

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL  
SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN PARA EL ANÁLISIS DE LA  
RESISTENCIA A COMPRESIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**ERIKA YAJAIRA LEON CHUQUI**

[erika.leon@epn.edu.ec](mailto:erika.leon@epn.edu.ec)

**DIRECTORA: ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIAS TRONCOSO**

**DMQ, SEPTIEMBRE 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Erika Yajaira Leon Chuqui declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**ERIKA YAJAIRA LEON CHUQUI**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Erika Yajaira Leon Chuqui, bajo mi supervisión.

---

**EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO**  
**DIRECTORA**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**MBA GERMÁN VINICIO LUNA**  
**HERMOSA**

**REVISOR 1 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**M.SC NICOLAY BERNARDO**  
**YANCHAPANTA GÓMEZ**

**REVISOR 2 DEL TRABAJO DE**  
**INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como los productos resultantes del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ERIKA YAJAIRA LEON CHUQUI

EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACIS TRONCOSO

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por la fortaleza, la esperanza y la sabiduría que me brindó para culminar con éxito esta meta profesional conseguida.

A mis padres Humberto y Olga, por el esfuerzo y apoyo que me brindaron durante todos estos años de estudio, por velar por mi seguridad y bienestar, por estar presentes en mi vida y la de mis hermanos, siendo nuestro pilar de apoyo e inspiración.

A mis hermanos Xavier, Viviana, Mónica y José, por estar presentes en mi vida, con su apoyo, cariño y motivación, gracias por formar parte de mis días buenos y malos.

A mis cuatro sobrinas, Josselyn, Jennifer, Anita y Daniela que, con sus travesuras, y sus muestras de afecto me regalan siempre amor y alegría a pesar de la distancia.

A Xavier G, por estar presente en mi vida, como motivador, como apoyo, en los momentos buenos y en los turbulentos, no permitiéndome rendirme a pesar de los obstáculos.

A mi amigo Emilio V., que ha formado parte de mi proceso de aprendizaje y vivencias desde el inicio de mis estudios universitarios, por su apoyo, cariño y paciencia en todas las dificultades. A mis amigos Luis P, Sebastián R, Francisco M, Francisco O, Gabriela A, Karen H, Katherine R, que siempre han brindado su apoyo incondicional y cariño.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental por formar profesionales de calidad, llena de valores, con las herramientas necesarias para salir al campo laboral.

Al Laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental por su colaboración en la realización de ensayos físicos de mi trabajo de titulación.

Al Laboratorio de Materia Condensada del Departamento de Física de la Escuela Politécnica Nacional por su colaboración en realización de los ensayos de Difracción de Rayos X”

A la Ingeniera Mercedes Villacis por ser una excelente directora, que siempre estuvo presta a compartir su conocimiento y experiencia para colaborar en mi trabajo de titulación, y que con su apoyo y guía lo realice de forma exitosa.

Al Ingeniero Gabriel Merino que con su guía y apoyo se pudo lograr lo ensayos en el Lemsur de una forma exitosa y cumpliendo las normativas vigentes.

Y, en general a todos quienes formaron parte de mi vida y me brindaron su aliento, en este caminar de preparación profesional, donde a pesar que estuve lejos de mi tierra natal, no me faltaron los buenos compañeros, los buenos vecinos, los buenos amigos.

*Erika Yajaira Leon Chuqui*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de titulación a Dios, que con su infinito amor permitió conseguir esta gran meta; a mis padres Humberto y Olga, quienes con su esfuerzo, ejemplo y amor me motivaron siempre a creer en mí; a mis hermanos, mis sobrinas, amigos y familiares que creyeron en mí, y que siempre recibí de ellos una palabra de aliento, un consejo, y una motivación.

*Erika Yajaira Leon Chuqui*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	II
AGRADECIMIENTO .....	III
DEDICATORIA .....	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
ALCANCE .....	3
CAPITULO II .....	4
2 MARCO TEÓRICO .....	4
FABRICACIÓN DEL CEMENTO: .....	4
CONSUMO DE MATERIA PRIMA EN ECUADOR: .....	4
PRODUCCIÓN DE CLÍNKER: .....	4
PRODUCCIÓN DE CEMENTO: .....	5
COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL DEL CLÍNKER DEL CEMENTO PORTLAND .....	6
ENERGÍA Y EMISIONES DE CO2 EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO .....	6
CEMENTO TIPO I: .....	8
ARENA NORMALIZADA .....	8

AGUA NORMALIZADA .....	9
PUZOLANA.....	9
CEMENTO PUZOLÁNICO .....	10
EL CAOLÍN .....	10
METAKAOLIN, PRODUCCIÓN Y TRANSFORMACIONES TÉRMICAS .....	11
CAPÍTULO III.....	13
3METODOLOGÍA .....	13
TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	13
MATERIAS PRIMAS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.....	13
CEMENTO.....	13
ARCILLA COLINITA.....	14
ARENA NORMALIZADA .....	15
INSTALACIONES UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS.....	17
ENSAYOS DE LABORATORIO .....	17
TRATAMIENTO TÉRMICO – ARCILLA CAOLINITA.....	17
Donde: .....	19
ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES CÚBICOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE METAKAOLIN.....	19
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	26
INTERRUPCIÓN DE LA HIDRATACIÓN DE MORTERO .....	28
DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	31
CAPÍTULO IV.....	33
4RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	33
RESULTADOS DEL MORTERO PATRÓN .....	33



FLUJO DEL MORTERO PATRÓN.....	33
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	33
DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MOTEROS PATRONES A EDADES DE 28 Y 56 DÍAS.....	33
RESULTADOS DE MORTEROS CON METAKAOLIN A 500°C.....	34
FLUJO DE LOS MORTEROS CON METAKAOLIN A 500°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20% .....	34
PÉRDIDA DE PESO POR IGNICIÓN .....	35
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	35
DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 500°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20% .....	37
RESULTADOS DE MORTEROS CON METAKAOLIN A 800°C.....	37
FLUJO DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 800°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20% .....	37
PÉRDIDA DE PESO POR IGNICIÓN .....	37
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	38
DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 800°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20% .....	39
DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ARCILLA CAOLINITA Y METAKAOLIN.....	43
CAPÍTULO V.....	44
5CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	44
CONCLUSIONES .....	44
RECOMENDACIONES .....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	50

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Proceso de Producción de Clinker .....	5
<b>Tabla 2.</b> Minerales formados en el proceso de clinkerización .....	6
<b>Tabla 3.</b> Cuantificación del consumo energético y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	7
<b>Tabla 4</b> Tipos de cementos portland.....	8
<b>Tabla 5.</b> Requisitos para la arena normalizada (NTE INEN 873, 2017) .....	9
<b>Tabla 6.</b> Clasificación de puzolanas.....	10
<b>Tabla 7.</b> Principales propiedades físicas del caolín.....	11
<b>Tabla 8.</b> Requisitos Químicos (ASTM C618, 2019).....	12
<b>Tabla 9.</b> Requisitos Físicos .....	14
<b>Tabla 10.</b> Análisis químico .....	15
<b>Tabla 11.</b> Propiedades físicas.....	15
<b>Tabla 12.</b> Granulometría de la arena de sílice 20-30. ....	16
<b>Tabla 13.</b> Propiedades básicas de la arena de sílice 20-30. ....	16
<b>Tabla 14.</b> Propiedades químicas de la arena de sílice 20-30.....	16
<b>Tabla 15.</b> Número de cubos a ensayar .....	20
<b>Tabla 16.</b> Dosificación para morteros con Cemento Portland .....	20
<b>Tabla 17.</b> Dosificación para la elaboración de 9 especímenes con metakaolin ....	20
<b>Tabla 18.</b> Tolerancia Admisible para la edad de ensayo de Cubos.....	27
<b>Tabla 19.</b> Determinación del flujo en el mortero patrón con cemento Tipo I.....	33
<b>Tabla 20.</b> Resistencia a compresión del motero patrón con cemento Tipo I .....	33
<b>Tabla 21.</b> Determinación del flujo en morteros con metakaolin a 500°C .....	34
<b>Tabla 22.</b> Pérdida de peso por ignición de metakaolin a 500°C .....	35
<b>Tabla 23.</b> Resistencia a la compresión de morteros con Metakaolin a 500°C .....	35

<b>Tabla 24</b> Determinación del Flujo en morteros con metakaolin a 800°C .....	37
<b>Tabla 25.</b> Pérdida de peso por ignición de metakaolin a 800°C .....	37
<b>Tabla 26.</b> Resistencia a la compresión de morteros con Metakaolin a 800°C .....	38
<b>Tabla 27.</b> Resultados de difracción de rayos X a edad de 28 días.....	41
<b>Tabla 28.</b> Resultados de difracción de rayos X a edad de 56 días.....	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Consumo de materia prima en porcentaje .....	4
<b>Figura 2.</b> Diagrama del proceso de producción del cemento .....	5
<b>Figura 3.</b> Energía consumida total y emisiones de CO <sub>2</sub> .....	7
<b>Figura 4.</b> Cemento Holcim Fuerte Tipo GU .....	13
<b>Figura 5.</b> Arcilla colinita .....	14
<b>Figura 6.</b> Arena Normalizada 20 – 30 .....	15
<b>Figura 7.</b> Metakaolin obtenido a 800 °C y 500 °C .....	17
<b>Figura 8.</b> Horno de Mufla F0610CR.....	18
<b>Figura 9.</b> Mezcladora de Mortero Digital.....	21
<b>Figura 10.</b> Mesa de flujo y molde cónico .....	23
<b>Figura 11.</b> Molde de 3 compartimientos.....	24
<b>Figura 12.</b> Orden de apisonado para moldes cúbicos.....	25
<b>Figura 13.</b> Máquina de compresión .....	26
<b>Figura 14.</b> Muestra de 8 gramos en el vaso de precipitación.....	29
<b>Figura 15.</b> Interrupción de la Hidratación.....	30
<b>Figura 16.</b> Desecador de muestras .....	30
<b>Figura 17.</b> Portamuestra circular .....	31
<b>Figura 18.</b> Equipo de Difracción de Rayos X .....	32
<b>Figura 19.</b> Difracción de Rayos X para el cemento Tipo I a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo] .....	34
<b>Figura 20.</b> Curva de resistencia a compresión con metakaolin a 500°C .....	36

<b>Figura 21.</b> Resistencia a compresión con metakaolin a 500°C .....	36
<b>Figura 22.</b> Curva de resistencia a compresión con metakaolin a 800°C .....	38
<b>Figura 23.</b> Resistencia a compresión con metakaolin a 800°C .....	39
<b>Figura 24.</b> Difracción de Rayos X para el metakaolin 800°C con el 10% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo] .....	39
<b>Figura 25.</b> Difracción de Rayos X para el metakaolin 800°C con el 15% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo] .....	40
<b>Figura 26.</b> Difracción de Rayos X para el metakaolin 800°C con el 20% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo] .....	40
<b>Figura 27.</b> Resultados comparativos de los ensayos de Difracción de Rayos X a 28 días .....	41
<b>Figura 28.</b> Resultados comparativos de los ensayos de Difracción de Rayos X a 28 días .....	42
<b>Figura 29.</b> Resultados de Difracción de Rayos X de la arcilla caolinita y del metakaolin tratado a los 800°C, [K: caolinita, F: feldespato, Q: Cuarzo, L: mica] .....	43

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación tuvo como objetivo principal determinar y proponer un porcentaje de sustitución de metakaolin a morteros con cemento Tipo I para mejorar su resistencia a la compresión, partiendo desde la obtención de la arcilla colinita para posteriormente tratarla térmicamente a 500°C y 800°C y obtener de esta forma el metakaolin. Todos los ensayos se realizaron en base a la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) y a la normativa American Society for Testing and Materials (ASTM).

El porcentaje de sustitución planteado fue de 10, 15 y 20% en peso del cemento Tipo I con metakaolin a 500°C y 800°C para resistencia de diseño planteado en la ATSM C1157 que especifica que para cementos hidráulicos se debe obtener una resistencia a la compresión 20 MPa a 7 días y 28MPa a 28 días. Las edades en las que se estudió la resistencia a compresión fueron a los 7, 28 y 56 días.

Los morteros con una sustitución de 10 y 15% con metakaolin a 800°C tuvieron el mejor resultado al obtener una resistencia superior a los 28 días de 28MPa, mientras que los morteros con sustitución al 20% con metakaolin a 800°C obtuvo la resistencia de 28MPa a los 56 días. De la misma forma, los morteros con una sustitución del 10% con metakaolin a 500°C logró una resistencia a la compresión superior de 28MPa a los 56 días, los demás diseños con metakaolin a 500°C no dieron un resultado positivo a ninguna de las edades de ensayo.

**PALABRAS CLAVE:** metakaolin, cemento, arcilla

## **ABSTRACT**

The main objective of this degree work was to determine and propose a percentage of metakaolin substitution for mortars with Type I cement to improve their compressive strength, starting from the obtaining of colinite clay to subsequently treat it thermally at 500°C and 800°C. °C and thus obtain the metakaolin. All tests were performed based on the Ecuadorian Technical Standard (NTE) and the American Society for Testing and Materials (ASTM) standard.

The proposed substitution percentage was 10, 15 and 20% by weight of Type I cement with metakaolin at 500°C and 800°C for design resistance proposed in the ATSM C1157, which specifies that for hydraulic cements a resistance to compression 20 MPa at 7 days and 28 MPa at 28 days. The ages at which the compressive strength was studied were at 7, 28 and 56 days.

The mortars with a substitution of 10 and 15% with metakaolin at 800°C had the best result, obtaining a resistance superior to 28 days of 28MPa, while the mortars with a substitution of 20% with metakaolin at 800°C obtained the resistance 28MPa at 56 days. In the same way, the mortars with a 10% substitution with metakaolin at 500°C formed a higher compressive strength of 28MPa at 56 days, the other designs with metakaolin at 500°C did not give a positive result to any of the test ages.

**KEYWORDS:** metakaolin, cement, clay

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCIÓN

El sector de la construcción es uno de los principales autores de la generación de gases de efecto invernadero a nivel mundial, considerando que, dentro de esto, la industria del cemento aporta con el 6% aproximadamente de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial, ya que el cemento es un insumo sobresaliente en diversos tipos de obras (Sobrevilla, 2016). La producción de cemento libera emisiones de gases de efecto invernadero tanto directa como indirectamente: las emisiones directas se producen en el proceso químico de calcinación que descompone el carbonato de calcio en óxido de calcio más dióxido de carbono ( $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$ ), y esta representa el 50% de todas las emisiones de la producción, mientras que las emisiones indirectas son la quema de combustibles fósiles para calentar el horno y la electricidad utilizada para alimentar la maquinaria, la cual representa el 40% y 10% respectivamente. Por cada tonelada de producción de cemento se emite aproximadamente una tonelada de CO<sub>2</sub> (Rubenstein, 2012).

Teniendo presente las diferentes formas en que se producen los gases de efecto invernadero en la fabricación del cemento, se puede establecer varios enfoques para reducción de CO<sub>2</sub> y ahorro de energía en la obtención del cemento con un rendimiento similar; uno de esos enfoques es usar las arcillas caoliníticas calcinadas como reemplazo parcial del cemento Portland (CP). Las arcillas caoliníticas desarrollan una buena actividad puzolánica cuando se calcinan a temperaturas entre 500 °C y 800 °C debido a la formación de una fase amorfa reactiva denominada metakaolín (MK), lo cual hace que pueda interactuar de una forma conjunta con el CP, durante la descomposición térmica de las arcillas caoliníticas, se libera agua (H<sub>2</sub>O) al ambiente en lugar de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que ocurre durante la descarbonatación de la piedra caliza en el proceso de clinkerización, además su proceso demanda menos energía (Tironi et al., 2014).

