

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**CLASIFICACIÓN Y USO DEL METAKAOLÍN COMO MATERIAL
SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN**

COMPONENTE: DURABILIDAD

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

LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO

luferpq@gmail.com

DIRECTORA: ING. MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO, M. Sc.

mercedes.villacis@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO 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.

LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO, bajo mi supervisión.

M.SC. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS 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 el (los) producto(s) resultante(s) 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.

LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO

EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Francisco y Rosita, por ser los pilares fundamentales en mi formación académica, por ser ejemplo de constancia y esfuerzo, y por su sacrificio y apoyo incondicional para que pueda cumplir mis sueños y metas.

A toda mi familia, en especial mis hermanas Anita, Cristina, Sisa y mi hermano Diego, por haberme apoyando durante todo este tiempo de mi formación académica, y quienes me impulsan y motivan a mejorar cada día, a mi abuelita Nicolasa (+) que desde donde se encuentre sé que estará orgullosa de mí.

A la Escuela Politécnica Nacional y a la Facultad de Ingeniería Civil por haberme permitido estudiar en tan prestigiosa institución y aprender todos los conocimientos necesarios para hacer de mí un excelente ser humano y profesional.

Al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Rocas LEMSUR por el acceso y facilitación del uso de sus instalaciones para realizar los ensayos, en especial a la Ing. Mercedes Villacís, directora del proyecto, por la guía y el conocimiento compartido, y al Ing. Gabriel Merino por su ayuda y apoyo en esta investigación, de igual manera al laboratorio del CICAM y al Laboratorio de Materia Condensada de Física, especialmente a la Dra. María José Benítez.

A mis amigos que han representado una segunda familia a lo largo de todo este tiempo, levantándome los ánimos en los momentos más difíciles, y haciendo que no me rinda ni ceda antes las dificultades, a todos los que alguna vez me brindaron su apoyo y palabras de aliento a lo largo de mis estudios, a Efraín, Jairo y Xavy por su sincera amistad y por la confianza depositada en mí, a Gaby y Estefy por su apoyo y amistad y por todos los momentos y recuerdos de la U.

A mi compañera de proyecto de integración Erika León, por su colaboración, responsabilidad, dedicación y amistad durante la elaboración de esta investigación.

Luis Fernando Panamá Quilumbango

DEDICATORIA

A mis padres, por ser un ejemplo a seguir, por sus enseñanzas y consejos, y en especial por su motivación y apoyo para conseguir todas las metas que me proponga.

A mi familia, por la confianza puesta en mí, siempre serán mi motivo para esforzarme y no rendirme.

Luis Fernando Panamá Quilumbango

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	XII
ABSTRACT	XIII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	2
1.4. Marco teórico	4
1.4.1. Materiales.....	4
1.4.1.1. Arena Normalizada.....	4
1.4.1.2. Cemento.....	5
1.4.1.3. Metakaolín.....	7
1.4.1.4. Agua.....	10
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1. Muestreo	12
2.2. Caolinita	12
2.2.1. Tratamiento térmico.....	13
2.3. Metakaolín.....	15
2.3.1. Preparación de la muestra.....	15
2.3.2. Difracción por rayos X	17
2.3.3. Requisitos para uso en morteros y hormigones.....	18
2.4. Morteros	19
2.4.1. Elaboración de morteros.....	19
2.4.2. Ensayo de Flujo.....	22
2.4.3. Elaboración de especímenes de mortero.....	23
2.4.4. Ensayo de Permeabilidad	27
2.4.5. Absorción, porosidad y densidad	30

2.4.6.	Profundidad de carbonatación	35
2.4.7.	Resistencia a la congelación y descongelación rápida	38
2.4.8.	Resistencia a la Compresión Cúbica	41
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
3.1.	Resultados	44
3.1.1.	Propiedades del Metakaolín	44
3.1.2.	Flujo en Morteros.....	44
3.1.2.1.	Mortero Patrón.....	45
3.1.2.2.	Mortero con 10% de sustitución con Metakaolín.....	46
3.1.2.3.	Mortero con 15% de sustitución con Metakaolín.....	46
3.1.2.4.	Mortero con 20% de sustitución con Metakaolín.....	47
3.1.2.5.	Resultados finales de Flujo.....	48
3.1.3.	Resistencia a la compresión cúbica.....	49
3.1.4.	Difracción por Rayos X	50
3.1.4.1.	Difracción en muestra de arcilla caolinita cruda y en metakaolín	50
3.1.4.2.	Difracción en muestras de mortero	51
3.1.5.	Ensayo de Absorción, Densidad y Porosidad	55
3.1.6.	Profundidad de Carbonatación	57
3.1.6.1.	Profundidad de carbonatación en cubos de mortero.....	58
3.1.6.2.	Profundidad de carbonatación en cilindros de mortero	59
3.1.7.	Resistencia a congelación y descongelación rápida	61
3.1.8.	Ensayo de Permeabilidad.....	62
3.2.	Conclusiones.....	63
3.3.	Recomendaciones.....	65
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
5.	ANEXOS.....	71
	ANEXO I.....	71
	ANEXO II.....	72
	ANEXO III.....	73
	ANEXO IV	74
	ANEXO V	75
	ANEXO VI	76
	ANEXO VII	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Arena de Sílice.....	4
Fig. 1.2. Cemento TIPO GU.....	7
Fig. 1.3. Metakaolín.	8
Fig. 2.1. Medición de muestra de arcilla caolinita para tratamiento térmico.....	13
Fig. 2.2. Horno programable “Muffle Furnance FO610CR”	14
Fig. 2.3. Muestras de Metakaolín obtenido luego de tratamiento térmico.	14
Fig. 2.4. Tamiz No. 200 para muestra triturada.....	15
Fig. 2.5. Muestra de mortero triturado.....	16
Fig. 2.6. Ensayo para detener el proceso de hidratación del cemento.	16
Fig. 2.7. Filtrado de la muestra con isopropanol y éter dietílico.	16
Fig. 2.8. Muestras en desecador luego de ser retirados del horno.	17
Fig. 2.9. Equipo de Difracción de Rayos X.	17
Fig. 2.10. Porta muestras con muestra de cemento Tipo I, Metakaolín 10%, Metakaolín 15% y Metakaolín 20% a 56 días.....	18
Fig. 2.11. Esquema de mezcladora mecánica (Paleta y Tazón).....	20
Fig. 2.12. Materiales para realización de especímenes de mortero.....	20
Fig. 2.13. Mezcladora mecánica LEMSUR.	21
Fig. 2.14. Cemento y metakaolín en la elaboración de morteros.....	21
Fig. 2.15. Ensayo de Flujo.	22
Fig. 2.16. Orden de apisonado.....	23
Fig. 2.17. Elaboración de especímenes cúbicos de mortero.	24
Fig. 2.18. Mortero compactado en molde.	24
Fig. 2.19. Cubos de mortero 10% Metakaolín 24 horas después de ser fundidos.	24
Fig. 2.20. Curado de los especímenes cúbicos en agua saturada con cal.	24
Fig. 2.21. Molde para especímenes cilíndricos D=500 mm y H=1000 mm.	25
Fig. 2.22. Probetas cilíndricas de D=500 mm y H=1000 mm para ensayo de permeabilidad.....	26
Fig. 2.23. Esquema de elaboración de Morteros.	27
Fig. 2.24. Esquema de equipo de ensayo de permeabilidad.	28
Fig. 2.25. Probeta cilíndrica para ensayo de permeabilidad.	28

