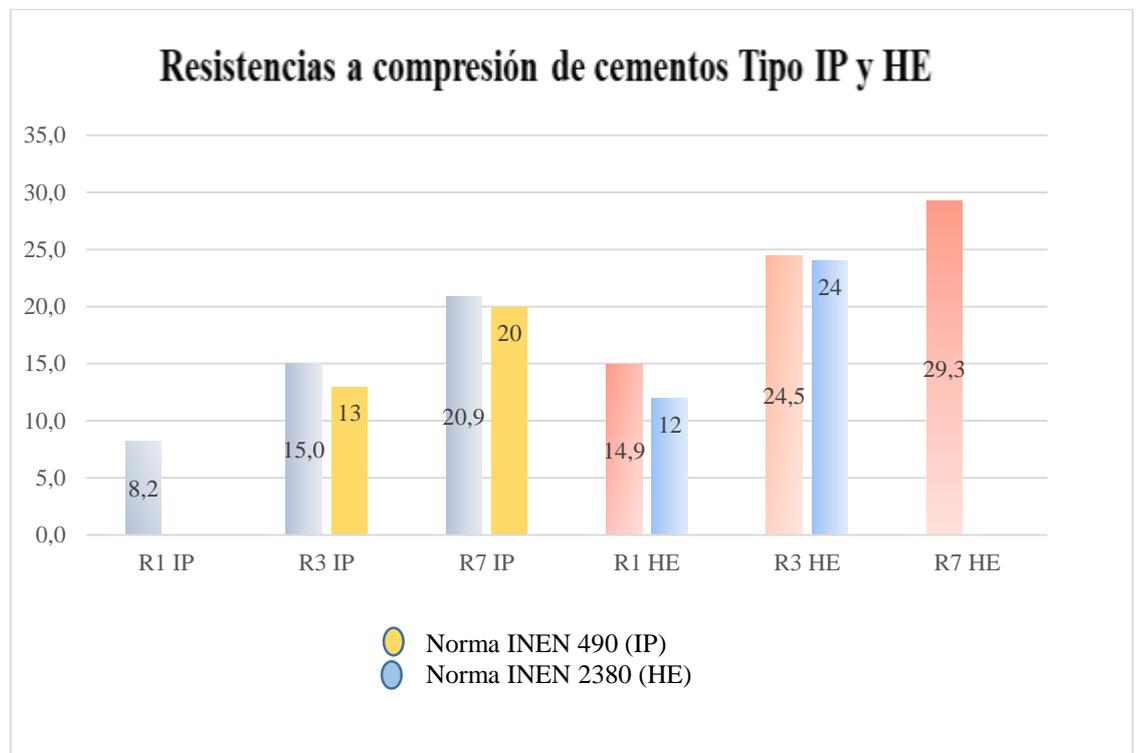
Realizado por: Johana Orna,2019

Se pudo predecir las resistencias a compresión de 1, 3 y 7 días tanto en muestras de cemento Tipo IP y Tipo HE, con un promedio de margen de error menor al 6% para los dos tipos de muestras de cementos evaluadas; por ende, es aceptable el método.

#### 4.2.2 Hipótesis Específicas

##### 4.2.2.1 Hipótesis 1

Se podrá obtener las resistencias a compresión de las muestras de cementos puzolánicos Tipo IP y Tipo HE; mediante la Norma INEN 488:2009



**Gráfico 1-4:** Resistencia a compresión del cemento Tipo ( IP y HE)

**Realizado por:** Johana Orma, 2019

Se obtuvieron resistencias a compresión del cemento puzolánico Tipo IP y HE, según la Norma 488:2009. El gráfico 1-4 muestra que ambos tipos de cemento cumplen con la especificación de la Norma que los rige: cemento Tipo IP, con 13 y 20 MPa para las edades de 3 y 7 días respectivamente (Norma INEN 490, un día no está especificado), y cemento Tipo HE, con 12 y 24 MPa para las edades de 1 y 3 días respectivamente, según la Norma INEN 2380 (7 días no está especificado).

#### 4.2.2.2 Hipótesis 2

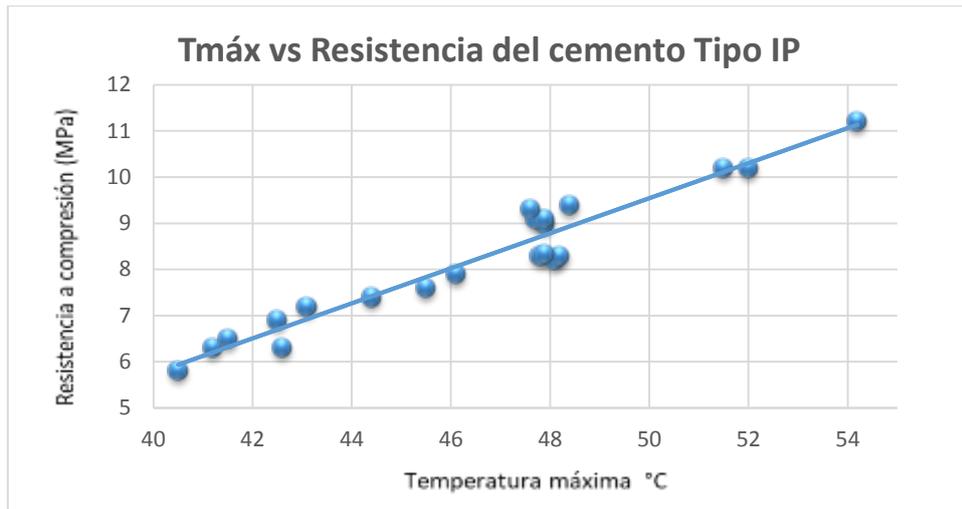
Será posible elaborar una curva y correlacionarla con las resistencias obtenidas por medio del procedimiento descrito en la Norma INEN 488:2009 tomada como referencia; al obtener la temperatura máxima en pasta de cemento cuando éste se hidrata, a través de la medición termométrica (o método calorimétrico) en función del tiempo.