Las puzolanas están formadas por fases activas capaces de reaccionar con la cal que proviene de la hidratación del cemento Portland. Esto lleva a que la puzolana se incorpore a dicho proceso de hidratación y de como resultado un bajo contenido de portlandita e incremento de los silicatos cálcicos hidratados (Massazza, 1993). Entre los materiales puzolánicos más utilizados en los últimos años por su desempeño mecánico y de durabilidad en la industria de la construcción está el metakaolín. El Metakaolín (aluminosilicato de fórmula  $2SiO_2 \cdot Al_2O_3$ ) es obtenido a partir del tratamiento térmico a



condiciones controladas de una arcilla caolinítica (filosilicato de fórmula  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ). (Torres Agredo & Mejía de Gutiérrez, 2007).

Por otro lado, en los últimos 20 años se han realizado varias investigaciones sobre el uso del metakaolín como material suplementario del cemento, las cuales dieron como conclusión que la eficiencia mecánica difiere cuando se utilizan arcillas con diferentes porcentajes de caolín en su composición y además cuando se utiliza el metakaolín en diferentes porcentajes de sustitución a distintas temperaturas conjuntamente con el cemento portland.

Previamente, la investigación realizada por (Kuliffayová et al., 2012a) estableció un aumento a la resistencia a la compresión en un 12% y 24% a los 28 días con una sustitución del 10% y 15% de metakaolin en comparación al valor referencial utilizando solamente cemento, por otro lado, es importante decir que con el 10% de sustitución alcanzo un 46% a los 56 días del valor referencial, mientras que la resistencia compresión con el 15% de sustitución se mantuvo con el valor de los 28 días. Asimismo, (Singh & Garg, 2006) en su investigación también obtuvo resultados positivos, dando a conocer que con un reemplazo del 10% y 20% de metakaolin en el cemento portland existió un incremento del 39% y 36% a los 28 días respectivamente en comparación al valor referencial, mientras que a los 56 días con un reemplazo del 10% y 15% se obtuvo un incremento de 48% y 20% al valor referencial.

En base a lo anterior descrito, el presente trabajo consistirá en comparar y dar a conocer la resistencia a compresión de morteros de cemento Portland adicionando metakaolín (MK) de origen ecuatoriano con un porcentaje de sustitución del 10%, 15% y 20% según las normativas INEN y ASTM aplicadas en el laboratorio en un rango de 500°C y 800 °C.

## **OBJETIVO GENERAL**

Obtener una arcilla caolinita para obtener posteriormente el metakaolin y elaborar 3 tipos de morteros finos de cemento Tipo I con diferentes porcentajes de sustitución para comparar con la resistencia a compresión de morteros comunes.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Adquirir una arcilla caolinita ecuatoriana para efectuar su transformación a metakaolin mediante el proceso de elevación de temperatura en un rango de 500°C

y 800°C para posterior evaluar dicho material obtenido mediante el ensayo de Difracción de Rayos X

- Elaborar morteros finos de cemento con una sustitución parcial del 10%, 15% y 20% de metakaolin obtenido a 500°C y 800°C.
- Analizar y comparar la resistencia a compresión del mortero mejorado con la resistencia a compresión de un mortero común según las normas INEN y ASTM aplicadas en el laboratorio, con un tiempo de curado de 7, 28 y 56 días.
- Realizar la preparación de las muestras obtenidas a 28 y 56 días posterior al ensayo de compresión para efectuar el ensayo de difracción de rayos X en el laboratorio de Electrocerámica del departamento de física

## **ALCANCE**

De acuerdo a la información antes descrita y a los objetivos planteados, se procederá en primer lugar a realizar la obtención de una muestra de arcilla caolinita ecuatoriana para adquirir el metakaolín mediante la calcinación a una temperatura de 500°C y 800°C con una velocidad de 4 °C/min. En segundo lugar, para realizar los morteros se procederá con la sustitución del 10%, 15% y 20% del metakaolin para que finalmente sean ensayados en un tiempo de curado de 7 28 y 56 días. Para obtener resultados con criterios de aceptación confiable se realizarán por triplicado dando como resultado 54 muestras diferentes, las cuales serán analizados para determinar cuál es el porcentaje óptimo de sustitución para el cemento Tipo I.

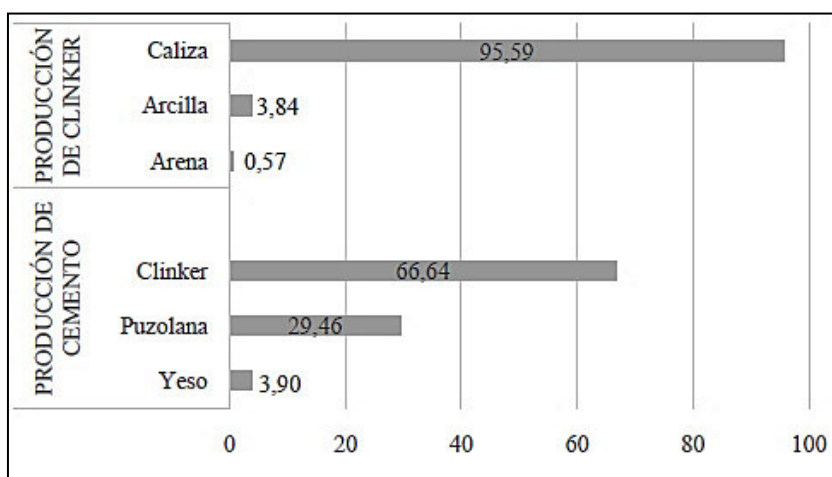
## CAPITULO II

### 2 MARCO TEÓRICO

#### FABRICACIÓN DEL CEMENTO:

#### CONSUMO DE MATERIA PRIMA EN ECUADOR:

En la investigación realizada por Ana León Vélez y Vanessa Guillén Mena en el año 2019, hacen referencia que en Ecuador se produce anualmente una cantidad de 457.461.00 toneladas de cemento y 327.344.00 toneladas de clínker. Adicionalmente, en la Figura 1 se muestra los porcentajes de materia prima para la producción de una tonelada de cemento. (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)



**Figura 1.** Consumo de materia prima en porcentaje

**Fuente:** (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)

#### PRODUCCIÓN DE CLÍNKER:

Durante la producción del clínker, se calienta o calcina la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), para producir cal ( $\text{CaO}$ ) y  $\text{CO}_2$  como productos derivados. (Hanle et al., 2006). Los procesos que entran en la producción de clínker son los 5 presentados a continuación en la Tabla 1. (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020):

**Tabla 1.** Proceso de Producción de Clinker

PROCESO	DESCRIPCIÓN
TRITURACIÓN	Rotura de rocas calizas y de arcilla en el triturador
PREHOMOGENIZACIÓN	Proceso semiautomático que apila la caliza triturada para luego transportarla hasta las tolvas de dosificación del molino de crudo
MOLINO DE CRUDO	La caliza obtenida se dosifica con calizas de alta pureza, arcilla y arena ferrosa. El molino es un circuito cerrado y llega a una temperatura de 320 °C para secar la caliza
HOMOGENIZACIÓN DEL CRUDO	Se mezcla la harina cruda hasta obtener un material homogéneo para lo cual se utiliza aire comprimido. El sistema de homogenización consiste en dos silos, uno para la recepción del producto de la molienda y otro para la homogenización
CLINKERIZACIÓN	La harina cruda se trata en horno y se controla mediante un sistema automático que busca estabilizar la temperatura a un máximo de 1.450 °C para obtener una producción uniforme.

**Fuente:** (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)

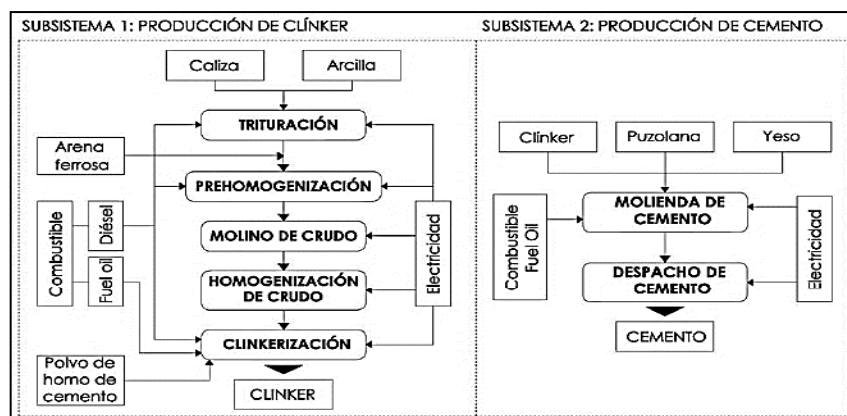
**Elaborado por:** Erika León

## PRODUCCIÓN DE CEMENTO:

Los procesos que intervienen en la producción de cemento son (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020):

- a) **Molienda de cemento:** inicia con el ingreso de los componentes del clinker, puzolana y yeso, para obtener finalmente el cemento.
- b) **Despacho de cemento:** se realiza normalmente en presentaciones de sacos de 50 kg.

En la Figura 2 se dará a conocer los procesos de producción de clinker y cemento:



**Figura 2.** Diagrama del proceso de producción del cemento

**Fuente:** (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)

## COMPOSICIÓN QUÍMICA GENERAL DEL CLÍNKER DEL CEMENTO PORTLAND

Las propiedades del cemento permiten conocer algunas las características bondadosas como material cementante, estas propiedades son químicas, físicas y mecánicas. Las propiedades químicas del cemento están relacionadas con los minerales formados en el proceso de clinkerización, que en esencia son cuatro y se procederán a describir a continuación en la Tabla 2. (Luna, 2014):

**Tabla 2.** Minerales formados en el proceso de clinkerización

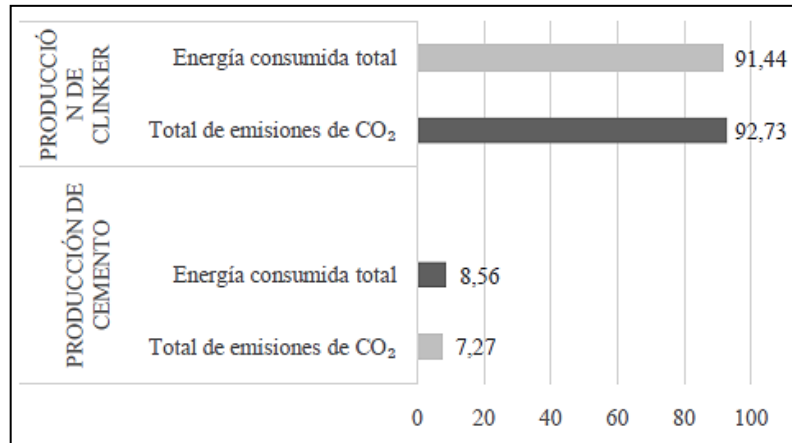
A) Los silicatos de calcio, tri C3S y dicálcicos C2S, son la parte principal del clínker del cemento portland, por lo general son un 75 a 85 % y, básicamente, son compuestos requeridos para las propiedades cementantes.
B) Los aluminatos y ferritos de calcio, representados por C3A, C4AF y C2F, se consideran componentes ineludibles y necesarios en la práctica, porque las materias primas siempre contienen un poco de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> . Por lo general, componen de un 10 a 20% del clínker.
C) Los óxidos libres de CaO y MgO suelen ser menos del 5% del clínker. En términos generales son componentes no requeridos, ya que indican una cocción insuficiente del clínker (CaO) o que son el resultado de un alto contenido de MgO en las materias primarias
D) Los sulfatos siempre están en cantidades de hasta un 3%, como resultado del azufre de las materias primas o del combustible transferido al clínker.

**Fuente:** (Luna, 2014)

**Elaborado por:** Erika León

## ENERGÍA Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN LA FABRICACIÓN DEL CEMENTO

Continuando con la investigación realizada por Ana León Vélez y Vanessa Guillén Mena, se observa que la para la producción de una tonelada de cemento se consume 3.191.95 MJ de energía y se emite 510.57 kg de CO<sub>2</sub>. Considerando el total de energía consumida en todo el sistema, el mayor consumo energético y producción de CO<sub>2</sub> se registra en la producción del clínker con el 91.44% y 92.73 % respetivamente, así como se muestra en la Figura 3 (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020).



**Figura 3.** Energía consumida total y emisiones de CO<sub>2</sub>

**Fuente:** (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)

En relación a lo descrito se observa en la Tabla 1 que el proceso de clinkerización representa la mayor cantidad de consumo energético y de emisiones de CO<sub>2</sub> con 2.918,87MJ y 473,47kg CO<sub>2</sub>. Por otro lado, en el proceso de realización del cemento se evidencia menor consumo energético y de emisiones de CO<sub>2</sub> con 273,08MJ y 37.10 Kg CO<sub>2</sub> (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020).

**Tabla 3.** Cuantificación del consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>

Subsistema	Procesos unitarios	Consumo de energía (MJ/t)	Emisiones de CO <sub>2</sub> (Kg CO <sub>2</sub> /t)
CLINKER	1. Trituración	24,48	2,89
	2. Prehomogenización	4,44	0,64
	3. Molino de Crudo	115,22	21,24
	4. Homogenización del crudo	24,14	4,45
	5. Clinkerización (combustible)	2750,59	215,27
	6. Clinkerización (proceso industrial)		228,98
	<b>Total, Subsistema 1</b>	<b>2918,87</b>	<b>473,47</b>
CEMENTO	1. Molienda de cemento	262,53	35,16
	2. Despacho de cemento	10,55	1,94
	<b>Total, Subsistema 2</b>	<b>273,08</b>	<b>37,1</b>
<b>TOTAL, DEL SISTEMA</b>		<b>3191,95</b>	<b>510,57</b>

**Fuente:** (León-Vélez & Guillén-Mena, 2020)

**Elaborado por:** Erika León

## CEMENTO TIPO I:

En Ecuador existen varios tipos de cemento en base a las normas técnicas ecuatorianas establecidas y reguladas, siendo el cemento Tipo 1 el que con mayor frecuencia se utiliza, este tipo de cemento corresponde a un cemento portland. El cemento portland se define como un cemento hidráulico producido por pulverización del clínter, siendo un cemento hidráulico cemento que fragua y endurece por reacción química con agua y es capaz de hacerlo aún bajo el agua. (NTE INEN 151, 2010).

Los requisitos para los cementos portland se establecen en la normativa NTE INEN 152 (2010) , mientras que los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos para aplicaciones generales y específicas se encuentra en la normativa NTE INEN 2380 (2011). La norma NTE INEN 152 (2010) define a diferentes tipos de cementos portland, descritos a continuación en la Tabla N°3:

**Tabla 4** Tipos de cementos portland

TIPOS DE CEMENTOS PORTLAND	DESCRIPCIÓN
TIPO I	Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas.
TIPO IA	Cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo I, donde se desea incorporación de aire
TIPO II	Para uso general, especialmente cuando se dese una moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación
TIPO IIA	Cemento con incorporación de aire para los mismos usos del Tipo II, donde se dese incorporación de aire
TIPO III	Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.
TIPO IIIA	Cemento con incorporación de aire para el mismo uso que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire
TIPO IV	Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación
TIPO V	Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos.