Fig. 2.26. Espécimen cilíndrico en aparato de ensayo de permeabilidad.	29
Fig. 2.27. Manómetros a 500 kPa (72.51 PSI) en ensayo de permeabilidad.	29
Fig. 2.28. Rotura de especímenes cilíndricos a la mitad.....	30
Fig. 2.29. Medición de profundidad de penetración de agua con calibrador.....	30
Fig. 2.30. Cubos en horno a 110 °C. Ensayo de Absorción.....	32
Fig. 2.31. Cubos después de secado en el horno en desecador.	32
Fig. 2.32. Inmersión de las muestras.	33
Fig. 2.33. Muestras con agua en ebullición.....	33
Fig. 2.34. Balanza para medición de masa aparente sumergida.	34
Fig. 2.35. Medida de la profundidad de carbonatación. (a) Para forma regular. (b) Para formas irregulares. (c) Para entradas irregulares.	36
Fig. 2.36. Muestras de 56 días partidas a la mitad luego de ser expuestas al ambiente durante 7 días.....	37
Fig. 2.37. Medición de zona carbonatada luego de ser rociada con Fenolftaleína.	37
Fig. 2.38. Medición de zona carbonatada en espécimen cilíndrico con calibrador.	38
Fig. 2.39. Refrigerador CICAM a 0° C con muestras.	39
Fig. 2.40. Ciclo de descongelamiento. Fase de exposición a luz solar.	39
Fig. 2.41. Evaluación visual luego de ciclo de congelamiento.	40
Fig. 2.42. Muestras luego de ciclo de descongelamiento.	40
Fig. 2.43. Muestra luego de ensayo de compresión cúbica.	41
Fig. 2.44. Medición de dimensiones de cubos con calibrador.....	42
Fig. 2.45. Equipo de Compresión Cúbica.	42
Fig. 2.46. Falla por compresión cúbica en morteros.	43
Fig. 3.1. Flujo en morteros.	49
Fig. 3.2. Resistencia a la compresión cúbica.....	50
Fig. 3.3. Patrón de arcilla caolinita inicial (a) y patrón de metakaolín (b).	50
Fig. 3.4. Resultados de Difracción XRD para Mortero Patrón 56 días.	51
Fig. 3.5. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 10% de Metakaolín 56 días.	52
Fig. 3.6. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 15% de Metakaolín 56 días.	52
Fig. 3.7. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 20% de Metakaolín 56 días.	53

Fig. 3.8. Gráfica de comparación de resultados de difracción.	53
Fig. 3.9. Resultados comparativos de Difracción.	54
Fig. 3.10. Gráfica de barras de resultados de ensayo de absorción [%].	56
Fig. 3.11. Gráfica de barras de resultado de ensayo de absorción. [g/cm ³]	56
Fig. 3.12. Resistencia a la compresión cúbica luego de congelación y descongelación.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Requisitos para la arena normalizada 20-30.....	4
Tabla 1.2. Requisitos físicos normalizados para cemento.	5
Tabla 1.3. Especificaciones Técnicas Cemento Tipo GU HOLCIM.	6
Tabla 1.4. Propiedades físicas del Metakaolín.....	8
Tabla 1.5. Usos del Metakaolín.....	9
Tabla 1.6. Ventajas del Metakaolín.....	9
Tabla 2.1. Tabla de resumen de normas aplicadas a ensayos.....	11
Tabla 2.2. Análisis químico del caolín.....	12
Tabla 2.3. Propiedades Físicas del Caolín.....	12
Tabla 2.4. Tabla de requisitos químicos.	19
Tabla 2.5. Dosificación para elaboración de especímenes.	25
Tabla 3.1. Resultados de pérdida de masa luego de calentamiento de arcilla caolinita.	44
Tabla 3.2. Dosificación 1 para 9 cubos.	44
Tabla 3.3. Dosificación 2 para 6 cubos.	45
Tabla 3.4. Resultado ensayo de flujo para mortero patrón. Dosificación 1.	45
Tabla 3.5. Resultados ensayo de flujo para mortero patrón. Dosificación 2.	45
Tabla 3.6. Resultados ensayo de flujo para mortero con 10% de metakaolín. Dosificación 1.....	46
Tabla 3.7. Resultados ensayo de flujo para mortero con 10% de metakaolín. Dosificación 2.....	46
Tabla 3.8. Resultados ensayo de flujo para mortero con 15% de metakaolín. Dosificación 1.....	46
Tabla 3.9. Resultados ensayo de flujo para mortero con 15% de metakaolín. Dosificación 2.....	47
Tabla 3.10. Resultados ensayo de flujo para mortero con 20% de metakaolín. Dosificación 1.....	47
Tabla 3.11. Resultados ensayo de flujo para mortero con 20% de metakaolín. Dosificación 2.....	48
Tabla 3.12. Resultados de flujo en morteros.....	48
Tabla 3.13. Resultados de Compresión Cúbica.....	49

Tabla 3.14. Valores de intensidad de compuestos en muestras de mortero a 56 días.	54
Tabla 3.15. Resultados de ensayo de absorción.	55
Tabla 3.16. Resultados de profundidad de carbonatación en cubos.	58
Tabla 3.17. Resultados de valores promedio de profundidad de carbonatación en cubos de mortero a 56 días.	59
Tabla 3.18. Resultados de profundidad de carbonatación en cilindros.	59
Tabla 3.19. Resultados de valores promedio de profundidad de carbonatación en cilindros de mortero a 56 días.	60
Tabla 3.20. Resultados de compresión cúbica luego de congelación y descongelación.	61
Tabla 3.21. Resultados de Permeabilidad en Especímenes Cilíndricos.	62

RESUMEN

El presente proyecto tiene como propósito evaluar el uso de metakaolín, obtenido por tratamiento térmico a una temperatura de 800° C de una muestra de arcilla caolinita, como material cementante suplementario en la elaboración de morteros, comparando y observando el comportamiento de la sustitución parcial con metakaolín en la mezcla de mortero en cuanto a sus propiedades de durabilidad.

Se realizaron ensayos de difracción por rayos X para determinar el cambio de la composición química y mineralógica de los morteros con sustitución de metakaolín identificando los principales componentes, de manera que se elaboraron cubos y cilindros de mortero para la muestra de control y sustituciones de 10%, 15% y 20% de metakaolín, obteniendo valores de resistencia en base al ensayo de compresión cúbica a 56 días, y análisis de propiedades de durabilidad como absorción, profundidad de carbonatación, resistencia a ciclos de congelamiento y descongelamiento, y permeabilidad, con el objetivo principal de definir el porcentaje óptimo de sustitución que mayor beneficios proporcione a los morteros.

Como resultado de los ensayos realizados en las muestras, se obtuvo que el porcentaje de sustitución de 10% mejora considerablemente la resistencia a la compresión y de manera semejante para ensayos de permeabilidad, por otra parte, se obtuvo un porcentaje óptimo de 20% de sustitución para ensayos de absorción, el cual también determina propiedades físicas como volumen de vacíos y densidad.

PALABRAS CLAVE: arcilla, caolinita, metakaolín, suplementario, durabilidad, porcentaje de sustitución.

ABSTRACT

The purpose of this project is to evaluate the use of metakaolin, obtained by heat treatment at a temperature of 800° C of a kaolinite clay sample, as a supplementary cementitious material in the preparation of mortars, comparing and observing the behavior of the partial substitution with metakaolin in the mortar mix in terms of its durability properties.

X-ray diffraction tests were carried out to determine the change in the chemical and mineralogical composition of the mortars with metakaolin substitution, identifying the main components, so that cubes and cylinders of mortar were made for the control sample and 10%, 15% and 20% substitutions of metakaolin, obtaining resistance values based on the cubic compression test at 56 days, and analysis of durability properties such as absorption, carbonation depth, resistance to freezing and thawing cycles, and permeability, with the main objective of defining the optimum substitution rate that provides the greatest benefits to the mortars.