**Tabla 20-4:** Cálculos para la correlación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión del cemento puzolánico Tipo IP.

Tipo IP							
Muestra	Tmáx °C	R1 día (Mpa)	$(x - \bar{x})$	$(y - \bar{y})$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	40,5	5,8	-6,00	-2,42	36,06	5,84	14,51
2	41,2	6,3	-5,30	-1,92	28,14	3,67	10,17
3	42,6	6,3	-3,90	-1,92	15,25	3,67	7,48
4	41,5	6,5	-5,00	-1,72	25,05	2,95	8,59
5	42,5	6,9	-4,00	-1,32	16,04	1,73	5,27
6	43,1	7,2	-3,40	-1,02	11,59	1,03	3,46
7	44,4	7,4	-2,10	-0,82	4,43	0,67	1,72
8	45,5	7,6	-1,00	-0,62	1,01	0,38	0,62
9	46,1	7,9	-0,40	-0,32	0,16	0,10	0,13
10	48,1	8,2	1,60	-0,02	2,54	0,00	-0,03
11	48,2	8,3	1,70	0,08	2,87	0,01	0,14
12	47,8	8,3	1,30	0,08	1,68	0,01	0,11
13	47,9	8,4	1,40	0,13	1,95	0,02	0,19
14	47,9	9	1,40	0,78	1,95	0,61	1,09
15	47,7	9,1	1,20	0,88	1,43	0,78	1,06
16	47,9	9,1	1,40	0,88	1,95	0,78	1,23
17	47,6	9,3	1,10	1,08	1,20	1,17	1,19
18	48,4	9,4	1,90	1,18	3,59	1,40	2,24
19	51,5	10,2	5,00	1,98	24,95	3,93	9,91
20	52,0	10,2	5,50	1,98	30,20	3,93	10,90
21	54,2	11,2	7,70	2,98	59,22	8,90	22,96
<b>Sumatoria</b>	<b>976,6</b>	<b>172,55</b>	<b>-2,84E-14</b>	<b>3,38E-14</b>	<b>271,25</b>	<b>41,60</b>	<b>102,94</b>
<b>Promedio</b>	<b>46,50</b>	<b>8,22</b>					

Realizado por: Johana Orna, 2019

$$r = \frac{102,94}{\sqrt{(271,25) * (41,60)}} = 0,969$$



**Gráfico 2-4:** Recta de regresión lineal del cemento puzolánico Tipo IP.

Realizado por: Johana Orna,2019

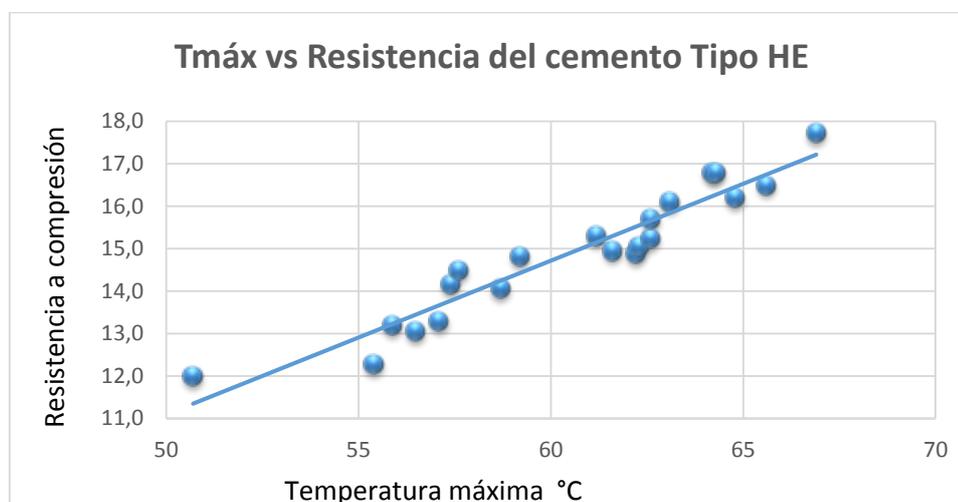
Se puede observar que los datos no están alejados de la recta, indicando que existe una relación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión (determinada a través de la Norma 488:2009) en el cemento Tipo IP; dando una correlación de 0,97, lo cual muestra que la relación que existe entre estas dos variables cuantitativas es fuerte.

**Tabla 21-4:** Cálculos para la correlación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión del cemento puzolánico Tipo HE.