**Fuente:** NTE INEN 152 (2010)

**Elaborado por:** Erika León

## ARENA NORMALIZADA

La arena normalizada es arena de sílice, concertada en su mayoría de granos de cuarzo casi puro, redondeados naturalmente. La arena 20-30, es una arena predominantemente clasificada para pasar un tamiz N° 20 (850  $\mu\text{m}$ ) y ser retenida en un tamiz N° 30 (600  $\mu\text{m}$ ). La arena normalizada debe cumplir los requisitos de la Tabla 4. (ASTM C778, 2021)

**Tabla 5.** Requisitos para la arena normalizada (NTE INEN 873, 2017)

Características Gradación, porcentaje pasante del tamiz:	Arena 20-30
1,18 mm (N°16)	100
850 $\mu$ m (N°20)	85 a 100
600 $\mu$ m (N°30)	0 a 5
Diferencia en el contenido de aire en morteros elaborados con área lavada y sin lavar, % máx. de airea	2,0
Fuente de arena	Ottawa, IL o LeSuer, MN

**Fuente:** (NTE INEN 873, 2017)

**Elaborado por:** Erika León

## **AGUA NORMALIZADA**

El agua es uno de los elementos más importantes en la elaboración de morteros y hormigones. El agua es el encargado tanto de la activación de las propiedades cementantes para la mezcla en estado fresco, así como para el posterior curado en el estado endurecido. De acuerdo con Neville, el agua además de influir con la trabajabilidad y resistencia a la compresión, también influye en el fraguado, hidratación, retracción por secado, ingreso de sales, carbonatación, corrosión, entre otros. Por regla general, el agua con un pH de 6.0 a 8.0 o incluso de 9.0, que no tenga un sabor salobre, sustancias orgánicas y que no sea salina es adecuado para su uso. (Neville, 2011). Para la realización de los ensayos se utilizará agua potable del servicio público, como lo especifica la norma (NTE INEN 1108, 2020).

## **PUZOLANA**

Las puzolanas son materiales inorgánicos, naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminoso con pequeñas cantidades de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio que, por si solos, poseen poco o ningún valor cementante. Están conformadas por partículas finamente dividido y en presencia de agua, reaccionan químicamente con hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento y forman silicatos dicálcicos hidratados y aluminatos dicálcicos hidratados, encargados de la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las pastas, morteros y los hormigones. (Ramos, 2019).

La clasificación de las puzolanas según (ASTM C618, 2019) se muestra en la Tabla N° 3 descrita a continuación:



**Tabla 6.** Clasificación de puzolanas

Descripción	Clasificación
Puzolanas naturales crudas o calcinadas, tal como las diatomitas; tobas y cenizas volcánicas, calcinadas o sin calcinar para introducir propiedades satisfactorias	N
Ceniza volante que se produce por calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de cenizas volante poseen propiedades puzolánicas	F
Ceniza volante producida por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante, además de tener propiedades puzolánicas, también tienen algunas propiedades cementosas	C

**Fuente:** (ASTM C618, 2019)

**Elaborado por:** Erika León

## **CEMENTO PUZOLÁNICO**

Los cementos puzolánicos son cementos compuestos, que se usan en la construcción donde los cementos habituales no logran cumplir con requerimientos mínimos necesarios o establecidos por el diseño, como poder reducir el calor de hidratación, la porosidad o la plasticidad de las mezclas.

Las puzolanas en el cemento, en termino generales, presenta un efecto en la reducción del calor de hidratación debido a que tiene un porcentaje menor de los compuestos responsable de la elevación de la temperatura durante el tiempo de fraguado. Esto hace que se realice una menor formación de capilares y, como consecuencia, una mayor densidad y compacticidad. Asimismo, estas adiciones activas mejoran el desarrollo de resistencias a la compresión y aumento de la durabilidad de los morteros y concretos en general (Ramos, 2019).

## **EL CAOLÍN**

La mineral caolinita es uno de los materiales mayoritarios en los 10 primeros metros de la corteza continental. Comparte la clasificación en abundancia con minerales como micas, feldespato, cuarzo y calcita. Los términos «caolín» y «caolinita», derivan del término «Ka O Ling», localidad de un importante yacimiento chino de este material y cuyo significado es «alta montaña». Se podría definir como caolín a toda roca masiva con un porcentaje variable de minerales de la arcilla, de composición igual o próxima a la del mineral caolinita ( $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ ) (Bartolomé, 1997).

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente y la formula estructural es de  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$  como

anteriormente se planteó con una composición porcentual que responde a:  $\text{SiO}_2 = 46.53\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 39.49\%$  y  $\text{H}_2\text{O} = 13.98\%$  (Bartolomé, 1997).

Las principales propiedades físicas del caolín son:

**Tabla 7.** Principales propiedades físicas del caolín.

Color	Blanco, gris o amarillento
Aspecto	Untuoso al tacto
Brillo	Terroso mate o nacarado cuando es cristalino
Raya	Blanca
Densidad	2.40 – 2.64 g/cm <sup>3</sup>
Dureza (escala de Mohs)	2-2.5

**Fuente:** (Bartolomé, 1997)

**Elaborado por:** Erika León

## **METAKAOLIN, PRODUCCIÓN Y TRANSFORMACIONES TÉRMICAS**

El metakaolin es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, el cual es generado a partir del tratamiento térmico de la arcilla caolinita en un rango de temperatura de 500°C – 800°C. El calentamiento de la caolinita implica la eliminación del agua adsorbida a unos 100 °C y la deshidroxilación a más de 500 °C. La deshidroxilación de la caolinita ( $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_{10}$ ) da lugar a una fase denominada metakaolín ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Merma Suni & Churata Añasco, 2015).

El metakaolin no es cementoso por sí mismo, pero al tener un área superficial alta de uno 20 m<sup>2</sup>/g, reacción con hidróxidos de calcio, sodio y potasio, y yeso/cemento. Cuando MK se mezcla con cemento portland y se hidrata, la cal formada como producto de hidratación del cemento es consumida por MK y se forma el producto CSH. La adición de MK al cemento portland da como resultado una mayor resistencia a la compresión del producto. (Ramachandran et al., 2002)

El metakaolin empleado en las mezclas de morteros realizados en este trabajo de titulación es de clasificación N según la Norma (ASTM C618, 2019) descrito en la Tabla 5.

A continuación, en la Tabla N° 7 se mostrará los requisitos químicos de la normativa (ASTM C618, 2019) que debe cumplir el metakaolin.

**Tabla 8.** Requisitos Químicos (ASTM C618, 2019)

Requerimientos Químicos	CLASE N	CLASE F	CLASE
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ) más óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) más óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min, %	70.0	50.0	50.0
Óxido de calcio (CaO), %	Solo reportar	18.0 máx	> 18.0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ), máx., %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad, máx., %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición, máx., %	10.0	6.0	6.0

**Fuente:** (ASTM C618, 2019)

**Elaborado por:** Erika León

## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGÍA

#### TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo emplea una metodología de tipo experimental, dado que en su desarrollo se procederá a realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa del comportamiento que tiene los morteros al sustituir parcialmente el cemento con metakaolin al 10%, 15% y 20 %, para edades de 7, 28 y 56 días, lo cual dará información sobre la variación de la resistencia a compresión y su respectivo análisis en comparación con morteros patrones de cemento sin metakaolin.

La investigación se enfocará en ensayos de laboratorio con normativas regularizadas tanto en los elementos que componen el mortero de cemento, así como la muestra de mortero patrón y la muestra con metakaolin.

Este tipo de investigación también es aplicada porque en la actualidad se intenta alcanzar mayores resistencias con la sustitución del peso del cemento con aditivos puzolánicos como el metakaolin, y además contribuir a la disminución del CO<sub>2</sub> que se produce en la elaboración del cemento.

#### MATERIAS PRIMAS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Las materias primas utilizadas en esta investigación, fueron obtenidas por:

##### CEMENTO



**Figura 4.** Cemento Holcim Fuerte Tipo GU

**Fuente:** (Holcim, 2016)

El cemento es comercial y se compra en cualquier distribuidor de la empresa HOLCIM ECUADOR S.A. Las especificaciones técnicas del cemento entregadas por la empresa fabricante son las siguientes:

### REQUISITOS QUÍMICOS:

No se especifican requisitos químicos para los cementos por desempeño en la (NTE INEN 2380, 2011); sin embargo, los constituyentes individuales molidos y mezclados deben ser analizados durante la producción tal como se indica en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Requisitos Físicos

	INEN 2380	Holcim Ecuador
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.80	-0.06
Tiempo de Fraguado inicial, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	190
No más de, minutos	420	
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	A	3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	A	9
3 días	13	17
7 días	20	22
28 días	28	30
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0.020	0.002
A: límite no especificado por la NTE INEN 2380. Resultado reportado sólo como información.		

**Fuente:** (Holcim, 2016)

**Elaborado por:** Erika León

### ARCILLA COLINITA



**Figura 5.** Arcilla colinita

**Fuente:** Procomin

La arcilla caolinita a usarse en el proyecto de investigación fue adquirido en PROCAMIN LTDA en presentación de bultos de 25kg, con las siguientes propiedades físicas y químicas entregadas por la fabricante mostrada en la Tabla 10 y Tabla 11.

Análisis Químico (por Gravimetría compleximetría).

**Tabla 10.** Análisis químico

Nombre	Caolín
SiO <sub>2</sub>	56-63%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17-19.5%
MgO	1.5% máx.
CaO	3% máx.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.5% máx.
% TiO <sub>2</sub>	0.18%
pH	4.8-5.2

**Fuente:** Procomin

**Elaborado por:** Erika León

Propiedades Físicas:

**Tabla 11.** Propiedades físicas

Color	Crema-Amarillo
Humedad	2% máx.
Fineza Hegman (ASTM D-1210)	4
Retención en malla tyler 35	5% +/- 1.5
Tamaño medio de partícula	24 micras
Gravedad específica	2.52

**Fuente:** Procomin

**Elaborado por:** Erika León

## ARENA NORMALIZADA



**Figura 6.** Arena Normalizada 20 – 30

**Fuente:** Humboldt

Las propiedades del agregado fino utilizado en el presente proyecto están establecidas por U.S Silica Company, quien se encarga de dar la información técnica respectiva de la arena de sílice 20 – 30. La información de la granulometría del agregado se presenta en la Tabla 12, las propiedades básicas en la Tabla 13 y las propiedades químicas en la Tabla 14.

**Tabla 12.** Granulometría de la arena de sílice 20-30.

Tamiz		Valores Estándar		
		% Retenido		%Pasante
Nº	mm	Individual	Acumulado	Acumulado
16	1,18	0,00	0,00	100,00
20	0,85	1,00	1,00	99,00
30	0,60	97,00	98,00	2,00
Bandeja		2,00	100,00	0,00

**Fuente:** U.S. Silica Company, n.d.

**Elaborado por:** Erika León

**Tabla 13.** Propiedades básicas de la arena de sílice 20-30.

Ph:	7
Color:	Blanco
Mineral:	Cuarzo
Dureza (Mohs)	7
Punto de fusión (°F)	3100
Gravedad específica	2,65
Forma de la partícula	redondo

**Fuente:** U.S. Silica Company, n.d.

**Elaborado por:** Erika León

**Tabla 14.** Propiedades químicas de la arena de sílice 20-30.

Análisis Químico, %		
SiO <sub>2</sub>	óxido de silicio	99,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de hierro	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	óxido de aluminio	0,06
TiO <sub>2</sub>	óxido de titanio	0,01
CaO	óxido de calcio	<0,01
MgO	óxido de magnesio	<0,02
Na <sub>2</sub> O	óxido de sodio	<0,03
K <sub>2</sub> O	óxido de potasio	<0,04
LOI	Pérdida por ignición	0,1

**Fuente:** U.S. Silica Company, n.d.

**Elaborado por:** Erika León

## INSTALACIONES UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS

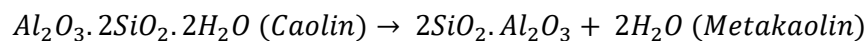
La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en las siguientes instalaciones:

- Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR), Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Escuela Politécnica Nacional.
- Centro de investigaciones y Control Ambiental (CICAM), Escuela Politécnica Nacional
- Laboratorio de Materia Condensada, Departamento de física, Escuela Politécnica Nacional

## ENSAYOS DE LABORATORIO

### TRATAMIENTO TÉRMICO – ARCILLA CAOLINITA

El metacaolín es un material aluminosilicato altamente activo que se forma por la deshidroxilación del caolín al calentar en un rango de temperatura de 500 a 800 °C. Durante el calentamiento, es esencial convertir el caolín no reactivo en metacaolín reactivo. Este proceso a menudo se conoce como calcinación y puede expresarse de forma simplificada de la siguiente manera (Kuliffayová et al., 2012):



El metacaolín proporciona la sílice y la alúmina reactivas que reacciona con el  $Ca(OH)_2$ , mientras que su actividad puzolánica depende el grado de deshidroxilación y acomodación o superficie disponible para la reacción. El proceso de deshidroxilación debe coincidir con la amortización, y esta transición se ve afectada por el tratamiento térmico (Tironi et al., 2012)



**Figura 7.** Metakaolin obtenido a 800 °C y 500 °C

**Elaborado por:** Erika Leon



## Materiales

- Arcilla caolinita

## Equipo empleado

- Balanza
- Bandejas metálicas
- Fundas ziploc
- Horno de Mufla FO610CR



**Figura 8.** Horno de Mufla F0610CR

**Elaborado por:** Erika Leon

## Procedimiento

- Colocar la bandeja metálica sobre la balanza, encerrar la balanza y colocar la arcilla colinita en la bandeja metálica, la bandeja metálica tiene que tener un punto de fusión mayor a la temperatura que se va a programar.
- Determinar el tiempo de exposición de la arcilla colinita en el horno de mufla con la siguiente ecuación:

$$T_e = \frac{T_f - T_i}{V_c}$$

**Ec. 1**

Donde:

- Te: Tiempo de exposición
- Ti: Temperatura inicial que se encuentra el horno en °C
- Tf: temperatura final en °C
- Vc: velocidad de calentamiento en °C/min
- Programar el horno de mufla, considerando el tiempo de exposición calculado y la temperatura final.
- Cuando el proceso termina, esperar a que el horno llegue nuevamente a temperatura ambiente, pesar nuevamente la arcilla y colocar la muestra en una funda ziploc.
- Para la determinación de la pérdida de peso por ignición realizar el siguiente calculo:

$$LOI = \frac{P_i - P_f}{P_i} * 100 \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- LOI: pérdida de peso por ignición
- Pi: peso inicial en gramos
- Pf: peso final en gramos

## **ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES CÚBICOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE METAKAOLIN**

### **CANTIDAD DE ESPECÍMENES**

La cantidad total de especímenes cúbicos es de 63, teniendo presente que para cada tratamiento térmico y porcentaje de sustitución de metakaolin se elaboran 3 cubos a edades de 7, 28 y 56 días como se presenta a continuación en la Tabla 15:

**Tabla 15.** Número de cubos a ensayar

Tratamiento Térmico	Porcentaje de metakaolín (%)	Ensayo a compresión			Número de especímenes
		7 días	28 días	56 días	
500 °C	10%	3	3	3	9
	15%	3	3	3	9
	20%	3	3	3	9
800 °C	10%	3	3	3	9
	15%	3	3	3	9
	20%	3	3	3	9
Patrones	0%	3	3	3	9
		Total			63

**Elaborado por:** Erika León

## DOSIFICACIÓN

Las cantidades para la elaboración de morteros de cemento Portland debe cumplir con la relación agua/cemento de 0.485 sin incorporación de aire, así como se especifica en la normativa vigente NTE INE 488; a continuación, en la Tabla N° 16 se mostrará los pesos para 3, 6 y 9 especímenes.