As a result of the tests carried out on the samples, it was obtained that the substitution percentage of 10% improves considerably the compressive strength and similarly for permeability tests, on the other hand, an optimum percentage of 20% substitution was obtained for absorption tests, which also determines physical properties such as void volume and density.

KEYWORDS: clay, kaolinite, metakaolin, supplementary, durability, substitution rate

1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

Dentro de la industria de la construcción, uno de los temas más cuestionados ha sido el nivel de contaminación que se produce, ya sea en la ejecución de las obras civiles o en la producción de los materiales de construcción que se emplean, tal es el caso del cemento, siendo el principal material de construcción empleado a nivel mundial que requiere grandes cantidades de energía y genera altas emisiones de contaminantes al aire; de esta manera, se ha buscado diferentes alternativas, tanto en optimización de procesos o usando materiales alternativos que además de generar un menor impacto en el medio ambiente mejoren las propiedades de resistencia y durabilidad a las mezclas de mortero, uno de estos es el metakaolín, este material el cual pretende ser el objeto de estudio de este proyecto, presenta ciertas características particulares, considerándose un material cementante suplementario (SCM) y que no corresponde ni a un residuo ni a un subproducto de un proceso industrial, sino que es producido por elevación de temperatura de la arcilla caolinita, uno de los minerales arcillosos más abundantes en el planeta, a temperaturas entre 500° C y 800° C. (Ramezaniapour, 2014, p. 225),

Como se mencionó con anterioridad el cemento constituye uno de los ingredientes dentro del hormigón que requiere grandes cantidades de energía para su producción dada las elevadas temperaturas utilizadas, además de altas emisiones de dióxido de carbono, donde por cada tonelada de cemento se emiten entre 0.5 y 1 tonelada de dióxido de carbono, representando alrededor del 5% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono según (Rubenstein, 2012), por tanto, la producción del metakaolín representaría una alternativa más ecológica, al requerir menor energía y por ende tener menores emisiones de dióxido de carbono, sin mencionar las mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad en los morteros.

La durabilidad ha constituido una de las principales consideraciones a la hora de diseñar estructuras de hormigón armado, ya que se espera que estas tengan una larga vida útil soportando cualquier condición ambiental, debido a una serie de razones económicas y medioambientales (Barbhuiya et al., 2015); con el estudio del metakaolín, producido con arcilla caolinita ecuatoriana, se espera obtener el porcentaje óptimo que garantice la mejor calidad en las propiedades de durabilidad en morteros que presentan una sustitución parcial de cemento con metakaolín, a comparación de mezclas de mortero utilizando únicamente cemento.

1.1. Objetivo general

Producir metakaolín a partir de una muestra específica de arcilla caolinita ecuatoriana y estudiar su comportamiento al utilizarlo como un material suplementario en mezclas de mortero, usando tres porcentajes de sustitución del 10%, 15% y 20% en función del contenido de cemento a una edad de 56 días, e identificando la variación en cuanto a sus propiedades físicas y de durabilidad.

1.2. Objetivos específicos

1. Muestrear y caracterizar las propiedades físicas y la composición química de la arcilla caolinita a utilizarse en la producción del metakaolín.
2. Producir metakaolín mediante la elevación de temperatura de la arcilla caolinita a una velocidad de calentamiento de 5° C/min hasta llegar a una temperatura de 800° C, y evaluar dicho material con ensayos de difracción por rayos X.
3. Elaborar mortero con una sustitución parcial del 10%, 15% y 20% de metakaolín, y obtener resultados enfocados principalmente a durabilidad, tales como absorción, permeabilidad, profundidad de carbonatación y resistencia a ciclos de congelamiento y descongelamiento, de acuerdo con los ensayos respectivos de laboratorio que indican la normas INEN, ASTM y UNE.
4. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos para los tres porcentajes de sustitución utilizados en la elaboración del mortero con un enfoque en su durabilidad.

1.3. Alcance

De acuerdo con antecedentes e investigaciones del uso del metakaolín en mezclas de mortero realizadas en otros países, las cuales están enfocadas principalmente en la evaluación de las propiedades físicas y de durabilidad del mortero con diferentes porcentajes de sustitución, se tiene que (Frías et al., 2000) reportó un aumento de la porosidad para porcentajes de entre 10% y 25%, en concordancia con resultados mostrados por (Vejmelková et al., 2010), el cual asegura un porcentaje de sustitución óptimo del 10% mejorando además considerablemente propiedades como resistencia a cloruros y resistencia a sulfatos, esto debido a que al usar materiales puzolánicos, en este caso el metakaolín, se rellenan las superficies porosas dentro de la mezcla de mortero, haciendo que la permeabilidad se reduzca y evitando de esta manera el ingreso de agua por efecto de la porosidad capilar.

Así se puede evidenciar los resultados de investigaciones de absorción de morteros con porcentajes de sustitución de metakaolín como la realizada por (Khatib & Clay, 2004) que concluye que la capacidad de absorción disminuye a medida que aumenta el tiempo de curado, además que para porcentajes del 5 % y 10 % mostraron mayor disminución de absorción a comparación de porcentajes de 15 % y 20% a partir de los 28 días, teniendo valores entre 4.2 y 5.4 % en masa seca; mientras que la investigación y los resultados obtenidos por (Abdul Razak et al., 2004) afirman que para la sustitución con un porcentaje de 10% se reduce la absorción y la sortividad a comparación de la muestra patrón.

En cuanto a la carbonatación, se tiene por entendido que uno de los factores que afectan principalmente a las estructuras expuestas al ambiente es el CO₂, que se encuentra en una concentración del 0.035% en la atmósfera, por tanto, en investigaciones de la incidencia del proceso de carbonatación en muestras de hormigón y mortero con porcentajes de sustitución con metakaolín, se han encontrado resultados como los reportados por (Mejía de Gutiérrez, Rubí et al., 2009), teniendo que la profundidad de carbonatación en muestras con adición de Metakaolín aumenta a comparación de la muestra con únicamente cemento Portland a una edad de 28 días, concluyéndose además que el tiempo de curado repercute en los resultados, dado que a mayor edad de curado la velocidad de carbonatación disminuye.

Por consiguiente, el presente estudio tiene como finalidad evaluar y cuantificar las propiedades de durabilidad del metakaolín, producido con una muestra de arcilla caolinita ecuatoriana, con énfasis en su potencial uso en la elaboración de morteros, sentando así una base de información respecto a dichas propiedades como absorción, porosidad, resistencia a carbonatación, resistencia a ciclos de congelación y descongelación y permeabilidad.

Dado la cantidad de infraestructura civil que se construye en el Ecuador y las cuales usan materiales cementantes, el uso del metakaolín como sustituto parcial podría implicar una alternativa viable, mejorando además la calidad de morteros u hormigones, especialmente en zonas o regiones que presenten un ambiente agresivo, y en los que la materia prima (arcilla caolinita) se encuentre en abundancia y sea de fácil acceso, por lo cual los resultados que se obtendrán de este estudio podrán presentar mayor información y una visión más amplia acerca de las propiedades de durabilidad para su aplicación y uso.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Materiales

1.4.1.1. Arena Normalizada

La arena de sílice conocida comúnmente con otros términos tales como arena de cuarzo, arena estándar, o arena industrial, es un material granular cuya fórmula química es SiO₂ (dióxido de silicio), compuesto principalmente de cuarzo con una cantidad en menor proporción de otros minerales, como feldespatos, carbonatos, óxidos de hierro, micas, minerales de arcilla, y carbón. (McLaws, 1971)



Fig. 1.1. Arena de Sílice.

Fuente: (SYCA, s. f.)

Según la norma (NTE INEN 873, 2017) se define como una arena normalizada compuesta en su mayoría de granos de cuarzo casi puro, redondeados naturalmente, además se observa la siguiente gradación, correspondiente a los mismos valores que se presentan en la norma (ASTM C778-21, 2021) para arena estándar 20 – 30, la cual se usará en la elaboración de los morteros.