Tipo HE							
Muestra	Tmáx °C	R1 día (Mpa)	$(x - \bar{x})$	$(y - \bar{y})$	$(x - \bar{x})^2$	$(y - \bar{y})^2$	$(x - \bar{x})(y - \bar{y})$
1	50,7	12,0	-9,8	-2,9	95,48	8,34	28,22
2	55,4	12,3	-5,1	-2,6	25,72	6,80	13,23
3	56,5	13,1	-4,0	-1,8	15,77	3,38	7,30
4	55,9	13,2	-4,6	-1,7	20,90	2,85	7,72
5	57,1	13,3	-3,4	-1,6	11,37	2,52	5,35
6	58,7	14,1	-1,8	-0,8	3,14	0,69	1,47
7	57,4	14,2	-3,1	-0,7	9,43	0,53	2,24
8	57,6	14,5	-2,9	-0,4	8,25	0,15	1,11
9	59,2	14,8	-1,3	-0,1	1,62	0,00	0,07
10	62,2	14,9	1,7	0,0	2,99	0,00	0,00
11	61,6	15,0	1,1	0,1	1,27	0,00	0,07
12	62,3	15,1	1,8	0,2	3,34	0,03	0,30
13	61,2	15,3	0,7	0,4	0,53	0,17	0,30
14	62,6	15,3	2,1	0,4	4,53	0,13	0,77
15	62,6	15,7	2,1	0,8	4,53	0,66	1,73
16	63,1	16,1	2,6	1,2	6,91	1,47	3,19
17	64,8	16,2	4,3	1,3	18,74	1,72	5,68
18	65,6	16,5	5,1	1,6	26,30	2,60	8,27
19	64,2	16,8	3,7	1,9	13,90	3,66	7,13
20	64,3	16,8	3,8	1,9	14,66	3,66	7,32
21	66,9	17,7	6,4	2,8	41,33	8,08	18,27
<b>Sumatoria</b>	<b>1269,9</b>	<b>312,7</b>	<b>0,0</b>	<b>0,0</b>	<b>330,70</b>	<b>47,43</b>	<b>119,73</b>
<b>Promedio</b>	<b>60,5</b>	<b>14,9</b>					

Realizado por: Johana Orna,2019

$$r = \frac{119,73}{\sqrt{(330,70) * (47,43)}} = 0,956$$



**Gráfico 3-4:** Recta de regresión lineal del cemento puzolánico Tipo HE

Realizado por: Johana Orna, 2019

Se puede observar que existe una relación lineal entre la temperatura máxima y la resistencia a compresión en el cemento Tipo HE, con una correlación fuerte de 0.96 entre estas dos variables cuantitativas.

#### 4.2.2.3 Hipótesis 3

Se podrá estandarizar el ensayo mediante la repetitividad del método termométrico (o calorimétrico), para validar la funcionalidad y confiabilidad del mismo, y hacer las respectivas comparaciones.

**Tabla 22-4:** Repetición para la estandarización del cemento Tipo IP.

Tipo IP					
	Tmáx en pasta de cemento °C				
Muestra	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Desviación estándar
1	51,3	51,5	51,2	51,6	0,18
2	47,8	47,9	47,9	47,7	0,10
3	42	42,3	42,2	42,4	0,17
4	48,1	48,3	48,4	48,6	0,21
Promedio					0,17

Realizado por: Johana Orna, 2019

**Tabla 23-4:** Repetición para la estandarización del cemento Tipo HE.

Tipo HE					
	T <sub>máx</sub> en pasta de cemento °C				
Muestra	Termo 1	Termo 2	Termo 3	Termo 4	Desviación estándar
1	65	65	65,3	65,3	0,17
2	63,3	63,4	63,1	63,4	0,14
3	50,6	50,8	50,5	50,7	0,15
4	54,3	54,5	54,3	54,4	0,10
Promedio					0,14

Realizado por: Johana Orna, 2019

Se puede observar que para la estandarización del cemento Tipo IP y Tipo HE, se calculó la desviación estándar, que mide el grado de dispersión o variabilidad de cada una de las repeticiones que se realizó con la misma muestra; pero en distintos termos. Indicando que mientras mayor es el grado de desviación estándar; mayor será su dispersión. Al observar las dispersiones obtenidas de 0,17 para el Tipo IP y 0,14 para el HE; se las podría considerar como insignificantes.

#### 4.2.2.4 Hipótesis 4

Es posible conocer los parámetros más importantes que afecten a la determinación de la resistencia a compresión, y a la temperatura máxima medida en la pasta de cemento al ser éste hidratado.

**Tabla 24-4:** Correlación de la resistencia en función de los parámetros más importantes del cemento puzolánico Tipo IP.

Tipo IP						
	T <sub>máx</sub> °C	R1 día (MPa)	% T-325	% SO3	% PPC	% C3S
T <sub>máx</sub> °C	1					
R1 día (MPa)	0,96908836	1				
% T-325	0,08280397	-0,015726801	1			
% SO3	-0,60852268	-0,545317191	-0,05251184	1		
% PPC	-0,78569653	-0,703157825	-0,42122257	0,75829217	1	
%C3S	0,74458273	0,708711952	0,19947283	-0,71644024	-0,89928818	1

Realizado por: Johana Orna, 2019

En la tabla 24-4 se muestran correlaciones multivariable con los parámetros que se escogieron, correlaciones que se verifican según el valor obtenido, mientras más cercano esté al 1; mayor influencia tendrá sobre la resistencia a compresión. En el cemento tipo IP el elemento que afecta

a la resistencia a compresión es el PPC con un valor de - 0,70, el signo negativo indica que a medida que aumenta la cantidad de PPC la resistencia disminuye; No así con el 0,7 del C3S que por lo contrario la aumenta.