**Tabla 16.** Dosificación para morteros con Cemento Portland

Dosificación para Especímenes Cúbicos			
N° Cubos	3	6	9
Cemento, g	250	500	740
Arena, g	687,5	1375	2035
Agua, g	121	242	359

**Elaborado por:** Erika León

Para la elaboración de morteros de cemento portland con sustitución parcial de metakaolín se utilizará las cantidades descritas en la Tabla 17, tener presente que estas cantidades son para la elaboración de 9 especímenes, que es lo que se realizó en el presente trabajo.

**Tabla 17.** Dosificación para la elaboración de 9 especímenes con metakaolín

Dosificación para Especímenes Cúbicos con Metakaolín			
Número de especímenes	9	9	9
Porcentaje de metakaolín (%)	10%	15%	20%
Cemento, g	666	629	592
Metakaolín, g	74	111	148
Arena, g	2035	2035	2035
Agua, g	359	359	359

**Elaborado por:** Erika León

## PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

El proceso para la preparación de la mezcla se lo realizara en base a lo establecido en la normativa vigente (NTE INEN 155, 2009), que especifica lo siguiente:

### Materiales

- Arena normalizada
- Cemento Tipo I
- Agua
- Metakaolin

### Equipos

- Mezcladora CONTROLS
- Paleta
- Tazón de mezclado
- Espátula
- Balanza



**Figura 9.** Mezcladora de Mortero Digital  
**Elaborado por:** Erika Leon

## **Procedimiento**

- Colocar la paleta seca y el tazón seco en mezcladora
- Colocar toda el agua de la mezcla en el tazón y agregar cemento; si se va a realizar con sustitución parcial de metakaolin, colocar el metakaolin conjuntamente con el cemento.
- Encender la mezcladora a una velocidad lenta ( $140 \pm 5$  r/min) durante 30 segundos, agregar la arena normalizada durante otros 30 segundos a la misma velocidad y cambiar la una velocidad media ( $285 \pm 10$  r/min) durante 30 segundos.
- Después que termine el proceso anterior, la mezcladora se detendrá durante 90 segundos, de los cuales, los primeros 15 segundos se tendrá que empujar rápidamente con la espátula hacia abajo todo el mortero que pueda haberse adherido a los lados del tazón.
- Finalmente, mezclar durante 60 segundos a una velocidad media ( $285 \pm 10$  r/min).

## **DETERMINACION DEL FLUJO**

El proceso para la determinación del flujo en morteros se lo realizara en base a lo establecido en la normativa vigente (NTE INEN 2502, 2009), que especifica lo siguiente:

### **Materiales**

- Mezcla de mortero previamente preparada

### **Equipo:**

- Mesa Flujo
- Molde Cónico



**Figura 10.** Mesa de flujo y molde cónico

**Elaborado por:** Erika Leon

- Calibrador
- Apisonador manual para la determinación de flujo
- Espátula

**Procedimiento:**

- Limpiar y secar la mesa de flujo con una franela húmeda y colocar el molde cónico en el centro.
- Colocar en el molde cónico una capa de mortero de 25 mm de espesor y compactar 20 veces con el apisonador.
- Colocar nuevamente la segunda capa de mortero hasta llenar el molde cónico por completo y compactar como se especificó en la primera capa, enrasar con la espátula y limpiar alrededor del molde y la mesa de flujo para finalmente después de un minuto de haber terminado, levantar el molde.
- Inmediatamente, dejar caer la mesa 25 veces en un tiempo de 15 segundos, para subsiguientemente con el calibrador medir al menos cuatro diámetros y determinar el porcentaje de flujo.

## Cálculos

$$\%f = \frac{D_f - D_i}{D_i} \times 100$$

**Ec. 3**

Donde:

Di: diámetro inicial de la base del molde

Df: promedio de al menos cuatro mediciones del diámetro final

%f: porcentaje del flujo, valor entre 105% y 115%

## PREPARACIÓN DE LOS CUBOS

### Materiales

- Mezcla de mortero previamente preparada

### Equipo

- Moldes para especímenes cúbicos: las muestras cúbicas deben tener una medida de 50 mm, deben ser de ajuste perfecto, no deben tener más de 3 compartimentos y no deben ser separables en más de dos partes, tal como se muestran en la Figura N° 11



**Figura 11.** Molde de 3 compartimentos

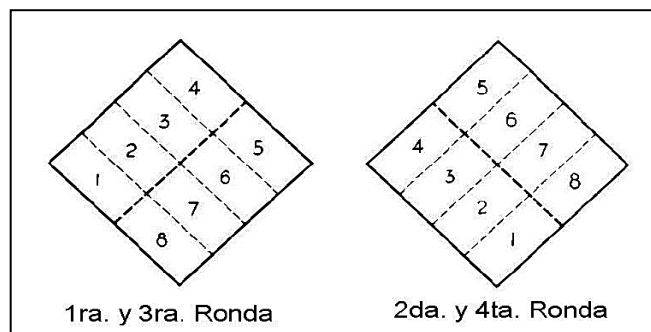
**Elaborado por:** Erika Leon

- Apisonador manual para la elaboración de cubos
- Espátula

## Procedimiento

Este proceso debe comenzar dentro de un intervalo de tiempo no mayor de 2.5 minutos después de completar el mezclado original; hay que tener presente que los moldes cúbicos deben estar previamente aceitados y se deberá seguir los pasos que se explicaran a continuación:

- Colocar una capa de alrededor de 25 mm de altura en los 3 compartimentos y apisonar el mortero en cada compartimento 32 veces en alrededor de 10 segundos, en 4 rondas, en cada ronda se debe compactar con 8 golpes, en dirección perpendicular a la anterior, así como se observa en la Figura 7



**Figura 12.** Orden de apisonado para moldes cúbicos

**Fuente:** (NTE INEN 488, 2009)

- Una vez terminada la compactación de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos, se debe llenar por completo cada uno nuevamente con mortero y repetir el proceso de apisonamiento.
- Enrasar cada molde cubico utilizando una sola vez la parte plana de la espátula en dirección perpendicular con el largo del molde, para finalmente enrasar de la misma manera, pero en dirección contraria, es decir, siguiendo el largo del molde.
- Colocar los especímenes en una cámara húmeda durante 24 horas, luego desmoldar y ubicarlos dentro de una piscina de curado en agua saturada con cal hasta que cumpla con las edades especificadas.



## DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La resistencia a compresión se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto. Normalmente se expresa en kilogramos por centímetros cuadrados ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) o megapascales (MPa) a una edad de 28 días. (Kosmatka et al., 2002).

El proceso para la determinación de la resistencia a compresión en morteros se lo realizara en base a lo establecido en la normativa vigente (NTE INEN 488, 2009), que especifica lo siguiente:

### Materiales:

- 3 especímenes cúbicos a la edad especificada para cada ensayo

### Equipos:

- Máquina de compresión CONTROLS UTM 200kN



**Figura 13.** Máquina de compresión

**Elaborado por:** Erika Leon

- Calibrador
- Balanza

**Procedimiento:**

- Ensayar los especímenes cúbicos inmediatamente después de que se hayan sacado de la cámara húmeda, considerando que para edad determinada se tiene siguientes tolerancias admisibles mostradas en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Tolerancia Admisible para la edad de ensayo de Cubos

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

**Elaborado por:** Erika Leon

- Secar la muestra hasta tener una superficie seca conjuntamente con la eliminación de los granos sueltos u otras incrustaciones de la superficie, después medir una de las caras que estaban en contacto con las superficies planas del molde, medir su altura y finalmente pesar la muestra.
- Colocar en el centro de la placa el espécimen a ensayar de manera que la carga se aplique en las dos caras planas del cubo previamente medidas, programar la maquina a compresión a una velocidad de 900 N/s y registrar la carga total máxima indicada.

**Cálculos:**

La resistencia a la compresión de morteros se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

fm: resistencia a compresión en MPa

P: Carga total máxima de la falla, en N

A: Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga, en mm<sup>2</sup>

## **INTERRUPCIÓN DE LA HIDRATACIÓN DE MORTERO**

EL proceso para la interrupción de la hidratación de morteros se lo realizará en base a una recomendación realizada por un grupo de trabajo dentro del comité técnico 238-SCM de la RILEM “Materiales Cementosos Suplementarios”, el cual se describirá a continuación:

### **PREPARACIÓN DE LA MUESTRA**

#### **Materiales:**

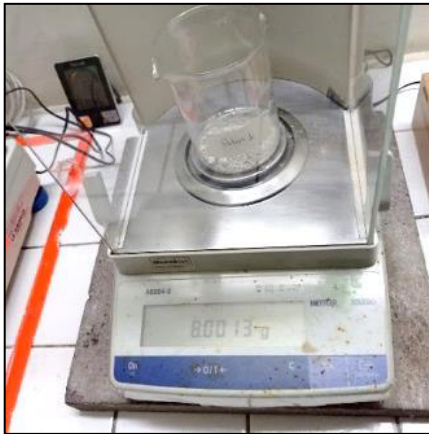
- Especímenes cúbicos obtenidos después de la realización del ensayo a compresión.
- Base metálica
- Mazo metálico
- Vaso de precipitación
- Bandeja utilizada por granulometría
- Tamiz N°200

#### **Equipo:**

- Balanza

#### **Proceso:**

- Limpiar y secar la base metálica y el mazo metálico para que no exista ningún otro tipo de residuos o adherencias.
- Colocar la muestra obtenida después del ensayo a compresión encima de la base metálica, triturar la muestra con ayuda del mazo y colocar dentro del tamiz N°200; tomar en cuenta que se debe retirar los bordes superficiales de la muestra y utilizar solamente el núcleo
- Colocar el vaso de precipitación sobre la balanza para posteriormente encerar y pesar 8 gramos de muestra que encuentra en la bandeja; en total se tendrán dos recipientes con un total de 16 gramos.



**Figura 14.** Muestra de 8 gramos en el vaso de precipitación.

**Elaborado por:** Erika Leon

## **INTERRUPCIÓN DE LA HIDRATACIÓN**

### **Materiales:**

- Muestra triturada de 8 gramos en cada recipiente
- Papel filtro
- Filtro Büchner
- Matraz
- Éter dietílico
- Isopropanol
- Vidrio de reloj
- Mascarilla para gases

### **Equipo:**

- Campana extractora
- Balanza
- Horno

### Proceso:

- Instalar el filtro Büchner y el matraz debajo de una campana extractora
- Colocar el papel filtro vertiendo un poco de isopropanol para fijar adecuadamente sobre el filtro Büchner
- Sumergir 8 gramos de la muestra triturada en 20 ml de isopropanol por 15 min, después del tiempo establecido, agitar la solución y verterla suavemente sobre el filtro.
- Esperar que se filtre la mayor cantidad de isopropanol para luego enjuagar el residuo usando otros 10 ml de isopropanol y finalmente enjuagar el recipiente con 10 ml de éter dietílico.
- Cuando se termine de filtrar en su totalidad, colocar el papel filtro en un vidrio de reloj y séquelo durante  $8 \text{ min} \pm 30 \text{ segundos}$  a  $40^{\circ}\text{C}$ , después colocar en un desecador los frascos con un agujero en la tapa superior previamente realizado hasta el día que se mande hacer la difracción de rayos X.



**Figura 15.** Interrupción de la Hidratación

**Elaborado por:** Erika Leon



**Figura 16.** Desecador de muestras

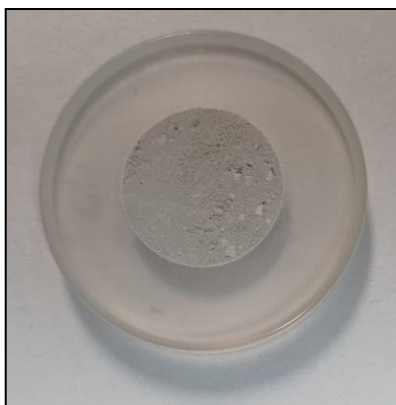
**Elaborado por:** Erika Leon

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La técnica de Difracción de Rayos X permite determinar la estructura cristalina y mineralógica de los compuestos presentes en cada muestra.

### Materiales:

- Portamuestra estándar: Bruker (C79298A3244D82/D84), material PMMA, 8.5 mm altura, recepción de la muestra Ø 25 mm



**Figura 17.** Portamuestra circular

**Elaborado por:** Erika Leon

- Muestra obtenida después del proceso de interrupción de hidratación
- Cucharilla química con terminal en espátula
- Portaobjetos

### Equipos:

- Equipo Bruker D2 Phaser con detector LYNXEYE XE-T (1D-mode)

Características:

Fuente de rayos X: tubo de Cu (1.54184 Å) radiación  $K\alpha$ , 30kV, 10mA.

Rendija de divergencia (divergence slit): 1.00 mm

Pantalla de dispersión de aire (airscatter screen): 1.00 mm



**Figura 18.** Equipo de Difracción de Rayos X

**Elaborado por:** Erika Leon

**Proceso:**

- Colocar la muestra con la cucharilla de forma cuidadosa sobre el portamuestra estándar circular hasta llenarlo en su totalidad, para posteriormente con la espátula de la cuchara enrasar la parte superior de forma homogénea.
- Después, colocar el portaobjetos sobre el área circular del portamuestra y aplastar con él con dedo índice durante unos segundos, finalmente retirar el portaobjetos y colocar la muestra dentro del equipo de difracción de rayos x
- El equipo de Difracción de Rayos X se debe ingresar con las siguientes características
  - $2\theta = 10^\circ - 50^\circ$ , incremento  $0.02^\circ$
  - Tiempo por paso: 0.25 s/paso
  - Apertura del detector (PSD Opening):  $5^\circ$
  - Sin rotación de la muestra durante la adquisición del difractograma.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

El análisis de los resultados de los diferentes tipos de morteros para la determinación de la resistencia a compresión permite validar la metodología y los resultados obtenidos, determinando la relación óptima entre el porcentaje de metakaolin y cemento.

### RESULTADOS DEL MORTERO PATRÓN

#### FLUJO DEL MORTERO PATRÓN

Se determinó el flujo del mortero patrón con cemento Tipo I tal como se lo indica en la Tabla N° 19, dando como resultado 105.6%, lo cual está dentro del rango establecido en la normativa NTE INEN 488 para la determinación de la resistencia a compresión

**Tabla 19.** Determinación del flujo en el mortero patrón con cemento Tipo I

DETERMINACIÓN DEL FLUJO		
D INICIAL	100	mm
DF PROMEDIO	205.58	mm
%	105.6	

**Elaborado por:** Erika Leon

#### RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se calcularon los promedios de las diferentes resistencias de los morteros patrones a edades de 7, 28 y 56 días, para posterior realizar las curvas de edad (días) vs la resistencia a compresión (MPa) de los morteros con metakaolin (curva de endurecimiento).