Tabla 1.1. Requisitos para la arena normalizada 20-30.

Características Gradación, porcentaje pasante del tamiz	Arena 20 - 30
1,18 mm (No. 16)	100
850 µm (No. 20)	85 a 100
600 µm (No. 30)	0 a 5
425 µm (No. 40)	
300 µm (No. 50)	
150 µm (No. 100)	
Diferencia en el contenido de aire en morteros elaborados con arela lavada y sin lavar, % max. de aire. ³	2
Fuente de arena	Ottawa, IL o LeSuer, Mn

³ Esta determinación es necesaria cuando se sospecha la contaminación de la arena, como se indica en 6.3.

^b La resistencia a la compresión en morteros, según NTE INEN 488 (arena normalizada gradada), fabricados cuando se usa el cemento especificado en NTE INEN 152, NTE INEN 490 y NTE INEN 2380, puede reducirse aproximadamente un 4% por cada porcentaje de aire en cubo compactado. Sin embargo, pueden ser necesarias hasta tres amasadas con arena lavada y res amasadas de arena sin lavar, para detectar una diferencia del 7% en la resistencia entre morteros elaborados con arena lavada y otros sin lavar.

Fuente: (NTE INEN 873, 2017)

1.4.1.2. Cemento

Según (Torre, 2004): “El cemento Pórtland es un polvo muy fino de color verdoso. Al mezclarlo con agua forma una masa (pasta) muy plástica y moldeable que luego de fraguar y endurecer adquiere gran resistencia y durabilidad.” Además, el cemento hidráulico se produce principalmente a partir de la mezcla de piedra caliza (75%) y arcilla (25%).(Gonçalves & Margarido, 2015)

En la siguiente figura se muestran los requisitos físicos que establece la norma (NTE INEN 2380, 2011) para los diferentes tipos de cemento:

Tabla 1.2. Requisitos físicos normalizados para cemento.

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Finura	INEN 196	A	A	A	A	A	A
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
Tiempo de fraguado, método de Vicat ^B	INEN 158						
Inicial no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
Inicial no más de, minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	c	c	c	c	c	c
Resistencia a la compresión ^D , MPa, mínimo	INEN 488						
1 día		-	12	-	-	-	-
3 días		13	24	11	11	5	-
7 días		20	-	18	18	11	11
28 días		28	-	-	25	-	21
Calor de hidratación	INEN 199						
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		-	-	-	-	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		-	-	-	-	-	290 (70)
Expansión en barra de mortero	INEN 2529						
14 días, % máximo		0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos)	INEN 2503						
6 meses, % máximo		-	-	0.10	0.05	-	-
1 año, % máximo		-	-	-	0.10	-	-

^A El porcentaje retenido en el tamiz de 45 µm (No. 325) por vía húmeda y el área de la superficie específica determinada en el equipo de permeabilidad al aire en m³/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante.

^B El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158.

^C Se debe informar el contenido de aire en todos los certificados de resultados de ensayos requeridos al fabricante. El valor obtenido en el mortero no garantiza necesariamente que el contenido de aire en el hormigón sea el mismo.

^D Los cementos pueden ser despachados antes que estén disponibles los datos de ensayo de mayor edad. En tales casos, el valor del ensayo puede dejarse en blanco. Alternativamente, el fabricante puede proveer valores estimativos basados en datos históricos de producción. El informe debe indicar si se proporcionan tales estimaciones.

En los ensayos de cemento HS, no se requieren los ensayos a un año cuando el cemento cumple con el límite a 6 meses. Un cemento HS que no cumple con el límite a 6 meses, no debe ser rechazado a menos que tampoco cumpla el límite a un año.

Fuente: (NTE INEN 2380, 2011)

El tipo de cemento a utilizarse en la elaboración de morteros es el cemento TIPO I, el cual es descrito en sus especificaciones técnicas como un cemento hidráulico para la construcción en general, que está compuesto por clínker de cemento portland, sulfato de calcio y una o más adiciones de puzolanas naturales (HOLCIM S.A., 2021), cumpliendo además las especificaciones y estándares de la norma (NTE INEN 2380, 2011), según lo muestra la siguiente tabla:

Tabla 1.3. Especificaciones Técnicas Cemento Tipo GU HOLCIM.

Propiedades	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8	-0.06
Tiempo de fraguado inicial, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	190
No más de, minutos	42	
Contenido del 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, % max.	0.02	0.02

Fuente: (HOLCIM S.A., 2021)



Fig. 1.2. Cemento TIPO GU

Fuente: (HOLCIM S.A., 2021)

1.4.1.3. Metakaolín

El metakaolín es un material comúnmente usado en la industria de la construcción, el cual tiene como principales aplicaciones la de ser un sustituto del clínker en la producción de cemento y su uso como un material cementante suplementario (SCM) (Bakera & Alexander, 2019), esto proporciona ciertas mejoras en cuanto a propiedades de resistencia y durabilidad en mezclas de mortero, recalcando además características físicas como su color blanco característico, útil en acabados arquitectónicos.

La materia prima utilizada para obtener el metakaolín es la arcilla caolinita, la que se define como un mineral arcilloso común, fino y blanco, usado principalmente en la fabricación de porcelana, esta caolinita es un filosilicato formado por capas de sílice y alúmina en una disposición tetraédrica y octaédrica, dicha estructura da lugar a un tamaño de partícula fino y una morfología semejante a las plaquetas, haciendo que las partículas se muevan fácilmente unas sobre otras, dando así como resultado propiedades físicas como suavidad y tacto jabonoso. (Ramezaniapour, 2014)

Producción

Para la obtención del metakaolín se requiere temperaturas entre 500° y 800° C, entre los 100° y 200° C los minerales arcillosos pierden la mayor parte de agua intersticial y entre los 500° y 800° C la caolinita se calcina perdiendo agua por deshidroxilación, este es un proceso endotérmico debido a la gran cantidad de energía necesaria para eliminar los iones hidroxilo químicamente enlazados (Siddique & Khan, 2011, p. 175) y el desorden resultante entre las capas de alúmina y sílice da lugar a un material amorfo altamente reactivo con reactividad hidráulica puzolánica y latente, adecuado para aplicaciones cementantes; por

tanto, la clave de la producción del metakaolín como material cementante suplementario radica en lograr una deshidroxilación lo más completa posible, evitando el sobrecalentamiento de la arcilla caolinita. (Ramezaniyanpour, 2014, p. 225)

Propiedades Físicas

Las partículas de metakaolín son extremadamente pequeñas, con un tamaño medio de partícula de 3 μm , con un color blanquecino. (Siddique & Khan, 2011, p. 176)



Fig. 1.3. Metakaolín.

Fuente: (Siddique & Khan, 2011, p. 176)

De acuerdo con otros estudios se establecen ciertas características físicas comunes del metakaolín en la siguiente tabla, con una similitud en los valores obtenidos por cada uno de ellos.

Tabla 1.4. Propiedades físicas del Metakaolín.

Propiedad	Poon et al.	Al-Akhras et al.	Tafraoui et al.
Gravedad específica	2.62	2.5	2.5
Tamaño medio de las partículas (μm)	-	1.0	12
Finura (m^2/kg)	12680	12000	15000 - 30000
Color	Blanco		

Fuente: (Siddique & Khan, 2011, p. 177)

Composición Química

Los principales componentes que constituyen el metakaolín son el óxido de sílice (SiO_2) y el óxido de alúmina (Al_2O_3), además con presencia en menor proporción de componentes como el óxido férrico, óxido de calcio, óxido de magnesio, óxido de potasio, etc.(Siddique & Khan, 2011)

El SiO_2 y el Al_2O_3 del metakaolín en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio (CH), lo que conduce a la formación de hidratos de silicato de calcio (CSH), hidratos de

aluminato de calcio (CAH) e hidratos de silicato de aluminio de calcio (CASH).(Homayoonmehr et al., 2021)

Usos y Ventajas del Metakaolín

El metakaolín dada sus características, propiedades físicas y químicas, tiene múltiples aplicaciones en cuanto a su uso como material cementante suplementario, algunos de los cuales se enlistan a continuación:

Tabla 1.5. Usos del Metakaolín.