**Tabla 25-4:** Correlación de la resistencia en función de los parámetros más importantes del cemento puzolánico Tipo HE.

Tipo HE						
	Tmáx °C	R1 día (MPa)	%T-325	%SO3	%C3S	% PPC
Tmáx °C	1					
R1 día (Mpa)	0,958130021	1				
%T-325	-0,113741347	-0,101243342	1			
%SO3	0,688443215	0,719076856	-0,21181378	1		
%C3S	0,305121125	0,175774572	0,07012622	-0,36621484	1	
%PPC	-0,041060622	0,057592001	-0,06877989	0,51289121	-0,85319152	1

Realizado por: Johana Orna,2019

La tabla 25-4 muestra las correlaciones de los elementos presentes en pasta de cemento Tipo HE: T-325, SO3, C3S y PPC. De entre estos se puede observar que el SO3 afecta a la temperatura máxima al identificarse una correlación de 0,71 y a la resistencia a compresión con una correlación de 0,68.

### 4.3 Discusión de resultados

Para los fines de este estudio en primera instancia se realizó la selección de entre los métodos A y B para tomar la temperatura máxima en pasta de cemento. El primero fue el más adecuado debido a que se pudo obtener el valor de la temperatura máxima en un tiempo menor de 5,49 horas (Tabla 1-4), sin embargo, para el método B durante la colocación del cemento en la mezcladora en funcionamiento; perdió gran parte del cemento además de no mezclarse en su totalidad y dando una temperatura máxima en un tiempo mayor de 6.22 horas (Tabla 2-4). Si bien ambos métodos tienen ventajas particulares, una variación en la relación agua/cemento, así como el tiempo de mezclado a distintas rpm de la máquina mezcladora; podría dar origen a un método alternativo que permitiría obtener temperaturas máximas en pastas de cemento en menores tiempos.

Al tomar en cuenta la variación de la temperatura del agua de mezclado para una misma muestra; se pudo observar que la temperatura máxima varió, notando así, que mientras mayor es la temperatura del agua de mezclado; el tiempo de obtención de la temperatura máxima de pasta de cemento es más corto (Tabla 3-4). Se podría reducir el error en la obtención de la temperatura máxima y su tiempo de determinación, al emplear una temperatura de agua de mezclado de 25 °C en todas las muestras.

Se recolectaron 21 muestras con el fin de determinar la temperatura máxima y verificar si existe una correlación entre las dos variables cuantitativas; obteniendo valores de correlación fuertes para el cemento Tipo IP de 0.96 y Tipo HE 0.95. Se observó que las temperaturas más altas se manifestaron en el cemento Tipo HE, ya que es un cemento más fino lo cual provoca un desprendimiento de calor al tener contacto con el agua, además es un cemento especial que se fabrica para altas resistencias iniciales; en comparación el cemento puzolánico Tipo IP, que es de molienda más gruesa, por ende, la temperatura máxima se obtiene en un mayor tiempo debido que es menos fino que el cemento Tipo HE. Si bien el presente proyecto empleó termómetros de precisión para correlacionar la temperatura máxima en pastas de cemento; la utilización de calorímetros con un sistema de recolección y procesamiento de datos derivaría en datos más exactos.

Al estimar las resistencias a compresión de 1, 3 y 7 días por medio de la temperatura máxima medida en pasta de cemento, se obtuvo un margen de error promedio de 3,61 % para el cemento Tipo IP y 2,61% para el Tipo HE; indicando que el método es confiable para tomarlo como referencia para estimar resistencias a compresión mediante ecuaciones lineales. El empleo de otro método estadístico de predicción podría disminuir el margen de error.

## CONCLUSIONES

Se determinaron las resistencias a compresión del cementó puzolánico Tipo IP con 13 y 20 MPa para las edades de 3 y 7 días respectivamente (Norma INEN 490, un día no está especificado), y para el Tipo HE con 12 y 24 MPa para las edades de 1 y 3 días respectivamente, según la Norma INEN 2380 (7 días no está especificado); lo cual indica que las resistencias obtenidas se encuentran en rangos recomendados por las mencionadas Normas.

Se determinó la temperatura máxima en pasta de cemento previa selección del método más adecuado para realizar las mezclas. De acuerdo a los tiempos obtenidos por los métodos A y B, el tiempo menor de 5.49 horas del método A; mostró que es el más idóneo, debido a la obtención de la temperatura máxima en menor tiempo, además, se correlacionó con la resistencia a compresión (Norma INEN 488) obteniendo como resultado del cemento Tipo IP 0,97 y Tipo HE 0,96, valores que muestran una cercanía a uno; mostrando así una correlación positiva fuerte, señal de que a medida que aumenta la temperatura aumenta la resistencia a compresión.

Al evaluar la repetividad del ensayo con 4 muestras aleatorias de cementos puzolánicos, y además de emplear el mismo sistema de aislamiento durante la reacción exotérmica para su estandarización; se obtuvo una desviación estándar de 0.16 para el Tipo IP y 0,14 para el Tipo HE. Debido a que mientras mayor es el grado de desviación estándar; mayor será su dispersión. Para el caso particular es estas cuatro muestras la dispersión fue insignificante.