**Tabla 20.** Resistencia a compresión del mortero patrón con cemento Tipo I

ESPECIMEN	RESISTENCIA A LA COMPRESION MPA		
	7 días	28 días	56 días
PATRON	20.9	31.3	38.2

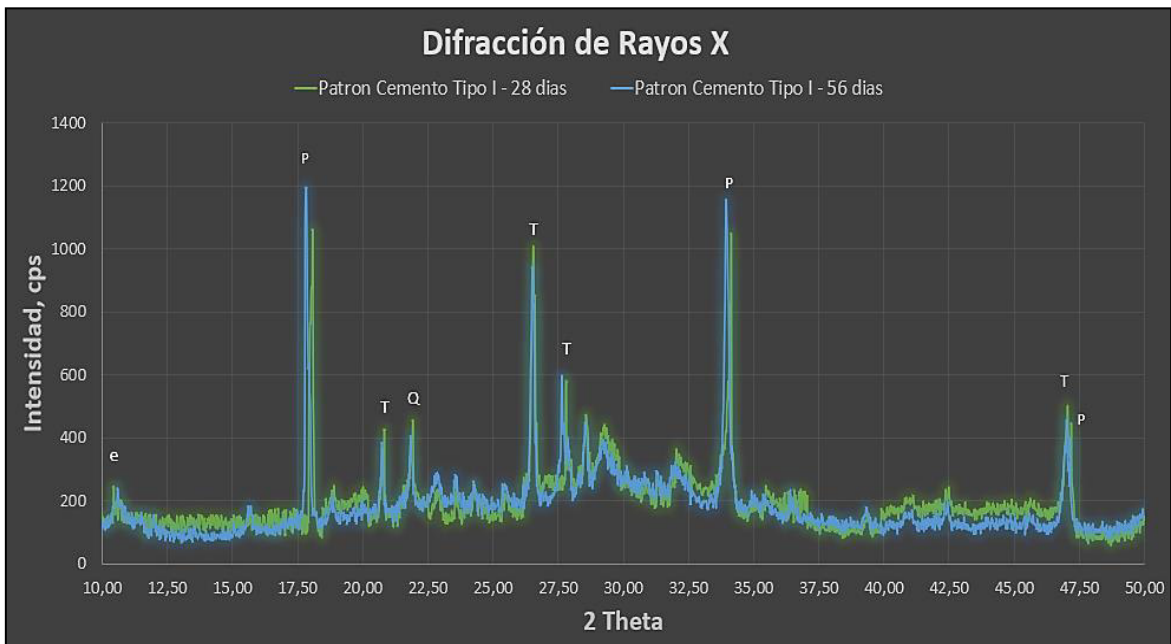
**Elaborado por:** Erika Leon

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MORTEROS PATRONES A EDADES DE 28 Y 56 DÍAS

En la figura 19 se observa la Difracción de Rayos X a edades de hidratación de 28 y 56 días de los morteros patrones con cemento Tipo 1. A continuación lo que se puede destacar es que a la edad de 56 días los valores de intensidad de la Portlandita aumentan en su



intensidad, mientras que a la edad de 56 días tanto la tobermorite, etringita y Cuarzo disminuye ligeramente su intensidad.



**Figura 19.** Difracción de Rayos X para el cemento Tipo I a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo]

Elaborado por: Erika Leon

## RESULTADOS DE MORTEROS CON METAKAOLIN A 500°C

### FLUJO DE LOS MORTEROS CON METAKAOLIN A 500°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20%

Se determinó el flujo del mortero con metakaolin a 500°C con una sustitución parcial del 10%, 15% y 20% del cemento tal como se muestra en la Tabla N°21, los cuales dieron valores inferiores a los establecidos por la normativa NTE INEN 488, dando a conocer que la cantidad de agua para la dosificación planteada no fue la adecuada para una completa hidratación de la mezcla.

**Tabla 21.** Determinación del flujo en morteros con metakaolin a 500°C

ESPECIMEN	Determinación del flujo		
	D inicial (mm)	Df promedio (mm)	%
MK10% - 500°C	100	195,63	95,6
MK15% - 500°C	100	195,15	95,2
MK20% - 500°C	100	190,75	90,8

Elaborado por: Erika Leon

## PÉRDIDA DE PESO POR IGNICIÓN

La pérdida por ignición de la muestra de la arcilla colinita tratada térmicamente a una temperatura de 500°C fue de 8.3% tal como se muestra en la Tabla N° 22, y está dentro del rango según las especificaciones de la categoría de puzolanas naturales tratadas térmicamente que se observa en la Tabla 8.

**Tabla 22.** Pérdida de peso por ignición de metakaolin a 500°C

Metakaolin a 500 °C	Pérdida de peso por ignición		Promedio
	8,2	%	8,3
	8,6		
	9,4		
	7,2		

Elaborado por: Erika Leon

## RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

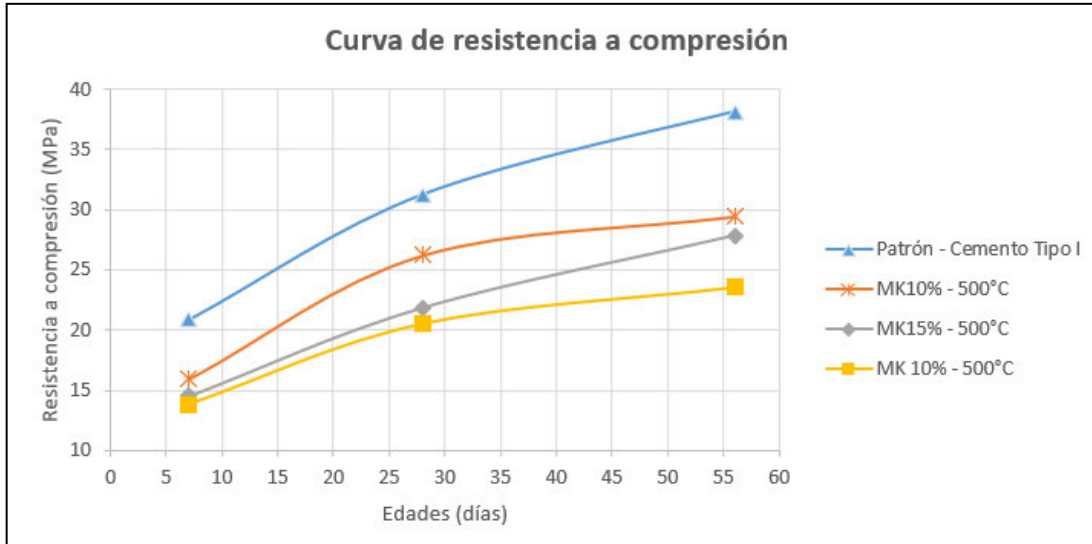
La resistencia a compresión de morteros con sustitución parcial del cemento con metakaolin a 500°C a edades de 7, 28 y 56 días son los que se muestran en la Tabla 23.

**Tabla 23.** Resistencia a la compresión de morteros con Metakaolin a 500°C

ESPECIMEN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPA		
	7	28	56
PATRON	20,9	31,3	38,2
MK 10%	16,0	26,2	29,4
MK 15%	14,5	21,9	27,9
MK 20%	13,9	20,5	23,6

Elaborado por: Erika Leon

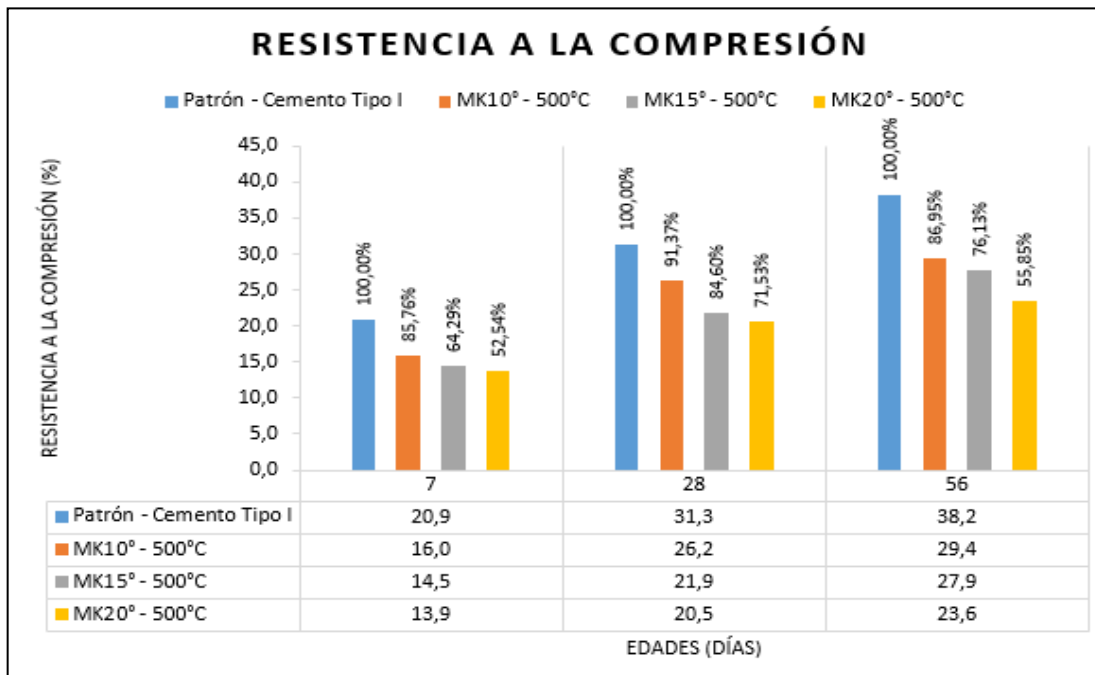
A continuación, en la Figura 20 se muestra un resumen del comportamiento del metakaolin a 500°C con los diferentes porcentajes de sustitución haciendo referencia a la variación de la resistencia a compresión a lo largo del tiempo. Como se puede observar ninguno de los diseños planteados superan a la resistencia del mortero patrón, aunque el diseño de MK10%-500°C a los 28 días llega a tener 26.2 MPa que es un 94% aproximadamente del valor referencial de 28 MPa que da la normativa (ASTM C1157, 2020) de la resistencia a compresión a los 28 días.



**Figura 20.** Curva de resistencia a compresión con metakaolin a 500°C

**Elaborado por:** Erika Leon

En la Figura 21 se puede observar los porcentajes referente a la resistencia del mortero patrón, dando a conocer que el diseño que se acerca más a la resistencia del mortero patrón es el diseño MK10% - 500°C.



**Figura 21.** Resistencia a compresión con metakaolin a 500°C

**Elaborado por:** Erika Leon

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 500°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20%

Conforme a los resultados obtenidos de la resistencia a compresión del metakaolin a 500 °C con sustitución parcial del 10, 15 y 20%, se procedió a no realizar el ensayo de Difracción de Rayos X por el motivo de que los resultados no fueron satisfactorios, ni relevantes para su respectivo análisis, el enfoque se dará para el metakaolin a 800°C.

## RESULTADOS DE MORTEROS CON METAKAOLIN A 800°C

### FLUJO DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 800°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20%

Se determino el flujo del mortero con metakaolin a 800°C con una sustitución parcial del 10%, 15% y 20% del cemento tal como se muestra en la Tabla N°24, los cuales dieron valores inferiores a los establecidos por la normativa NTE INEN 488, dando a conocer que la cantidad de agua para la dosificación planteada no fue la adecuada para una completa hidratación de la mezcla.

**Tabla 24** Determinación del Flujo en morteros con metakaolin a 800°C

ESPECIMEN	Determinacion del flujo		
	D inicial (mm)	Df promedio (mm)	%
MK10% - 800°C	100	200,85	100,9
MK15% - 800°C	100	196,20	96,2
MK20% - 800°C	100	183,38	83,4

**Elaborado por:** Erika Leon

### PÉRDIDA DE PESO POR IGNICIÓN

La pérdida por ignición de la muestra de la arcilla colinita tratada térmicamente a una temperatura de 800°C fue de 9.7% tal como se muestra en la Tabla N° 25, y está dentro del rango según las especificaciones de la categoría de puzolanas naturales tratadas térmicamente que se observa en la Tabla N° 6.

**Tabla 25.** Pérdida de peso por ignición de metakaolin a 800°C

Metakaolin a 800 °C	Pérdida de peso por ignición		Promedio
		%	
	9,2	%	9,7
	9,7		
	9,8		
	10,3		

**Elaborado por:** Erika Leon

## RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

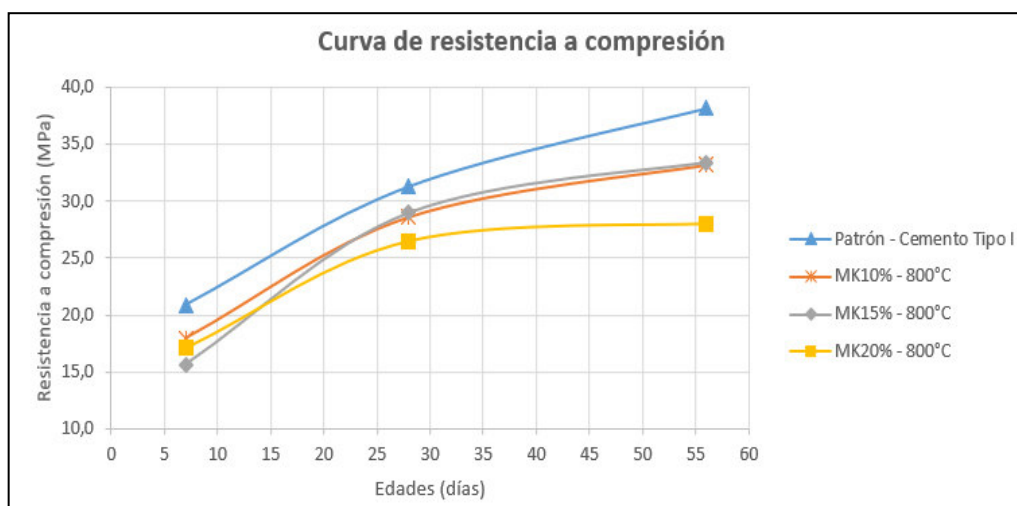
Se presenta a continuación un resumen de los resultados de la resistencia a compresión de morteros con sustitución parcial del 10%, 15% y 20% de metakaolin a 800°C a edades de 7, 28 y 56 días, en la Tabla N° 26.

**Tabla 26.** Resistencia a la compresión de morteros con Metakaolin a 800°C

ESPECIMEN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPA		
	7 días	28 días	56 días
<b>PATRON</b>	20,9	31,3	38,2
<b>MK 10%</b>	17,9	28,6	33,2
<b>MK 15%</b>	15,7	29,0	33,4
<b>MK 20%</b>	17,1	26,5	28,0

**Elaborado por:** Erika Leon

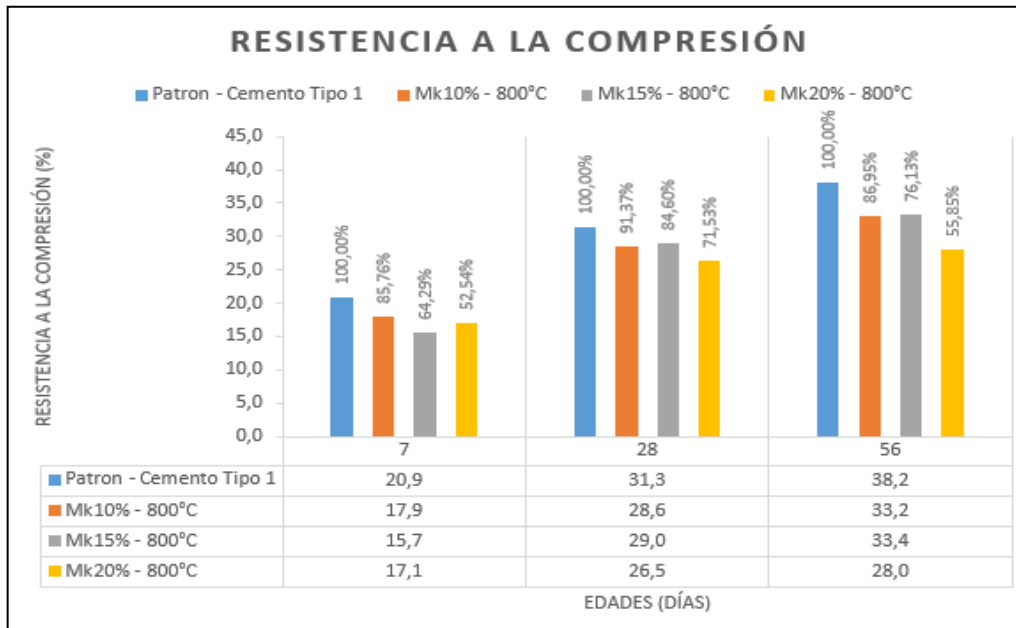
A continuación, en la Figura 22 se muestra un resumen del comportamiento del metakaolin a 800 °C con los diferentes porcentajes de sustitución haciendo referencia a la variación de la resistencia a compresión a lo largo del tiempo. Como se puede observar ninguno de los diseños planteados superan a la resistencia del mortero patrón, aunque los diseños MK10% - 800°C y MK20% - 800°C a los 28 días llegan a tener una resistencia mayor de 28 MPa que da la normativa (ASTM C1157, 2020).