Usos del Metakaolín
Hormigón de alto rendimiento, alta resistencia y ligero
Hormigón prefabricado para fines arquitectónicos, civiles, industriales y estructurales
Productos de fibrocemento y ferrocemento
Hormigón reforzado con fibra de vidrio
Morteros, estucos, material de reparación, revoques para piscinas
Mejora en el acabado, el color y la apariencia

Fuente: (Siddique & Khan, 2011)

Además, como se mencionó con anterioridad, y de acuerdo con varias investigaciones realizadas por diversos autores, se encuentran ventajas en las propiedades mecánicas y de durabilidad como las que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1.6. Ventajas del Metakaolín.

Ventajas del Metakaolín
Mejora la trabajabilidad
Mayor resistencia a la compresión
Mayor resistencia a la tracción y flexión
Mayor durabilidad
Reducción de la permeabilidad
Mayor resistencia al ataque de químicos
Reducción de la reactividad álcali-sílice
Reducción de la contracción debido al empaquetamiento de las partículas
Reducción del potencial de eflorescencia

Fuente: (Siddique & Khan, 2011)

1.4.1.4. Agua

El agua constituye otro de los materiales primordiales en la preparación de morteros, interviniendo directamente en diferentes etapas: en la hidratación y la reacción química del material cementante que permite la formación del gel, la trabajabilidad, el fraguado y curado de la mezcla (Torre, 2004); por tal motivo se debe usar agua potable que no sea capaz de producir cambios sustanciales en las propiedades del mortero.

Para la elaboración de morteros, la norma ecuatoriana que establece las especificaciones del agua potable corresponde a la (NTE INEN 1108, 2011), además se establece que el agua usada en la mezcla debe ser clara y limpia, libre de cantidades altas de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser perjudiciales y afectar las propiedades del hormigón. (NTE INEN 1855-2, 2015)

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada en la siguiente investigación es de tipo experimental, dado que abarca la observación y el análisis científico de las variables correspondientes a la durabilidad y resistencia, realizando una sustitución parcial con metakaolín de 10, 15 y 20% en la elaboración de morteros, para una edad única de 56 días, evaluando cuantitativa y cualitativamente las propiedades antes mencionadas y comparándolas con una muestra patrón.

Los ensayos de laboratorio realizados a las muestras de mortero siguen las descripciones y procesos establecidos en documentos normados como las pertenecientes a la INEN, ASTM y UNE, clasificados de la siguiente manera:

Ensayos de durabilidad:

- Permeabilidad
- Absorción, Porosidad y Densidad
- Profundidad de Carbonatación
- Resistencia al congelamiento y descongelamiento rápido

Ensayos de resistencia a la compresión:

- Compresión cúbica

Las normas aplicadas en cada uno de los ensayos descritos se resumen a continuación:

Tabla 2.1. Tabla de resumen de normas aplicadas a ensayos.

Ensayo	Norma Aplicada
Mezcla de Morteros	ASTM C305-20
Flujo en Morteros	INEN 2502-09
Elaboración de especímenes cúbicos	INEN 488-09
Resistencia a la compresión	INEN 488-09
Permeabilidad	UNE 12390-8
Absorción, Porosidad y Densidad	ASTM C642-21
Resistencia a la carbonatación	UNE 112011
Resistencia al congelamiento y descongelamiento rápido	ASTM C666-15

Elaborado: Luis Panamá

2.1. Muestreo

La arcilla caolinita a usarse en el proyecto de investigación corresponde al caolín blanco adquirido de PROCOMIN LTDA., con las siguientes propiedades químicas y físicas proporcionadas en su ficha técnica.

Tabla 2.2. Análisis químico del caolín.

Análisis Químico (Por Gravimetría Compleximetría)	
SiO ₂	58 - 63 %
MgO	1.5 % max
Al ₂ O ₃	17.0 - 19.5 %
CaO	3.0 % max
Fe ₂ O ₃	2.5 % max
%TiO ₂	0.18%
Ph	4.8 - 5.2

Fuente: (PROCOMIN LTDA, 2021)

Tabla 2.3. Propiedades Físicas del Caolín.

Propiedades Físicas	
Color	Crema - Amarillo
Blancura Photovolt	65.0 +/- 2
Humedad	2 % máximo
Fineza Hegman (ASTM D1210)	4
1/4 Absorción de Aceite G/100	28.00%
Retención en malla Tyler 325	5.0 % +/- 1.5
Tamaño medio de partícula	24 micrones
Gravedad Específica	2.52
Solubles en Agua	0.18%
Abrasividad Valley	2%
Presentación	Bultos - 25 kg

Fuente: (PROCOMIN LTDA, 2021)

2.2. Caolinita

Para la caracterización de la arcilla caolinita como materia prima del metakaolín se realiza el siguiente procedimiento:

2.2.1. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico comprende todo el proceso de elevación de temperatura, que permite obtener metakaolín a partir de la arcilla caolinita, en este sentido es necesario considerar el rol fundamental de la temperatura. El calentamiento de las caolinitas se realiza en hornos rotatorios o mediante procesos de lecho fluidizados, reduciendo el tiempo de horas a minutos. (Siddique & Khan, 2011)

Procedimiento

El proceso consiste en elevar la temperatura de la arcilla calentándola a una temperatura de 800° C a una velocidad de calentamiento de 5° C/min en un horno de laboratorio programable “Muffle Furnace” Modelo FO610CR.



Fig. 2.1. Medición de muestra de arcilla caolinita para tratamiento térmico.

Foto. Luis Panamá



Fig. 2.2. Horno programable “Muffle Furnance FO610CR”

Foto: Luis Panamá

Durante este proceso, la arcilla pierde agua y la estructura del material colapsa formando un aluminosilicato amorfo ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) conocido como metakaolín, a esto se lo conoce como deshidroxilación, expresado químicamente de la siguiente manera: (Khatib et al., 2018)

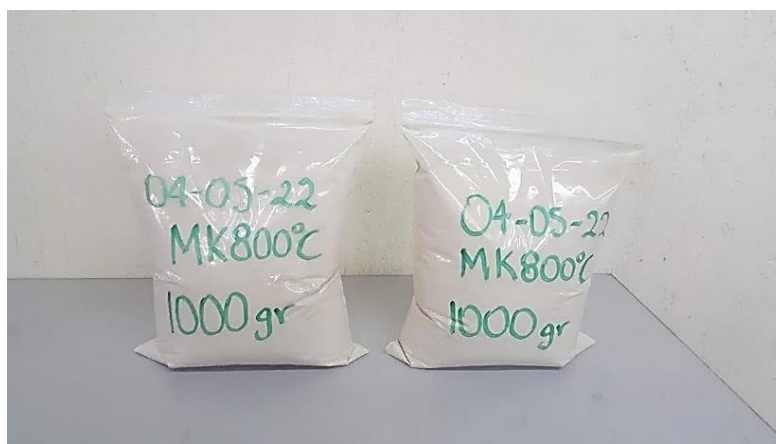
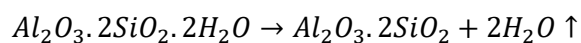


Fig. 2.3. Muestras de Metakaolín obtenido luego de tratamiento térmico.