Al identificar los parámetros más importantes que afectan la resistencia a compresión del cemento a un día, éstos fueron: Finura, mientras más fino es el cemento; más resistencia se obtendrá; Perdida por calcinación, indica que existe gran cantidad de compuestos inertes que afectan la resistencia, y a largo plazo producirá expansión; Cantidad de C3S, afecta la resistencia a temprana edad y genera un alto calor de hidratación; tomando en cuenta que esto va a depender del contenido del Clinker. Se puede concluir que de entre los parámetros mencionados el más crítico, y que afecta la temperatura máxima en pasta de cemento; es la temperatura del agua de mezclado, debido a que mientras mayor es ésta; mayor será la temperatura máxima y todo en un menor tiempo.

## **RECOMENDACIONES**

Indistintamente del método para tomar la temperatura máxima en pasta de cemento, se recomienda emplear una variación en la relación agua cemento, así como el tiempo de mezclado a distintas rpm de la máquina mezcladora; para así poder dar origen a un método alternativo que permitiría obtener temperaturas máximas en pastas de cemento en menores tiempos.

Si bien el presente proyecto empleó termómetros de precisión para correlacionar la temperatura máxima en pastas de cemento; se recomienda la utilización de calorímetros con un sistema de recolección y procesamiento de datos para una mayor exactitud en los resultados a obtener.

No colocar directo el termómetro a la pasta de cemento debido que la pasta se fragua y el termómetro no se podrá retirar, lo cual es aconsejable colocar un pitillo para proteger al termómetro.

Que la Empresa “UNIÓN CEMENTERA NACIONAL UCEM S.A –PLANTA CHIMBORAZO” siga enriqueciendo la tabla de temperatura máxima en pasta de cemento vs resistencia a compresión (Norma INEN 488) para que exista una mayor cantidad de datos.

## GLOSARIO

### A

**Absorción:** es el incremento en porcentaje, respecto a la masa seca inicial, de un material sólido como resultado de la penetración de agua en los poros permeables.

### C

**Calor de hidratación:** al igual que la mayoría de las reacciones químicas espontáneas, las reacciones de hidratación entre el cemento y el agua son exotérmicas, lo que significa que liberan calor. Grandes volúmenes de concreto pueden calentarse considerablemente durante los primeros días después de la mezcla cuando la hidratación es rápida.

**Cemento:** esta palabra se usa coloquialmente para significar varias cosas muy diferentes: el polvo seco que no ha reaccionado que viene en un saco, el material pegajoso fluido que se forma justo después de agregar agua y la sustancia similar a una roca que se forma más tarde.

**Concreto:** una mezcla de arena, grava y rocas unidas por pasta de cemento. El material hecho por el hombre más ampliamente utilizado en el mundo.

**Curado / Endurecimiento:** términos esencialmente intercambiables que significan el proceso de ganancia de fuerza continua después de que la pasta de cemento se ha fraguado, debido a reacciones químicas entre el cemento y el agua.

**Clinker:** Es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento, está constituido por una especie de bolas de color grisáceo de tamaño similar al diámetro de una pelota de golf, aunque en ocasiones son más pequeñas.

### E

**Endurecido:** se refiere a la pasta de cemento u hormigón que ha ganado la fuerza suficiente para soportar alguna carga.

## F

**Fresco:** se refiere a pasta de cemento u hormigón que se ha mezclado recientemente y aún es fluido. Esto es de lo que están llenos esos grandes camiones con el contenedor giratorio en la parte posterior. (Estos a menudo se llaman "mezcladores de cemento")

## H

**Hidratación:** son las reacciones químicas entre el cemento y el agua. La hidratación es lo que hace que la pasta de cemento se fragüe por primera vez y luego se endurezca.

## M

**Mortero:** es una mezcla de pasta de cemento y arena utilizada en capas delgadas para unir ladrillos o piedras. Técnicamente, el mortero es solo un tipo específico de concreto con un pequeño tamaño agregado máximo.

## P

**Pasta de cemento:** cemento que se ha mezclado con agua.

**Portland:** El cemento Portland es el nombre genérico que reciben los cementos hidráulicos básicos y de gran eficiencia. Se obtienen al triturar el Clinker, que se consigue cociendo una mezcla cuidadosamente compuesta de piedra caliza, sílice, alúmina y, en algunos casos, otros productos.

**Puzolana:** Es un mineral silíceo ligero que se genera durante las erupciones volcánicas de lava basáltica. Contiene sílice, alúmina y óxido de hierro (lo que le aporta el color rojo), así como cal y óxido de magnesio. La puzolana se utiliza como aditivo del cemento.

## T

**Trabajabilidad:** Característica de una mezcla o mortero en cuanto a la facilidad que presenta para ser colocado.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**Asencios, A. T.** Determinación de la resistencia a la compresión del concreto por el método de madurez. Universidad Nacional de Ingeniería Peru.2016, pp. 13.

**Anon.** Hidratación del cemento portland.2010, pp. 57- 72.

**Aranda, Pablo Lorca.** Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante.2014, TESIS [en línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/39340/Lorca - EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓXIDO CÁLCICO SOBRE MEZCLAS CON ALTA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO P...pdf?sequence=1>.

**Chaturvedi, V P Chatterjee and S K et NATIONAL.** Microstructural features of indian portland cement clinker samples. 2013, pp.15-19.

**Cogollo Serrano, A. J., & García Galeano, J. M.** Estudio comparativo de las propiedades físicas de concretos elaborados con los diferentes cementos Portland tipo I y agregados normalizados fabricados en Colombia. Cartagena.2004, pp. 9-10.