**Figura 22.** Curva de resistencia a compresión con metakaolin a 800°C

**Elaborado por:** Erika Leon

En la Figura 23 se puede observar los porcentajes referente a la resistencia del mortero patrón, dando a conocer que el diseño que se acerca más a la resistencia del mortero patrón es el diseño MK10% - 500°C.

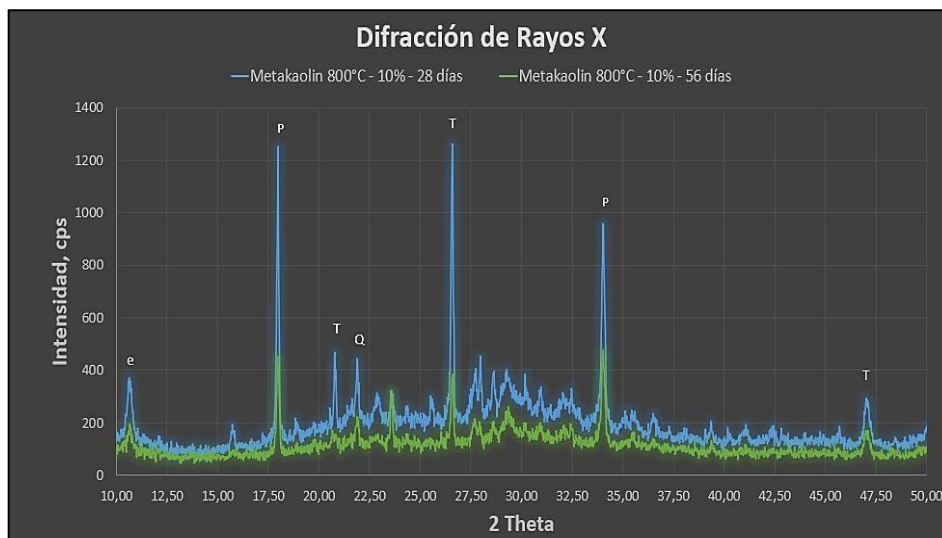


**Figura 23.** Resistencia a compresión con metakaolin a 800°C

**Elaborado por:** Erika Leon

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE LOS MOTEROS CON METAKAOLIN A 800°C CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE 10, 15 Y 20%

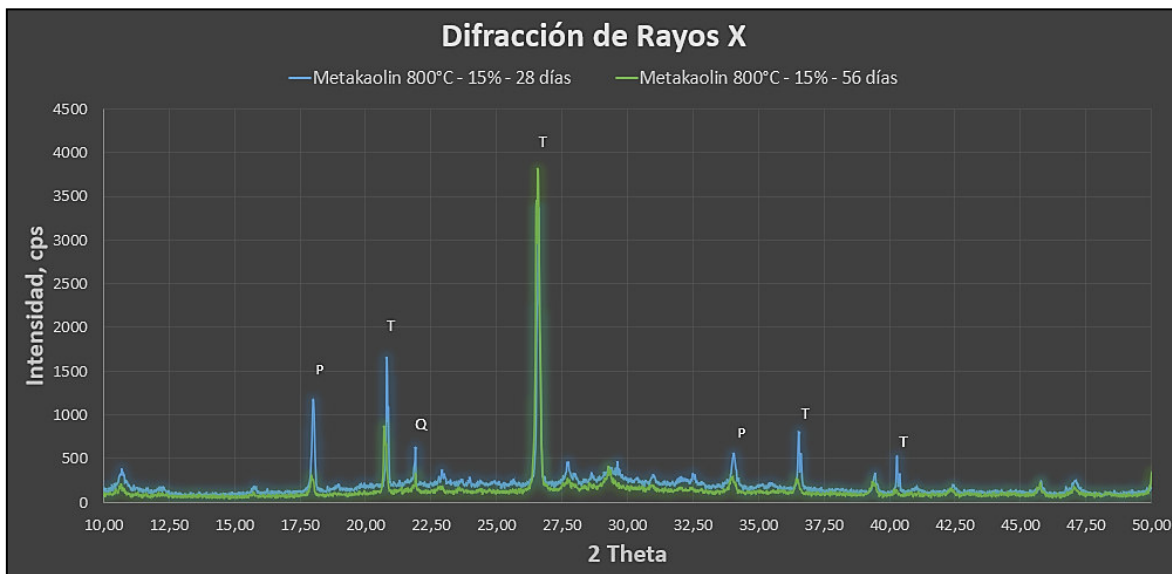
### SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL 10%



**Figura 24.** Difracción de Rayos X para el metakaolin 800°C con el 10% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo]

**Elaborado por:** Erika Leon

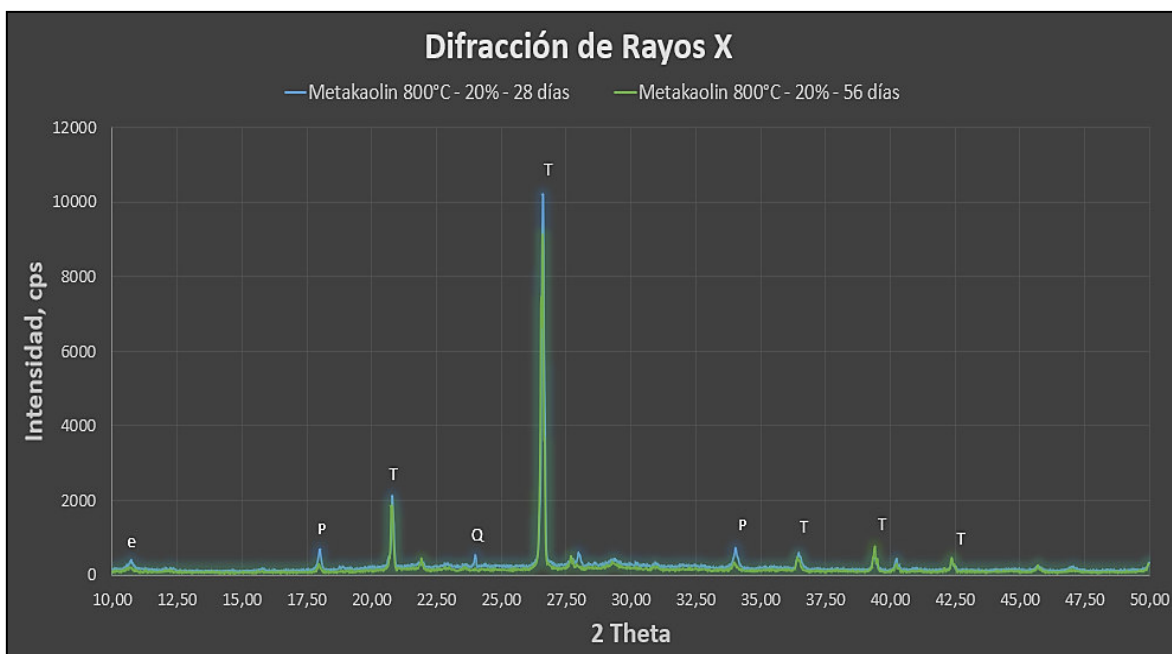
## SUSTITUCIÓN PARCIAL 15%



**Figura 25.** Difracción de Rayos X para el matakaolin 800°C con el 15% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo]

**Elaborado por:** Erika Leon

## SUSTITUCIÓN PARCIAL 20%



**Figura 26.** Difracción de Rayos X para el matakaolin 800°C con el 20% a edades de 28 y 56 días. [e: etringita, P: portlandita, T: tobermorita, Q: Cuarzo]

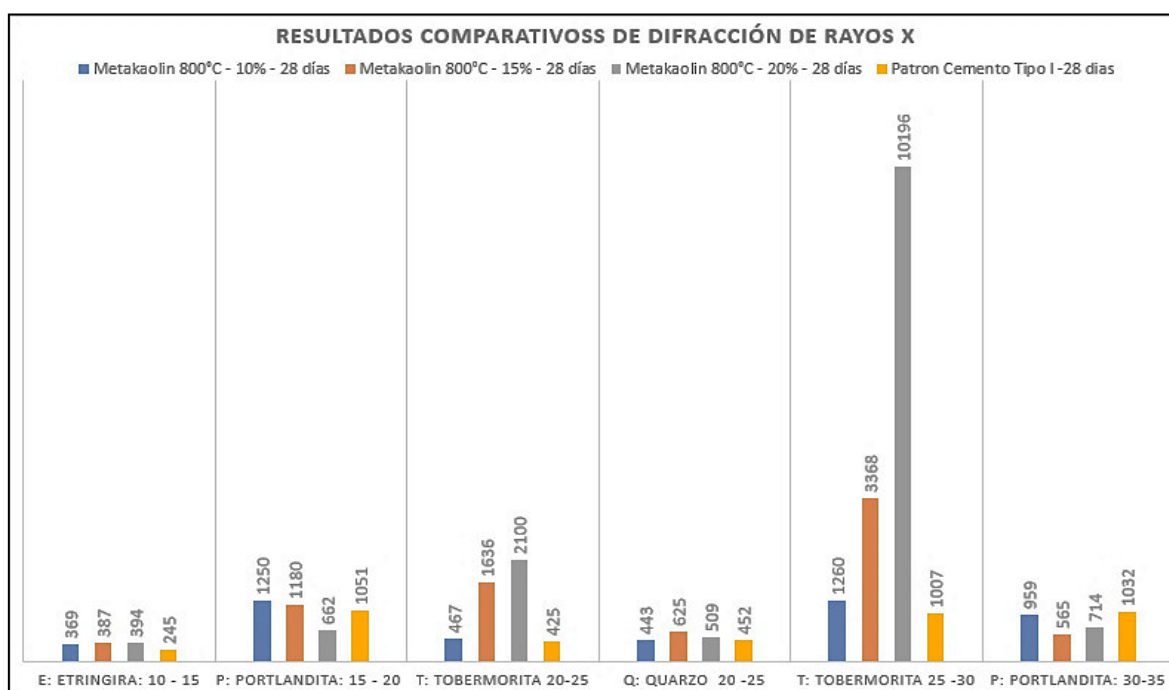
**Elaborado por:** Erika Leon

## RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A EDAD DE 28 DÍAS

**Tabla 27.** Resultados de difracción de rayos X a edad de 28 días

Compuesto	Metakaolin 800°C - 10% - 28 días	Metakaolin 800°C - 15% - 28 días	Metakaolin 800°C - 20% - 28 días	Patrón Cemento Tipo I -28 días
e: etringita: 10 - 15	369	387	394	245
P: portlandita: 15 - 20	1250	1180	662	1051
T: tobermorita 20-25	467	1636	2100	425
Q: Cuarzo 20 -25	443	625	509	452
T: tobermorita 25 -30	1260	3368	10196	1007
P: portlandita: 30-35	959	565	714	1032

Elaborado por: Erika Leon



**Figura 27.** Resultados comparativos de los ensayos de Difracción de Rayos X a 28 días

Elaborado por: Erika Leon

En la Tabla 27 se observa los valores obtenidos en la Difracción de Rayos X para la edad de 28 días del patrón y para los valores de sustitución del 10,15 y 20%. En primer lugar, se evidencia que los valores de la etringita aumentan hasta llegar a una intensidad de 400 cps según va aumenta el porcentaje de sustitución del metakaolin a 800°C, además se puede observar que el valor de la etringita del cemento es inferior a todos los valores obtenidos. Esta misma tendencia tienen la tobermorita.



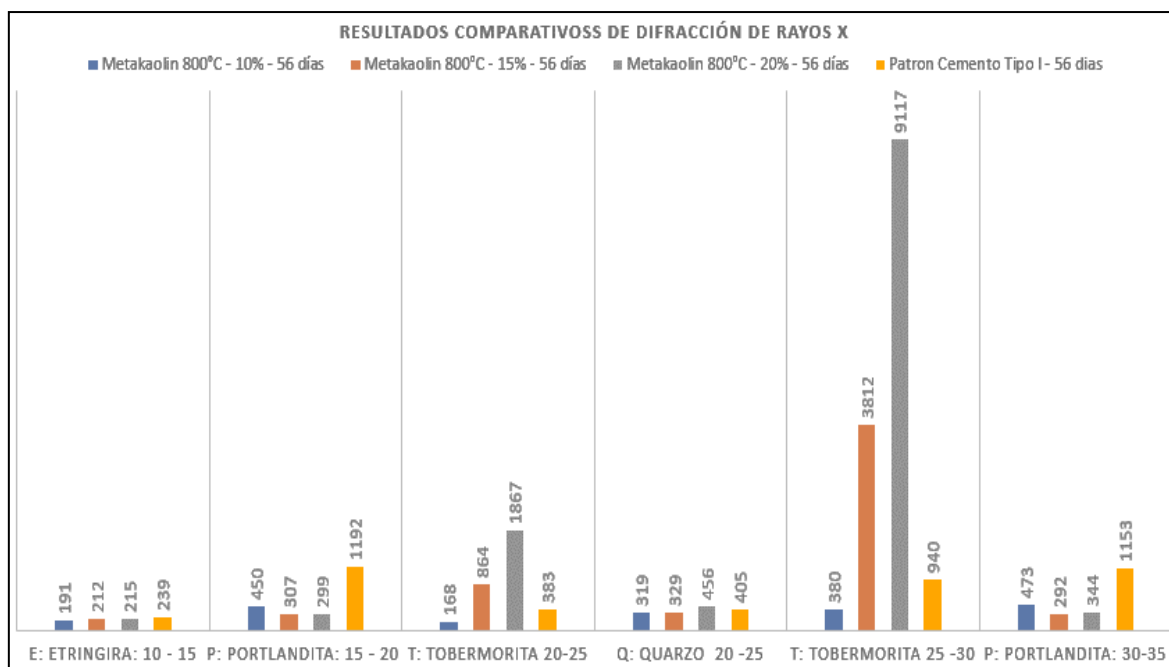
Por otro lado, la Portlandita va disminuyendo conforme el porcentaje de sustitución aumenta, pasando de 1250 cps para el 10% de sustitución a 662 cps con el 20% de sustitución, sin embargo, se evidencia que para el patrón la intensidad es de 1051 cps.

## RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X A EDAD DE 56 DÍAS

**Tabla 28.** Resultados de difracción de rayos X a edad de 56 días

Compuesto	Metakaolin 800°C - 10% - 56 días	Metakaolin 800°C - 15% - 56 días	Metakaolin 800°C - 20% - 56 días	Patrón Cemento Tipo I - 56 días
e: etringita: 10 - 15	191	212	215	239
P: portlandita: 15 - 20	450	307	299	1192
T: tobermorita 20-25	168	864	1867	383
Q: cuarzo 20 -25	319	329	456	405
T: tobermorita 25 -30	380	3812	9117	940
P: portlandita: 30-35	473	292	344	1153

Elaborado por: Erika Leon



**Figura 28.** Resultados comparativos de los ensayos de Difracción de Rayos X a 28 días

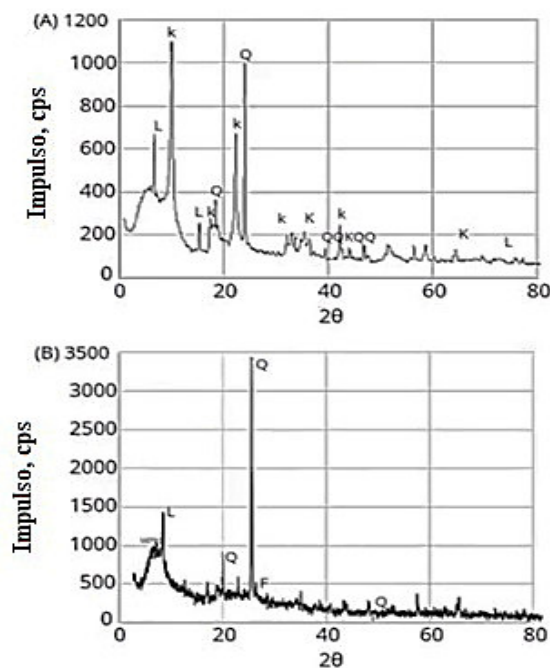
Elaborado por: Erika Leon

En la Tabla 28 se observa los valores obtenidos en la Difracción de Rayos X para la edad de 56 días del patrón y para los valores de sustitución del 10,15 y 20%. En primer lugar, se evidencia que los valores de la etringita aumentan hasta llegar a una intensidad de 2015 cps según va aumenta el porcentaje de sustitución del metakaolin a 800°C, además se puede observar que el valor de la etringita del cemento es mayor a todos los valores

obtenidos. Este mismo comportamiento tiene la tobermorita, con la única diferencia que el patrón su valor esta entre los rangos de sustitución del 10 y 15%.

Por otro lado, la Portlandita va disminuyendo conforme el porcentaje de sustitución aumenta, pasando de 450 cps para el 10% de sustitución a 299 cps con el 20% de sustitución, sin embargo, se evidencia que para el patrón la intensidad es de 1192 cps.

## DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ARCILLA CAOLINITA Y METAKAOLIN



**Figura 29.** Resultados de Difracción de Rayos X de la arcilla caolinita y del metakaolin tratado a los 800°C, [K: caolinita, F: feldespato, Q: Cuarzo, L: mica]

**Elaborado por:** Erika Leon

En la Figura 29.A se puede observar que los mayores picos de intensidad presentes en la arcilla caolinita contiene esencialmente Cuarzo, Mica y Caolinita, siendo estos compuestos transformados térmicamente a 800°C para obtener principalmente Cuarzo, Mica y Feldespato, que son compuestos requeridos para una adecuada hidratación al momento de la realización de los morteros con cemento tal como se observa en la Figura 29.B.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES

- En el ensayo de compresión de cubos de mortero, se evidencia la correcta aplicación de la normativa NTE INEN 488 en la elaboración de morteros con cemento Tipo I; Las resistencias alcanzadas a 7, 28 y 56 días fueron de 20.9, 31.3 y 38.2 MPa respectivamente, que en comparación con las especificaciones definidas en la norma ASTM 1157-20, cumple con la resistencia mínima a compresión de 20 MPa a 7 días y 28 MPa a 28 días. Sin embargo, los cubos con presencia de metakaolin a 500°C no alcanzaron la resistencia a los 7 días ni a los 28 días en ningún porcentaje de sustitución. Por otro lado, se observó que los resultados de resistencia a compresión de los cubos con presencia de metakaolin a 800°C alcanzaron resistencias superiores a 28 MPa a los 28 días en el porcentaje de sustitución del 10 y 15%, siendo este un diseño de partida óptimo y satisfactorio.
- En la Tabla 22 y 25, se observó que la pérdida por ignición de la arcilla caolinita transformada térmicamente a una temperatura de 500°C y 800°C no supera el máximo del 10% que establece la norma ASTM C618-19; es decir, cumple con los requerimientos para ser catalogada como puzolanas de Clase N. Los valores fueron de 8.3% y 9.7% para las arcillas caolinitas calcinadas a 500°C y 800°C respectivamente.
- Conforme a los resultados obtenidos de la resistencia a compresión del metakaolin a 500 °C con sustitución parcial del 10, 15 y 20%, se procedió a no realizar el ensayo de Difracción de Rayos X por el motivo de que los resultados no fueron satisfactorios, ni relevantes para su respectivo análisis, el enfoque se dará para el metakaolin a 800°C
- En los ensayos de difracción mostrados en la Figura 29 (A) y (B), se evidencia la transformación exitosa de la arcilla caolinita a metakaolin, cumpliendo con los compuestos necesarios para que reaccione conjuntamente con el cemento y agua para formar morteros con mejores propiedades físicas y que cumpla con los requerimientos establecidos por las normativas vigentes. Además, se observa que la difracción de rayos X para las edades de 28 y 56 días con los diferentes porcentajes de sustitución cumple con la formación de los compuestos tales como

la Portlandita, Etringita, Tobermorita y el Cuarzo, dando un resultado positivo y satisfactorio.

- En la Tabla 27 se observa los valores obtenidos en la Difracción de Rayos X para la edad de 28 días del patrón y para los valores de sustitución del 10,15 y 20%. En primer lugar, se evidencia que los valores de la etringita aumentan hasta llegar a una intensidad de 400 cps según va aumenta el porcentaje de sustitución del metakaolin a 800°C, además se puede observar que el valor de la etringita del cemento es inferior a todos los valores obtenidos. Esta misma tendencia tienen la tobermorita. Por otro lado, la Portlandita va disminuyendo conforme el porcentaje de sustitución aumenta, pasando de 1250 cps para el 10% de sustitución a 662 cps con el 20% de sustitución, sin embargo, se evidencia que para el patrón la intensidad es de 1051 cps.
- En la Tabla 28 se observa los valores obtenidos en la Difracción de Rayos X para la edad de 56 días del patrón y para los valores de sustitución del 10,15 y 20%. En primer lugar, se evidencia que los valores de la etringita aumentan hasta llegar a una intensidad de 2015 cps según va aumenta el porcentaje de sustitución del metakaolin a 800°C, además se puede observar que el valor de la etringita del cemento es mayor a todos los valores obtenidos. Este mismo comportamiento tiene la tobermorita, con la única diferencia que el patrón su valor está entre los rangos de sustitución del 10 y 15%. Por otro lado, la Portlandita va disminuyendo conforme el porcentaje de sustitución aumenta, pasando de 450 cps para el 10% de sustitución a 299 cps con el 20% de sustitución, sin embargo, se evidencia que para el patrón la intensidad es de 1192 cps.

## RECOMENDACIONES

- Se debe verificar y corregir la incidencia del metakaolin a 500°C y 800°C en la trabajabilidad de los morteros en futuros estudios, ya que al observar el porcentaje del flujo en todos los casos planteados de sustitución se puede evidenciar que el mortero no tiene una hidratación adecuada
- Al momento de la realización de los cubos de mortero tener precaución con el encofrado, procurando que antes de la realización de los especímenes el molde este previamente aceitado y que posterior al desencofrado los cubos no sufran ningún tipo de golpe ni caída. Además, precautelar que las condiciones del curado sean las más óptimas, garantizando un nivel adecuado de agua saturada con cal durante todo el proceso de curado.
- En el proceso de interrupción de la hidratación del mortero, prever de forma oportuna los utensilios de proyección para la manipulación de los reactivos químicos, como la máscara de gases, gafas protectoras y guantes de látex.
- Se propone que, para futuras investigaciones, se realice ensayos en intervalos mayores de tiempo que los descritos en el trabajo de integración curricular. Además, se propone que el rango de temperatura inicial para la calcinación de la arcilla caolinita sea superior a los 600°C y que los porcentajes de sustitución sean desde el 5% hasta el 25% para tener un rango más amplio de datos para el respectivo análisis.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM C618. (2019). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM C778. (2021). *Standard Specification for Standard Sand*. <https://doi.org/10.1520/C0778-21>
- ASTM C1157. (2020). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*. [https://doi.org/10.1520/C1157\\_C1157M-20A](https://doi.org/10.1520/C1157_C1157M-20A)
- Bartolomé, J. F. (1997). *El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones*.
- Hanle, L., Maldonado, P., Onuma, E., Tichy, M., & G. van Oss, H. (2006). *Productos industriales y usos del producto: emisiones de la industria de los minerales*. In: *DIRECTRICES del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*.
- Holcim. (2016). *Soluciones en cemento*.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, Beatrix., & Panarese, W. C. (2002). *Design and control of concrete mixtures*. Portland Cement Association.
- Kuliffayová, M., Krajči, L., Janotka, I., & Šmatko, V. (2012a). Thermal behaviour and characterization of cement composites with burnt kaolin sand. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 108(2), 425–432. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1964-0>
- Kuliffayová, M., Krajči, L., Janotka, I., & Šmatko, V. (2012b). Thermal behaviour and characterization of cement composites with burnt kaolin sand. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 108(2), 425–432. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1964-0>
- León-Velez, A., & Guillén-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*, 20(3), 611–625. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>

- Luna, G. (2014). *Estudio del Hormigón - Guía Didáctica para el Diseño de Mezclas*.
- Massazza, F. (1993). Pozzolanic Cements. *Cement & Concrete Composites*, 15, 185–214.
- Merma Suni, M., & Churata Añasco, R. (2015). *Obtención de geopolímeros a partir de relave minero de cobre con ceniza volante y metacaolín*.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete: Vol. 5th edition*.
- NTE INEN 151. (2010). *Cemento Hidráulico. Definición de términos*.
- NTE INEN 152. (2010). *Cemento Portland. Requisitos*.
- NTE INEN 155. (2009). *Cemento Hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica*.
- NTE INEN 488. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista*.
- NTE INEN 1108. (2020). *Agua para consumo humano. Requisitos*.
- NTE INEN 2380. (2011). *Cemento Hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*.
- NTE INEN 2502. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación del flujo en morteros*.
- Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudion, J. J., & Delgado, A. H. (2002). *Handbook of thermal analysis of construction materials*. Noyes Publications.
- Ramos, J. (2019). *Evaluación del índice de eficiencia puzolánica de morteros de cementos 5800 con base en la Norma Coguanor NTG 41003 (ASTM C109) utilizando como aditivo metacaolín, obtenido de caolín a nivel de laboratorio*. Universidad de San Carlos de Guatemala .
- Rubenstein, M. (2012, mayo 9). *Emisiones de la industria del cemento*.  
<https://news.climate.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>

- Singh, M., & Garg, M. (2006). Reactive pozzolana from Indian clays-their use in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, *36*(10), 1903–1907.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.12.002>
- Sobrevilla, B. N. (2016). El cemento como material esencial para edificaciones que purifiquen el aire, absorbiendo gases de efecto invernadero. *CIVILIZATE*, *8*, 10–11.  
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/18620/18858>
- Tironi, A., Castellano, C. C., Bonavetti, V. L., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2014). Kaolinitic calcined clays - Portland cement system: Hydration and properties. *Construction and Building Materials*, *64*, 215–221.  
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.065>
- Tironi, A., Trezza, M. A., Irassar, E. F., & Scian, A. N. (2012). Thermal Treatment of Kaolin: Effect on the Pozzolanic Activity. *Procedia Materials Science*, *1*, 343–350. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2012.06.046>
- Torres Agredo, J., & Mejía de Gutiérrez, R. (2007). Influence of the mineralogical composition of kaolins on the performance of added mortars with MK. *Año*, *74*, 61–67.



## **ANEXOS**

## ANEXO N° 1

### TRATAMIENTO TERMICO A LA ARCILLA CAOLINITA A 500°C

Tratamiento térmico a la arcilla caolinita – 500°C								
	Tiempo de Exposición (Te) - min	Velocidad de Exposición (Vc) -°C/min	Peso Inicial (Pi)		Peso Final (Pf)		LOI	Promedio LOI
<b>Arcilla a 500 °C</b>	121,25	4	1155,7	g	1061,3	g	8,2	% 8,3
			1257,6		1149,8		8,6	
			1352,3		1225,3		9,4	
			1172,3		1088,3		7,2	

### TRATAMIENTO TERMICO A LA ARCILLA CAOLINITA A 800°C

Tratamiento térmico a la arcilla caolinita – 800 °C								
	Tiempo de Exposición (Te) - min	Velocidad de Exposición (Vc) -°C/min	Peso Inicial (Pi)		Peso Final (Pf)		LOI	Promedio LOI
<b>Arcilla a 800 °C</b>	196,25	4	1240,6	g	1126,6	g	9,2	% 9,7
			1302,1		1176,4		9,7	
			1159,3		1045,9		9,8	
			1314,2		1178,2		10,3	

## ANEXO N° 2

### DETERMINACIÓN DEL FLUJO

#### MORTERO PATRÓN

DETERMINACIÓN DEL FLUJO		
Di	100	mm
Df1	209	mm
Df2	204,4	mm
Df3	203,5	mm
Df4	205,4	mm
Df promedio	205,575	mm
%	105,6	

#### METAKAOLIN 800°C CON 10% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO

DETERMINACIÓN DEL FLUJO		
Di	100	mm
Df1	200,7	mm
Df2	199,2	mm
Df3	198,9	mm
Df4	204,6	mm
Df promedio	200,85	mm
%	100,9	

#### METAKAOLIN 800°C CON 15% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO

DETERMINACIÓN DEL FLUJO		
Di	100	mm
Df1	191,9	mm
Df2	200,4	mm
Df3	197,3	mm
Df4	195,2	mm
Df promedio	196,2	mm
%	96,2	

#### METAKAOLIN 800°C CON 20% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO

DETERMINACIÓN DEL FLUJO		
Di	100	mm
Df1	184,9	mm
Df2	182,4	mm
Df3	181,5	mm
Df4	184,7	mm
Df promedio	183,375	mm
%	83,4	

#### METAKAOLIN 500°C CON 10% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO

<b>DETERMINACIÓN DEL FLUJO</b>		
Di	100	mm
Df1	197,7	mm
Df2	195,4	mm
Df3	196	mm
Df4	193,4	mm
Df promedio	195,625	mm
%	95,6	

**METAKAOLIN 500°C CON 15% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO**

<b>DETERMINACIÓN DEL FLUJO</b>		
Di	100	mm
Df1	196,8	mm
Df2	195,4	mm
Df3	192,8	mm
Df4	195,6	mm
Df promedio	195,15	mm
%	95,2	

**METAKAOLIN 500°C CON 20% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO**

<b>DETERMINACIÓN DEL FLUJO</b>		
Di	100	mm
Df1	189,6	mm
Df2	191,4	mm
Df3	189,3	mm
Df4	192,7	mm
Df promedio	190,75	mm
%	90,75	

### ANEXO N° 3

#### ENSAYO DE RESISTENCIA A COMPRESION

##### MORTERO PATRÓN A 7. 28 Y 56 DÍAS

MORTEROS PATRONES 7 DIAS							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
4/5/2022	P1	11/5/2022	294,0	60,2	25,8	23,3	20,9
4/5/2022	P2	11/5/2022	293,4	53,6	26,1	20,6	
4/5/2022	P3	11/5/2022	293,6	49,4	26,2	18,9	

MORTEROS PATRONES 28 DIAS							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
4/5/2022	P4	1/6/2022	297,0	87,4	25,7	34,0	31,3
4/5/2022	P5	1/6/2022	303,3	70,8	26,5	26,7	
4/5/2022	P6	1/6/2022	299,8	85,9	25,9	33,2	