Foto: Luis Panamá

2.3. Metakaolín

2.3.1. Preparación de la muestra

La preparación de la muestra previo a la realización del ensayo de Difracción por rayos X corresponde a la interrupción de la hidratación del cemento dentro de la mezcla de mortero con sustitución parcial de metakaolín a la edad de 56 días, esto se lo consigue sustituyendo y evaporando el agua de la muestra mediante un lavado con isopropanol y éter dietílico. (Snellings et al., 2018)

Procedimiento

- El núcleo de los especímenes de mortero se tritura hasta un diámetro menor a 1 mm luego de realizarse la compresión cúbica evitando que sobrepase 10 minutos de exposición al ambiente.
- Se instala el filtro Büchner con el matraz por debajo, se fija el papel filtro impregnando levemente con isopropanol, a su vez que se sumerge 8 g. de la muestra triturada en 100 ml de isopropanol por un lapso de 15 minutos, agitándose suavemente para evitar que se sedimente en el fondo y la muestra se mantenga en suspensión.
- Transcurrido ese tiempo se vierte sobre el filtro y se deja filtrar el isopropanol.
- Una vez ha terminado la filtración se enjuaga el residuo con 20 ml de isopropanol y se lo vierte nuevamente en el filtro, realizándose el mismo proceso con 20 ml éter dietílico y dejando que la muestra filtre completamente.
- Concluido el último paso se coloca el residuo con el papel filtro en un vidrio reloj para ser secado en un horno durante un tiempo de 8 min \pm 30 s a una temperatura de 40° \pm 5° C. (Snellings et al., 2018)



Fig. 2.4. Tamiz No. 200 para muestra triturada.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.5. Muestra de mortero triturado.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.6. Ensayo para detener el proceso de hidratación del cemento.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.7. Filtrado de la muestra con isopropanol y éter dietílico.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.8. Muestras en desecador luego de ser retirados del horno.

Foto: Luis Panamá

2.3.2. Difracción por rayos X

La Difracción por Rayos X (XRD) permite determinar la composición mineralógica de la arcilla, llevándose a cabo antes y después del tratamiento térmico. Los patrones de XRD obtenidos de la arcilla calcinada y la inicial se comparan para confirmar la característica de las bandas de caolinita en la muestra cruda y su ausencia en las muestras luego de ser tratadas térmicamente. (Khatib et al., 2018)

Equipo

Se usa un difractómetro modelo D2 Phaser XRD de la marca Bruker equipado con un detector LYNXEYE XE-T, como fuente de Rayos X tubos de Cu (1.54184 \AA) radiación $K\alpha$ 30 Kv, 10 mA, y un porta muestras circular.

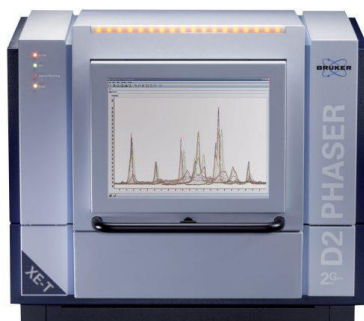


Fig. 2.9. Equipo de Difracción de Rayos X.

Fuente: (D2 PHASER, s. f.)

Procedimiento

La preparación de la muestra para ser ensayada en el difractómetro consiste en colocar una cantidad en el porta muestras con ayuda de una espátula y enrasando la superficie hasta obtener una superficie uniforme y plana.

El difractómetro se configura con las siguientes especificaciones:

- Rango de 2Θ : 10° a 50° con $\Delta=0.02^\circ$
- Tiempo de paso: 0.25 s/paso
- Apertura del detector: 5°

El porta muestras se coloca dentro del difractómetro estableciendo el ángulo Θ entre un rango de 10° y 50° .



Fig. 2.10. Porta muestras con muestra de cemento Tipo I, Metakaolín 10%, Metakaolín 15% y Metakaolín 20% a 56 días.

Foto: Luis Panamá

2.3.3. Requisitos para uso en morteros y hormigones.

Para estudiar el uso del metakaolín en concreto y morteros se consideran las especificaciones que cubre la norma (ASTM C618-19, 2019) para puzolanas calcinadas, la cual establece requerimientos químicos y físicos; para efecto de determinar y clasificar el

metakaolín en función de sus componentes luego del calentamiento se compararán los requisitos químicos.

La norma clasifica a las puzolanas en 3 categorías: Clase N, Clase F y Clase C, la utilizada para el caso del metakaolín es la Clase N que corresponde a puzolanas naturales crudas o calcinadas, y diferentes materiales que requieran calcinación como la arcilla. (ASTM C618-19, 2019)

Tabla 2.4. Tabla de requisitos químicos.

Requisitos Químicos			
	Clase		
	N	F	C
Dióxido de Silicio (SiO ₂) más óxido de aluminio (Al ₂ O ₃) más óxido de hierro (Fe ₂ O ₃), min %	70	50	50
Óxido de calcio (CaO), %	Solo informe	18 max	> 18
Trióxido de azufre (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Contenido de Humedad, max, %	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición, max, %	10.0	6.0 ^A	6.0
^A El uso de puzolana de clase F que contenga hasta un 12 % de pérdida por ignición puede ser aprobado por el usuario si se dispone de registros de rendimiento aceptables o de resultados de pruebas de laboratorio.			

Fuente: (ASTM C618-19, 2019)

2.4. Morteros

2.4.1. Elaboración de morteros

La mezcla de morteros se basa en la norma (ASTM C305-20, 2020) la cual especifica los requerimientos y el procedimiento para la elaboración de pastas y morteros por mezcla mecánica.

Equipo

La mezcladora debe ser mecánica de acción eléctrica con al menos 2 velocidades, el cual debe constar de paleta y tazón fácilmente removibles como muestra el esquema de la **Fig. 2.11.** (ASTM C305-20, 2020)

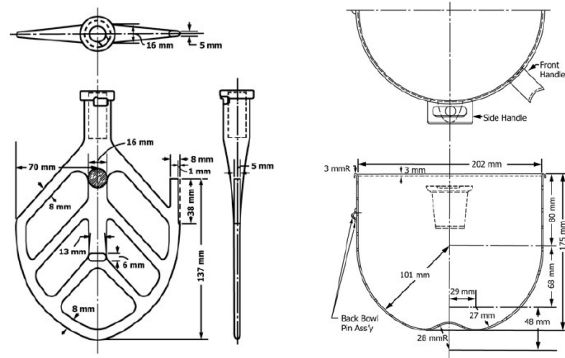


Fig. 2.11. Esquema de mezcladora mecánica (Paleta y Tazón)

Fuente: (ASTM C305-20, 2020)

Procedimiento

El procedimiento indica que en primer lugar se agrega el agua de mezclado, siendo añadido luego de este el cemento hasta que absorba agua por 30 segundos, posteriormente se inicia el mezclado mecánico a una velocidad baja ($140 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$) durante 30 segundos y se añade la arena en otro período de 30 segundos, se mezcla una vez más a una velocidad media ($285 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$) por 30 segundos, y una vez realizado esto se detiene la mezcladora por 90 segundos, en los que en los primeros 15 segundos se retira la mezcla que pudo quedarse adherido en los costados del tazón, para finalmente mezclar por 60 segundos a una velocidad media ($285 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$). (ASTM C305-20, 2020)



Fig. 2.12. Materiales para realización de especímenes de mortero.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.13. Mezcladora mecánica LEMSUR.

Foto: Luis Panamá

Consideraciones para Metakaolín

La elaboración de morteros con la sustitución parcial del metakaolín no modifica el procedimiento antes descrito, si no que se realiza una previa mezcla entre el cemento y el metakaolín antes de ser añadida en el tazón con el agua de mezclado.



Fig. 2.14. Cemento y metakaolín en la elaboración de morteros.