**Diccionario de Arquitectura y Construcción.** www.parro.com.a. 2009. [Citado el: 14 de octubre de 2018.]

**Estrella C., Yuri Esther.** Modelamiento Termodinámico del proceso de clinkerización en una planta de producción de cemento a partir de un análisis basado en balances de masa y energía, 2017. Disponible en:<https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/3108/Trabalho de conclusao de curso-Yuri Estrella.pdf>

**Fierro, José, Alonso et MAE--CI, R E G.** COMPLEMENTARIO Y PLAN DE MANEJO CHIMBORAZO.2016.

**Flores, Edwin.** Evaluación Técnica Del Proceso De Secado De Puzolana Y Premolienda De Cemento En Cia. Industrias Guapán S.a. 2014, pp. 25-29.

**Garcia, Grisel.** “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”.2011. Disponible en: <https://docplayer.es/56042499-Universidad-autonoma-de-nuevo-leon.html>.

**Gardey, Julián Pérez Porto y Ana.** 2012. Definiciones. De. [En línea] 2012. [Citado el: 10 de enero de 2010.] <https://definicion.de/temperatura>.

**Giordani, Claudio et Leone. Diego. Docentes: Claudio Giordani.Diego Leone.** 1o Año Ingeniería Civil – Comisión 02.2015, Disponible en: [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1\\_ano/civil1/files/IC I-Cementos \(1\).pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC I-Cementos (1).pdf).

**Goma, Fausto.** El cemento Portland y otros aglomerantes. Barcelona: Tecnico asociado, s.a., 1979.

**Hu, Q. X.** Isothermal calorimetry tests and modeling of cement hydration parameters. ELSEVIER. 2009, pp.11.

**INEN 2380:2011.** Cementos Hidráulicos. Requisito de desempeño para cementos hidráulicos.

**INEN 490: 2011.** Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos.

**ICP, Ingeniería de cimentación. MODULO 1: CEMENTOS PETROLEROS CARACTERISTICAS Y ANALISIS – Unidad 1: Los cementos Petroleros y sus Propiedades** 1.2014, pp. 1- 19.

**Itúrburu, Olga et Ortíz, Andrés.** Escuela superior politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación “implementación de eficiencia energética en empresa cementera bajo norma iso 50001” .2018, pp.35-39.

**JürgenButt, H. A.** Effect of water and nano-silica solution on the early stages cement hydration. ELSEVIER.2016, pp. 9.

**Kim, Soo Geun.** Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement 2010. Disponible en: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer>.

**Lasse Frølich, L. W.** Using isothermal calorimetry to predict one-day mortar strengths. ELSEVIER. 2016, pp. 6.

**Laboratorio Central de CEMEX México.** Metodologías de preparación de muestras en polvo para análisis químico.2010, pp. 3-5.

**Leal, Daniel.** Desarrollo de un método calorimétrico para la predicción o de resistencias a la compresión en muestras de cemento portland tipo I y tipo III.2010, pp. 26-28.

**Limeres, M Carmen.** Regresión lineal simple 2012: Disponible en: [http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP DPTO/MATERIALES/Mat\\_50140116\\_Regr\\_simple\\_2011\\_12.pdf](http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP DPTO/MATERIALES/Mat_50140116_Regr_simple_2011_12.pdf).

**Norris, D.,** “Kiln Feed Homogeneity and Clinker Microscopy, “Proceedings of the 10th International Conference on Cement Microscopy, International Cement Microscopy Association, San Antonio, Texas, 1988, pp. 93-98.

**Ono, Y.**, “Observation of Clinker Texture by Reflection Microscope,” Reviews, 45th General Meeting, Cement Association of Japan, 1991, pp. 24-29

**Prato, Nancy.** Abril 2007. QUMICA DEL CEMENTO - Quím. Farm. abril 2007.

**Rahhal, H. D.** Estudio calorimétrico del cemento portland. Instituto de Ciencias de la Construcción, España.2014, pp. 8.

**Sánchez.M. F.** Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.2000, pp. 10.

**Tironi, Alejandra.** Materiales cementicios de baja energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica. 2013, pp, 39-45.

**Valdivia, Carolina.** “Efectos del sulfato de calcio en la durabilidad de mortero con adición de nanomoléculas de sílice”.2010. Disponible en: <http://docplayer.es/63835312-Universidad-austral-de-chile.html>.

**Vela, Marco.** Estudio termodinámico teórico - práctico sobre el comportamiento de vaciados de concreto masivo a más de 4 700 m.s.n.m en la sierra del Perú.2015. Disponible en: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/6625>.

# **ANEXOS**

**Anexo A:** Ensamblaje del equipo para medición de la temperatura máxima en pasta de cemento.

<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p><b>a)</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>b)</b></p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p><b>c)</b></p>  </div> </div>				
<b>Notas:</b>	<b>Categoría del diagrama</b>	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  <b>REALIZADO POR:</b>  Johana Estefanía Orna Quintanilla	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>
<p><b>a)</b> Termos con sus respectivos termómetros</p> <p><b>b)</b> Colocación del termo en la pasta de cemento.</p> <p><b>c)</b> Vaso térmico</p>	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		1	A4

**Anexo B: Resistencia a compresión**

a)	b)	c)	d)
			
<b>Notas:</b>	<b>Categoría del diagrama</b>	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  <b>REALIZADO POR:</b>  Johana Estefanía Orna Quintanilla	<b>Lámina</b>
a) Cemento y arena estándar b) Mesa de flujo c) Moldes d) Prensa	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		2