MORTEROS PATRONES 56 DIAS							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
4/5/2022	P8	29/6/2022	293,2	98,9	26,2	37,8	38,2
4/5/2022	P7	29/6/2022	292,4	99,1	25,6	38,6	
4/5/2022	P9	29/6/2022	293,4	98,4	25,8	38,1	

##### METAKAOLIN 800°C CON 10% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS

MORTEROS DE 800 °C - 10 % 7 DIAS							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
5/5/2022	MK10L1	12/5/2022	289,0	44,2	25,6	17,2	17,9
5/5/2022	MK10L2	12/5/2022	289,9	47,9	25,7	18,7	
5/5/2022	MK10L3	12/5/2022	288,2	47,4	26,5	17,9	

MORTEROS DE 800 °C - 10 % 28 DIAS							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
5/5/2022	MK10P2	2/6/2022	297,2	73,7	26,5	27,8	28,6
5/5/2022	MK10P3	2/6/2022	302,8	78,2	27,1	28,8	
5/5/2022	MK10P4	2/6/2022	295,8	78,7	26,9	29,2	

<b>MORTEROS DE 800 °C - 10 % 56 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
5/5/2022	MK800-10-1	30/6/2022	295,7	88,9	26,5	33,6	33,2
5/5/2022	MK800-10-2	30/6/2022	293,6	86,8	26,4	32,9	
5/5/2022	MK800-10-3	30/6/2022	294,1	88,6	26,8	33,1	

**METAKAOLIN 800°C CON 15% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS**

<b>MORTEROS DE 800 °C - 15 % 7 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
9/5/2022	MK15L1	16/5/2022	288,6	41,4	26,1	15,8	15,7
9/5/2022	MK15L2	16/5/2022	289,6	44,4	26,2	16,9	
9/5/2022	MK15L3	16/5/2022	289,0	37,3	26,1	14,3	

<b>MORTEROS DE 800 °C - 15 % 28 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
9/5/2022	MK1528-1	6/6/2022	287,4	78,8	26,3	30,0	29,0
9/5/2022	MK1528-2	6/6/2022	290,1	76,9	26,3	29,2	
9/5/2022	MK1528-3	6/6/2022	288,3	72,4	26,1	27,7	

<b>MORTEROS DE 800 °C - 15 % 56 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
9/5/2022	MK15-7	4/7/2022	295,5	89,9	26,6	33,8	33,4
9/5/2022	MK15-8	4/7/2022	299,8	78,0	26,8	29,1	
9/5/2022	MK15-9	4/7/2022	294,9	97,9	26,3	37,3	

**METAKAOLIN 800°C CON 20% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS**

<b>MORTEROS DE 800 °C - 20 % 7 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
10/5/2022	MK20L1	17/5/2022	287,7	41,17	25,69	16,02	17,09
10/5/2022	MK20L2	17/5/2022	288,1	45,59	25,84	17,64	
10/5/2022	MK20L3	17/5/2022	287,7	45,7	25,98	17,59	

<b>MORTEROS DE 800 °C - 20 % 28 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
10/5/2022	MK20-28-1	7/6/2022	295	66,3	26,46	25,05	26,46
10/5/2022	MK20-28-2	7/6/2022	300,6	69,6	26,68	26,08	
10/5/2022	MK20-28-3	7/6/2022	296,7	73,33	25,96	28,24	

<b>MORTEROS DE 800 °C - 20 % 56 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
10/5/2022	MK20-7	5/7/2022	287,5	67,38	25,53	26,40	28,01
10/5/2022	MK20-8	5/7/2022	287,6	68,75	25,65	26,80	
10/5/2022	MK20-9	5/7/2022	290,1	79,45	25,78	30,82	

**METAKAOLIN 500°C CON 10% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS**

<b>MORTEROS DE 500 °C - 10 % 7 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
11/5/2022	MK10 5.1	18/5/2022	296,3	41,7	26,57	15,69	15,96
11/5/2022	MK10 5.2	18/5/2022	299,9	39,06	27,26	14,33	
11/5/2022	MK10 5.3	18/5/2022	295,6	47,95	26,83	17,87	

<b>MORTEROS DE 500 °C - 10 % 28 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
11/5/2022	MK10-5006	8/6/2022	289,5	68,51	25,69	26,66	26,23
11/5/2022	MK10-5007	8/6/2022	288,5	65,78	25,56	25,73	
11/5/2022	MK10-5008	8/6/2022	289,2	66,92	25,45	26,29	

<b>MORTEROS DE 500 °C - 10 % 56 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
11/5/2022	MK10 57	6/7/2022	289,7	76,28	25,50	29,91	29,45
11/5/2022	MK10 58	6/7/2022	289,7	68,68	25,81	26,61	
11/5/2022	MK10 59	6/7/2022	289,6	82,04	25,78	31,82	

**METAKAOLIN 500°C CON 15% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS**

<b>MORTEROS DE 500 °C - 15 % 7 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
16/5/2022	MK15 5.7	23/5/2022	289,2	38,29	26,40	14,51	14,54
16/5/2022	MK15 5.8	23/5/2022	288,8	36,46	26,44	13,79	
16/5/2022	MK15 5.9	23/5/2022	289,3	40,55	26,43	15,34	

<b>MORTEROS DE 500 °C - 15 % 28 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
16/5/2022	MK15 5.1	13/6/2022	296,4	56,23	26,49	21,23	21,87
16/5/2022	MK15 5.2	13/6/2022	299,7	54,16	26,58	20,38	
16/5/2022	MK15 5.3	13/6/2022	298,3	62,66	26,12	23,99	

<b>MORTEROS DE 500 °C - 15 % 56 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
16/5/2022	MK15 7	11/7/2022	289,4	73,68	26,32	27,99	27,85
16/5/2022	MK15 8	11/7/2022	290	71,72	26,11	27,47	
16/5/2022	MK15 9	11/7/2022	289,6	72,55	25,83	28,09	

**METAKAOLIN 500°C CON 20% DE SUSTITUCIÓN EN PESO DEL CEMENTO A 7. 28 Y 56 DÍAS**

<b>MORTEROS DE 500 °C - 20 % 7 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
17/5/2022	Mk20 5.7	24/5/2022	295,3	37,16	26,21	14,18	13,86
17/5/2022	Mk20 5.8	24/5/2022	298,5	34,83	26,18	13,31	
17/5/2022	Mk20 5.9	24/5/2022	295,4	35,83	25,40	14,11	

<b>MORTEROS DE 500 °C - 20 % 28 DIAS</b>							
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Rotura	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
17/5/2022	Mk20 5.1	14/6/2022	287,6	52,95	25,89	20,45	20,55
17/5/2022	Mk20 5.2	14/6/2022	288,6	52,05	26,04	19,99	
17/5/2022	Mk20 5.3	14/6/2022	287,5	54,91	25,89	21,21	



<b>MORTEROS DE 500 °C - 20 % 56 DIAS</b>							
<b>Fecha de Fabricación</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de Rotura</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Área (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>	<b>Esfuerzo (MPa)</b>
17/5/2022	Mk20 7	12/7/2022	290,5	63,34	26,50	23,90	23,57
17/5/2022	Mk20 8	12/7/2022	290	61,66	26,15	23,58	
17/5/2022	Mk20 9	12/7/2022	291,2	59,4	25,57	23,23	

## ANEXO N° 4

# RESULTADOS ENTREGADOS POR PARTE DEL LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 01 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

**DATOS DEL CLIENTE**

**Razón social:** ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0993081031

**DATOS DEL PROYECTO**

**Proyecto:** CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**NORMA:** ASTM C109

N°	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm²)	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-04	P1	2022-05-11	7	284	106,0	6,14	60,17	237	23,3
2	2022-05-04	P2	2022-05-11	7	289,4	106,0	5,47	53,63	210	20,6
3	2022-05-04	P3	2022-05-11	7	293,6	106,0	5,03	49,36	192	18,9
4	2022-05-05	MK10L1	2022-05-12	7	289	101,0	4,51	44,23	175	17,2
5	2022-05-05	MK10L2	2022-05-12	7	289,9	101,0	4,89	47,93	190	18,7
6	2022-05-05	MK10L3	2022-05-12	7	288,2	101,0	4,83	47,41	182	17,9
7	2022-05-09	MK15L1	2022-05-16	7	288,6	96,0	4,22	41,43	162	15,8
8	2022-05-09	MK15L2	2022-05-16	7	289,6	96,0	4,52	44,36	172	16,9
9	2022-05-09	MK15L3	2022-05-16	7	289	96,0	3,80	37,28	145	14,3

**OBSERVACIONES:** La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILACRA  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 02 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-10	MK20L1	2022-05-17	7	287,7	83,0	4,20	41,17	163	16,0
2	2022-05-10	MK20L2	2022-05-17	7	288,1	83,0	4,65	45,59	180	17,6
3	2022-05-10	MK20L3	2022-05-17	7	287,7	83,0	4,66	45,70	179	17,6
4	2022-05-11	MK10 5.1	2022-05-18	7	296,3	96,0	4,25	41,70	160	15,7
5	2022-05-11	MK10 5.2	2022-05-18	7	299,9	96,0	3,88	39,06	146	14,3
6	2022-05-11	MK10 5.3	2022-05-18	7	295,6	96,0	4,89	47,95	182	17,9
7	2022-05-16	MK15 5.7	2022-05-23	7	289,2	95,0	3,90	38,29	148	14,5
8	2022-05-16	MK15 5.8	2022-05-23	7	288,8	95,0	3,72	36,46	141	13,8
9	2022-05-16	MK15 5.9	2022-05-23	7	289,3	95,0	4,13	40,55	156	15,3

OBSERVACIONES: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-1

Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 03 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm²)	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-17	Mk20 5.7	2022-05-24	7	295,3	91,0	3,79	37,16	145	14,2
2	2022-05-17	Mk20 5.8	2022-05-24	7	298,5	91,0	3,55	34,83	136	13,3
3	2022-05-17	Mk20 5.9	2022-05-24	7	295,4	91,0	3,85	35,83	144	14,1
4	2022-05-04	Patron 1	2022-06-01	28	297	106,0	8,92	87,44	347	34,0
5	2022-05-04	P5	2022-06-01	28	303,3	106,0	7,22	70,78	273	26,7
6	2022-05-04	P6	2022-06-01	28	299,8	106,0	8,76	85,90	338	33,2
7	2022-05-05	Mk10-P2	2022-06-02	28	297,2	101,0	7,52	73,71	283	27,8
8	2022-05-05	Mk10-P3	2022-06-02	28	302,8	101,0	7,97	78,15	284	28,8
9	2022-05-05	Mk10-P4	2022-06-02	28	295,8	101,0	8,02	78,66	298	29,2

OBSERVACIONES: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los items ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 04 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm²)	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-09	MK15-28-1	2022-06-06	28	287,4	96,0	8,04	78,83	305	30,0
2	2022-05-09	MK15-28-2	2022-06-06	28	290,1	96,0	7,84	76,85	298	29,2
3	2022-05-09	MK15-28-3	2022-06-06	28	288,3	96,0	7,38	72,39	283	27,8
4	2022-05-10	MK20-28-1	2022-06-07	28	295,2	83,0	6,76	66,30	255	25,1
5	2022-05-10	MK20-28-2	2022-06-07	28	300,6	83,0	7,10	69,60	266	26,1
6	2022-05-10	MK20-28-3	2022-06-07	28	296,7	83,0	7,47	73,30	288	28,2
7	2022-05-11	MK10-5006	2022-06-08	28	289,5	96,0	6,89	68,51	272	26,7
8	2022-05-11	MK10-5007	2022-06-08	28	288,5	96,0	6,71	65,78	262	25,7
9	2022-05-11	MK10-5008	2022-06-08	28	289,2	96,0	6,82	66,82	268	26,3

**OBSERVACIONES:** La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VALLEJO  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 05 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-16	MK15 5.1	2022-06-13	28	296,4	95,0	5,73	56,23	216	21,2
2	2022-05-16	MK15 5.2	2022-06-13	28	299,7	95,0	5,52	54,16	208	20,4
3	2022-05-16	MK15 5.3	2022-06-13	28	288,3	95,0	6,39	62,66	245	24,0
4	2022-05-17	Mk20 5.1	2022-06-14	28	287,6	91,0	5,40	52,95	209	20,5
5	2022-05-17	Mk20 5.2	2022-06-14	28	288,6	91,0	5,31	52,05	204	20,0
6	2022-05-17	Mk20 5.3	2022-06-14	28	287,5	91,0	5,60	54,91	216	21,2
7	2022-05-04	P8	2022-06-29	56	293,2	106,0	10,08	98,89	386	37,8
8	2022-05-04	P7	2022-06-29	56	292,4	106,0	10,10	99,05	394	38,6
9	2022-05-04	P9	2022-06-29	56	293,4	106,0	10,03	98,39	386	37,9

**OBSERVACIONES:** La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLALOBOS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 06 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-05	MK800-10-1	2022-06-30	56	295,7	101,0	9,07	88,91	343	33,6
2	2022-05-05	MK800-10-2	2022-06-30	56	293,6	101,0	8,85	86,75	336	32,9
3	2022-05-05	MK800-10-3	2022-06-30	56	284,1	101,0	9,04	88,63	337	33,1
4	2022-05-09	MK15-7	2022-07-04	56	295,5	96,0	9,17	89,93	345	33,8
5	2022-05-09	MK15-8	2022-07-04	56	299,8	96,0	7,95	77,99	297	29,1
6	2022-05-09	MK15-9	2022-07-04	56	294,9	96,0	9,98	97,85	380	37,3
7	2022-05-10	MK20-7	2022-07-05	56	287,5	83,0	6,87	67,38	269	26,3
8	2022-05-10	MK20-8	2022-07-05	56	287,6	83,0	7,01	68,75	273	26,8
9	2022-05-10	MK20-9	2022-07-05	56	290,1	83,0	8,10	79,45	314	30,8

OBSERVACIONES: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLALÓN  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0403 - I  
Hoja 07 de 07

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ERIKA YAJAIRA LEÓN CHUQUI  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0993081031

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
NORMA: ASTM C109

Nº	FECHA FÁBRICA	DESCRIPCIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	PESO (g)	FLUJO (%)	CARGA (T)	CARGA (kN)	ESFUERZO (kg / cm <sup>2</sup> )	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-11	MK10 57	2022-07-06	56	289,7	96,0	7,76	76,28	305	29,9
2	2022-05-11	MK10 58	2022-07-06	56	289,7	96,0	7,00	68,68	271	26,6
3	2022-05-11	MK10 59	2022-07-06	56	289,6	96,0	6,37	62,04	325	31,8
4	2022-05-16	MK15 7	2022-07-11	56	289,4	95,0	7,51	73,68	285	28,0
5	2022-05-16	MK15 8	2022-07-11	56	290	95,0	7,31	71,72	280	27,5
6	2022-05-16	MK15 9	2022-07-11	56	289,6	95,0	7,40	72,55	286	28,1
7	2022-05-17	Mk20 7	2022-07-12	56	290,5	91,0	6,46	63,34	244	23,9
8	2022-05-17	Mk20 8	2022-07-12	56	290	91,0	6,29	61,66	240	23,6
9	2022-05-17	Mk20 9	2022-07-12	56	291,2	91,0	6,06	59,40	232	22,7

OBSERVACIONES: La información proporcionada por el cliente, tal como, muestra, involucra su total responsabilidad. Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados bajo las condiciones de Laboratorio o bajo las condiciones en las que se recibieron. El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES JULIÁN CIS  
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

CCM-022-005-I