Foto: Luis Panamá

2.4.2. Ensayo de Flujo

El ensayo de flujo en morteros sigue las especificaciones contempladas en la norma (NTE INEN 2502, 2009), el cual en síntesis mide y calcula el incremento de la base del diámetro de la masa de mortero de manera porcentual, medido en una mesa de flujo, posterior a 25 caídas en 15 segundos.

Procedimiento

Se coloca el molde de flujo en el centro de la mesa y se añade el mortero en dos capas, siendo compactadas por el apisonador con 20 golpes en cada capa, se nivela con el enrasador hasta tener una superficie plana y luego el molde es retirado, dejando únicamente la mezcla de mortero en la mesa, luego de esto se deja caer la mesa 25 veces en 15 segundos a una velocidad constante, y una vez finalizado el proceso midiendo la base del diámetro inicial en el molde y 4 diámetros de la mezcla en las líneas guía de la mesa con un calibrador. (NTE INEN 2502, 2009)



Fig. 2.15. Ensayo de Flujo.

Foto: Luis Panamá

Cálculos

Se obtiene un valor promedio de los 4 diámetros medidos en la mesa de flujo y se lo divide para el diámetro inicial de la base en milímetros multiplicado por 100 para expresarlo en porcentaje. (NTE INEN 2502, 2009)

$$\%Flujo = \frac{A (mm)}{D_o (mm)} \cdot 100\%$$

A= Promedio de los 4 diámetros medidos con calibrador en mm.

Do= Diámetro inicial de la base en mm.

Consideraciones para Metakaolín

El ensayo de flujo se realiza específicamente en los morteros que servirán para la elaboración de especímenes patrón, por lo que los requisitos establecidos en la norma (NTE INEN 2502, 2009) aplican únicamente para estos, sin embargo, se realiza el ensayo de igual forma en las mezclas con sustitución parcial con metakaolín, de manera tal que se pueda identificar la variación de esta propiedad al ser añadida en la mezcla de mortero común.

2.4.3. Elaboración de especímenes de mortero

Se realizan especímenes cúbicos de 50 mm x 50 mm x 50 mm de acuerdo con la norma (NTE INEN 488, 2009) para una edad de curado de 56 días.

Procedimiento

Los cubos se compactan en 2 capas por apisonado en los moldes previamente aceitados, siguiendo un orden como se muestra en la **Fig. 2.16**, enrasando y retirando el exceso, se dejan reposar por un período de 24 h y se dejan curar un día en el molde para luego desencofrarse y sumergirse en agua saturada con cal, usando 3 g. de cal por cada litro de agua, hasta el momento de ser ensayados, aplicando progresivamente una carga de compresión y determinándose su resistencia. (NTE INEN 488, 2009)

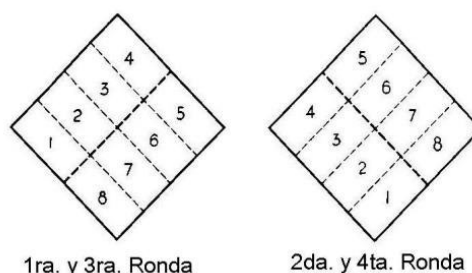


Fig. 2.16. Orden de apisonado.

Fuente: (NTE INEN 488, 2009)

Se funden un total de 48 cubos de mortero, siendo 3 cubos para cada tipo de ensayo, teniendo de esta manera 12 cubos para cada porcentaje de sustitución de metakaolín para un único ensayo a la edad de 56 días.



Fig. 2.17. Elaboración de especímenes cúbicos de mortero.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.18. Mortero compactado en molde.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.19. Cubos de mortero 10% Metakaolín 24 horas después de ser fundidos.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.20. Curado de los especímenes cúbicos en agua saturada con cal.

Foto: Luis Panamá

La dosificación correspondiente a la elaboración de cubos de morteros se detalla a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 2.5. Dosificación para elaboración de especímenes.

ELABORACIÓN ESPECÍMENES				
Nº CUBOS	3	6	9	OBSERVACIÓN
CEMENTO (g.)	250	500	740	Cemento Portland sin incorporador de aire (a/c=0,485)
ARENA (g.)	687.5	1375	2035	Cemento Portland sin incorporador de aire (a/c=0,485)
AGUA (g.)	121	242	359	Cemento Portland sin incorporador de aire (a/c=0,485)

Fuente: (NTE INEN 488, 2009)

Planificación de ensayo

Además, para los ensayos de permeabilidad se elaboran especímenes cilíndricos de diámetro 5 cm y altura 10 cm, con la misma mezcla de mortero usado en los especímenes cúbicos, siguiendo un proceso similar al ser compactado en 2 capas por apisonado, sin embargo, estos no tendrán el proceso de curado, para evitar que se encuentren saturados al momento de realizar el ensayo.



Fig. 2.21. Molde para especímenes cilíndricos D=500 mm y H=1000 mm.

Foto: Luis Panamá

Se realizan 2 especímenes cilíndricos de control o patrón, y 2 especímenes para cada porcentaje de sustitución, para un único ensayo de permeabilidad a los 56 días.



Fig. 2.22. Probetas cilíndricas de $D=500$ mm y $H=1000$ mm para ensayo de permeabilidad.

Foto: Luis Panamá

La elaboración de los especímenes se dividió en 2 dosificaciones, la Dosificación 1 correspondiente a la dosificación de la **Tabla 2.5** para 9 cubos, sin embargo, este volumen de mezcla sirvió como aproximación para elaborar 2 cilindros y 6 cubos; la Dosificación 2 corresponde a la dosificación de la **Tabla 2.5** para 6 cubos.