**Anexo C:** Equipos para obtener pérdidas por calcinación del cemento.

a)

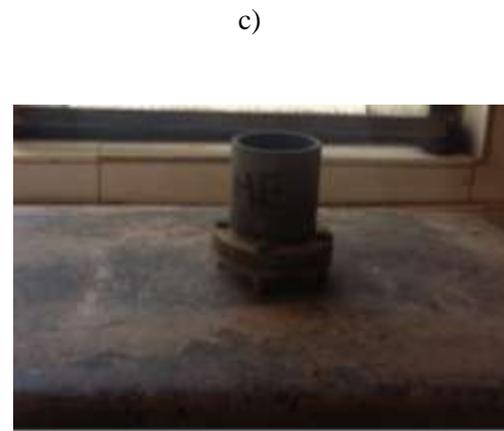


b)



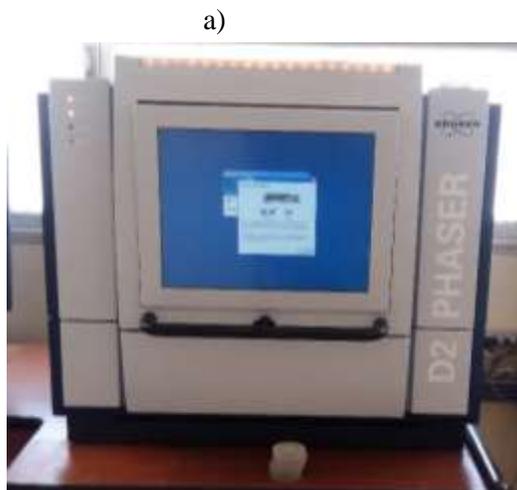
Notas:	Categoría del diagrama	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	Lámina	Escala
a) Balanza analítica	<input type="checkbox"/> Certificado	<b>REALIZADO POR:</b> Johana Estefanía Orna Quintanilla	3	A4
b) Mufla de 1000 °C	<input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar			

**Anexo D:** Obtención de finura del cementó T- 325 (45  $\mu\text{m}$ )



<b>Notas:</b>	<b>Categoría del diagrama</b>	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  <b>REALIZADO POR:</b>  Johana Estefanía Orna Quintanilla	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>
a) Malla T-325 (45 $\mu\text{m}$ ) b) Balanza analítica c) Plancha de calentamiento	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		4	A4

**Anexo E:** Equipo para obtención de datos del C3S, S03.



<b>Notas:</b>	<b>Categoría del diagrama</b>	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  <b>REALIZADO POR:</b>  Johana Estefanía Orna Quintanilla	<b>Lámina</b>	<b>Escala</b>
a) Difractómetro de rayos X b) Portamuestras	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Aprobado <input type="checkbox"/> Por aprobar <input checked="" type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Por verificar		5	A4

Anexo F: Requerimientos físicos de la Norma INEN 490

TABLA 2. Requisitos físicos

TIPO DE CEMENTO <sup>A</sup>	NORMA APLICABLE	IS (<70), IT(P<S<70), IP, IT(P≥S)	IS (<70) (MS), IT(P<S<70) (MS), IP(MS), IT(P≥S) (MS)	IS (<70) (HS), IT(P<S<70) (MS), IP(HS), IT(P≥S) (HS)	IS (≥70), IT(S≥70)	IP (LH) <sup>B</sup> , IT(P≥S) (LH) <sup>B</sup>
Finura	NTE INEN 196, NTE INEN 957	c	c	c	c	c
Expansión en autoclave, % máximo	NTE INEN 200	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Contracción en autoclave, % máximo <sup>D</sup>	NTE INEN 200	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat. <sup>E</sup>	NTE INEN 158					
Fraguado, minutos, no menor a		45	45	45	45	45
Fraguado, horas, no mayor a		7	7	7	7	7
Contenido de aire en el mortero, volumen % máximo <sup>A</sup>	NTE INEN 195	12	12	12	12	12
Resistencia a la compresión, mínimo <sup>A</sup> , MPa	NTE INEN 488					
3 días		13,0	11,0	11,0	--	--
7 días		20,0	18,0	18,0	5,0	11,0
28 días		25,0	25,0	25,0	11,0	21,0
Calor de hidratación máximo: <sup>F</sup>	NTE INEN 199					
7 días, kJ/kg		290	290	290	--	250
(cal/g)		(70)	(70)	(70)	--	(80)
28 días, kJ/kg		330	330	330	--	290
(cal/g)		(80)	(80)	(80)	--	(70)
Requerimiento de agua, % máximo, en peso del cemento,	NTE INEN 488	--	--	--	--	64
Contracción por secado, % máximo.	NTE INEN 2 504	--	--	--	--	0,15
Expansión en mortero, % máximo: <sup>G</sup>	NTE INEN 867					
14 días		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
8 semanas		0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
Resistencia a los sulfatos, % máximo: <sup>H</sup>	NTE INEN 2 503					
Expansión a 180 días		(0,10) <sup>I</sup>	0,10	0,05	--	(0,10) <sup>I</sup>
Expansión a 1 año		--	--	0,10	--	--

Anexo G: Requerimientos físicos de la Norma INEN 2380

**TABLA 1. Requisitos físicos normalizados**

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	INEN 196	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado, método de Vicat <sup>B</sup>	INEN 158						
Inicial, no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
Inicial, no más de, minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	c	c	c	c	c	c
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo <sup>D</sup>	INEN 488						
1 día		--	12	--	--	--	--
3 días		13	24	11	11	5	--
7 días		20	--	18	18	11	11
28 días		28	--	--	25	--	21
Calor de hidratación	INEN 199						
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		--	--	--	--	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		--	--	--	--	--	290 (70)
Expansión en barra de mortero	INEN 2 529						
14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos) <sup>E</sup>	INEN 2 503						
6 meses, % máximo		--	--	0,10	0,05	--	--
1 año, % máximo		--	--	--	0,10	--	--

**Anexo H:** Datos del cemento Tipo IP

Cemento Tipo IP						
Muestra	Tmáx	R1 día (MPa)	%T-325	%SO3	%C3S	% PPC
1	40,5	5,8	3,2	3,13	28,8	6,84
2	41,2	6,3	2,8	3,72	30,9	6,86
3	42,6	6,3	3,1	3,32	31,6	5,94
4	41,5	6,5	3,1	3,16	29,9	6,88
5	42,5	6,9	3,5	3,14	30,7	6,66
6	43,1	7,2	3,3	3,14	30,3	6,51
7	44,4	7,4	3,5	1,80	40,3	4,38
8	45,5	7,6	3,9	2,10	32,1	5,78
9	46,1	7,9	2,7	1,85	38,5	3,87
10	48,1	8,2	4,6	2,29	40,8	2,36
11	48,2	8,3	3,0	1,90	39,1	4,76
12	47,8	8,3	3,8	2,10	37,3	4,59
13	47,9	8,4	3,1	2,16	31,8	5,34
14	47,9	9,0	3,1	2,58	34,3	4,81
15	47,7	9,1	3,2	2,97	32,2	5,48
16	47,9	9,1	3,3	2,24	35,4	5,36
17	47,6	9,3	3,3	2,00	43,2	4,42
18	48,4	9,4	1,7	2,10	35,8	5,36
19	51,5	10,2	4,0	2,67	40,6	4,28
20	52,0	10,2	3,5	2,13	40,2	3,43
21	54,2	11,2	2,9	2,29	42,0	3,96

**Anexo I:** Datos del cementó Tipo HE

Cemento Tipo HE						
Muestra	Tmax (°C)	R1 día (MPa)	%T-325	%SO3	%C3S	% PPC
1	50,7	12,0	1,0	2,23	45,2	4,50
2	55,4	12,3	1,2	2,33	46,42	5,11
3	56,5	13,1	0,8	2,15	50,06	3,79
4	55,9	13,2	1,2	2,41	46,22	4,49
5	57,1	13,3	1,4	2,29	50,59	3,67
6	58,7	14,1	1,1	2,24	51,64	3,91
7	57,4	14,2	1,3	2,20	48,84	3,71
8	57,6	14,5	1,2	2,23	49,23	4,59
9	59,2	14,8	1,0	2,35	48,49	4,66
10	62,2	14,9	1,0	2,45	51,75	3,26
11	61,6	15,0	1,0	2,37	53,25	3,52
12	62,3	15,1	1,1	2,37	52,71	3,83
13	61,2	15,3	1,0	2,52	47,29	4,29
14	62,6	15,3	1,1	2,46	49,78	4,40
15	62,6	15,7	1,0	3,24	45,05	5,16
16	63,1	16,1	1,1	2,80	45,2	4,89
17	64,8	16,2	1,2	2,45	54,66	3,66
18	65,6	16,5	1,0	3,10	48,87	4,60
19	64,2	16,8	1,0	3,10	45,4	5,38
20	64,3	16,8	1,2	2,80	46,1	5,02
21	66,9	17,7	1,1	2,75	53,50	3,34

**Anexo J:** Requisitos químicos para el cemento Tipo IP.

**TABLA 1.** Requisitos químicos

<b>TIPO DE CEMENTO <sup>A</sup></b>	<b>Método de ensayo aplicable</b>	<b>IS (&lt; 70), IT(P&lt;S&lt;70)</b>	<b>IS (≥ 70), IT(S≥70)</b>	<b>IP, IT(P≥S)</b>
Oxido de magnesio (MgO), % máximo	INEN 160	--	--	6,0
Sulfato, reportado como (SO <sub>3</sub> ), % máximo <sup>B</sup>	INEN 160	3,0	4,0	4,0
Sulfuro, reportado como S <sup>2-</sup> , % máximo	INEN 160	2,0	2,0	--
Residuo insoluble, % máximo	INEN 160	1,0	1,0	--
Pérdida por calcinación, % máximo	INEN 160	3,0	4,0	5,0

<sup>A</sup> Los requisitos químicos en esta tabla son aplicables a todos los cementos con incorporador de aire, equivalentes.

<sup>B</sup> Cuando se haya demostrado con el ensayo de la NTE INEN 1 505 que el SO<sub>3</sub> óptimo excede a un valor 0,5% menor del límite de la especificación, es permisible una cantidad adicional de SO<sub>3</sub> a condición de que, cuando el cemento con el sulfato de calcio adicional sea ensayado por el método de ensayo de la NTE INEN 2 501, el sulfato de calcio en el mortero hidratado a las 24 horas ± 15 minutos, expresado como SO<sub>3</sub>, no exceda de 0,50 g/l. Cuando el fabricante suministre cemento bajo esta disposición, él, bajo pedido; debe proporcionar datos de soporte al comprador.