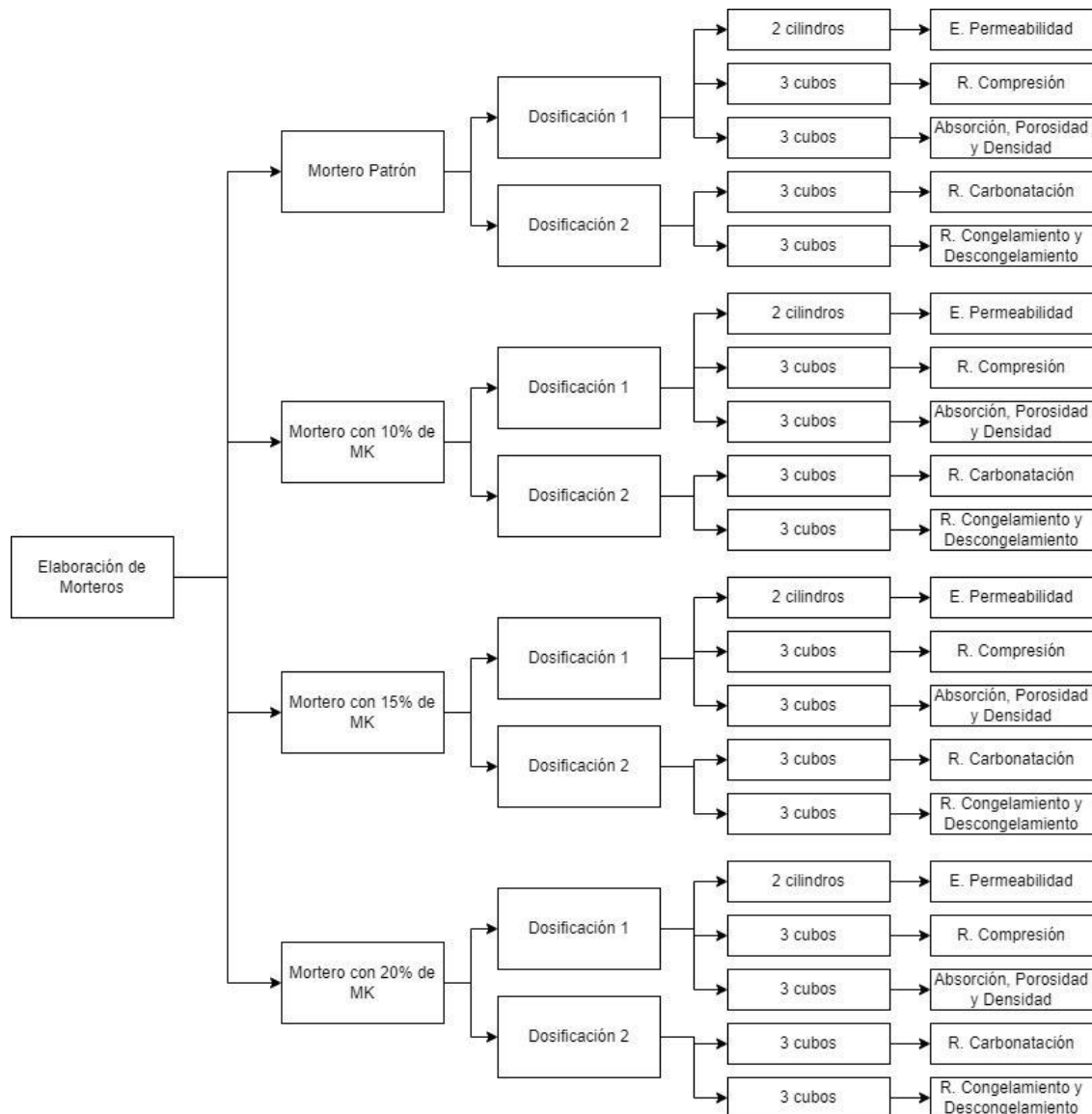


Fig. 2.23. Esquema de elaboración de Morteros.

Elaborado: Luis Panamá

2.4.4. Ensayo de Permeabilidad

Equipo

El equipo de ensayo de permeabilidad debe permitir que se observen las caras de la probeta con la finalidad de constatar alguna irregularidad o posibles filtraciones al momento de realizar el ensayo, además que permita aplicar la presión de agua de forma continua ya sea por la parte superior o inferior. (UNE EN 12390-8, 2020)

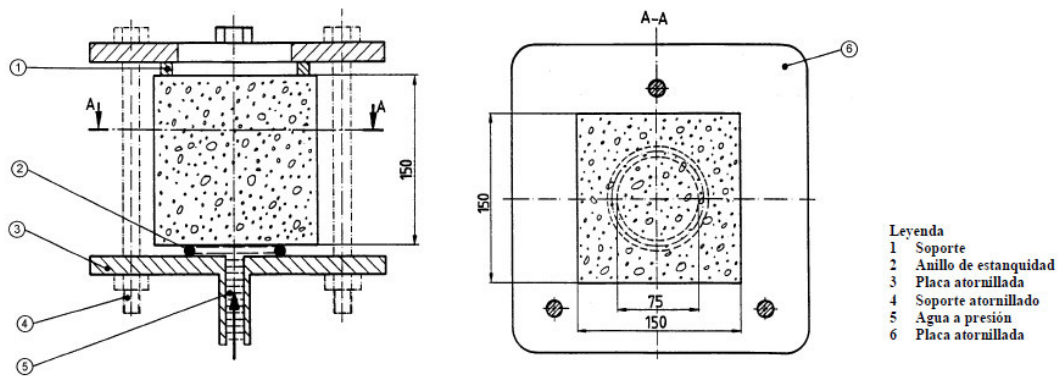


Fig. 2.24. Esquema de equipo de ensayo de permeabilidad.

Fuente: (UNE EN 12390-8, 2020)

Las probetas para ensayarse no deben ser menores a 150 mm según lo establece la norma, cumpliéndose dicho criterio dado que la medida del diámetro de las probetas de ensayo es de 500 mm.



Fig. 2.25. Probeta cilíndrica para ensayo de permeabilidad.

Foto: Luis Panamá

Procedimiento

El ensayo de permeabilidad consiste en obtener la profundidad de penetración del agua en probetas cilíndricas de mortero, en la cual es aplicada agua con una presión de (500 ± 50) kPa durante un tiempo de (72 ± 2) horas, observándose periódicamente para constatar la presencia de agua en la superficie de la probeta, luego de terminar el ensayo se retira el exceso de agua y se parte la probeta a la mitad de forma perpendicular a la cara que se

aplicó la presión de agua, se dejar secar las 2 mitades hasta que se pueda visualizar sin problema la profundidad de penetración de agua en la probeta, la cual debe ser medida y redondeada al mm más próximo. (UNE EN 12390-8, 2020)



Fig. 2.26. Espécimen cilíndrico en aparato de ensayo de permeabilidad.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.27. Manómetros a 500 kPa (72.51 PSI) en ensayo de permeabilidad.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.28. Rotura de especímenes cilíndricos a la mitad.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.29. Medición de profundidad de penetración de agua con calibrador.

Foto: Luis Panamá

2.4.5. Absorción, porosidad y densidad

El ensayo de absorción que se realizará en los cubos de mortero siguen los procedimientos descritos en la norma (ASTM C642-21, 2021), que abarca la determinación de la absorción, densidad y porosidad en muestras de hormigón endurecido, el cual consiste en la medición

de su masa antes y después de sumergirlo en agua durante un tiempo determinado, secándolo previamente en un horno, y posteriormente colocándose de nuevo en agua para ser hervida, midiendo de igual forma la masa, y con los datos obtenidos se realizan los cálculos respectivos con la finalidad de cuantificar las propiedades de absorción, porosidad y densidad. (ASTM C642-21, 2021)

Equipo

El equipo necesario para el ensayo de absorción de acuerdo con la norma consta de un horno que permita programar una temperatura de 110 °C, una balanza y un recipiente que permita sumergir y mantener en suspensión la muestra. (ASTM C642-21, 2021)

Procedimiento

- Masa seca en el horno: La muestra se deja secar en el horno a una temperatura de 110 °C por un período de 24 horas, dejándose que alcance una temperatura entre 20 °C y 25 °C en un desecador para ser medida su masa; se vuelve a colocar en el horno 24 horas más y se repite el proceso, la variación a comparación de la primera masa debe ser menor al 0.5 % y se toma el último valor como la masa seca, si no cumple este parámetro se repite el proceso, y se toma el último valor de masa seca como **A** una vez que cumpla la condición.
- Masa saturada después de inmersión: La muestra se deja sumergida en agua en un recipiente por un período de 48 horas, se mide su masa y se deja por 24 horas más, asegurándose que cumpla la condición del paso anterior con una variación menor al 0.5 %, y tomándose el último valor medido de la masa como **B**.
- Masa saturada después de ebullición: La muestra se sumerge en un recipiente con agua y se deja hervir durante 5 horas, tiempo después del cual se deja enfriar por un tiempo mínimo de 14 horas hasta que se alcance una temperatura entre 20 y 25 °C, se designa este valor como **C**.

- Masa aparente en suspensión: La muestra se suspende en agua en un recipiente con ayuda de un alambre, y se determina este valor de masa como **D**. (ASTM C642-21, 2021)



Fig. 2.30. Cubos en horno a 110 °C. Ensayo de Absorción.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.31. Cubos después de secado en el horno en desecador.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.32. Inmersión de las muestras.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.33. Muestras con agua en ebullición.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.34. Balanza para medición de masa aparente sumergida.

Foto: Luis Panamá

Cálculos

Con los valores de masa obtenidos y designados de acuerdo con lo expuesto en el procedimiento se realizan los cálculos respectivos, obteniendo los siguientes parámetros:

Absorción después de inmersión (A_i):

$$A_i (\%) = \left(\frac{B - A}{A} \right) \times 100$$

Absorción después de inmersión y ebullición (A_e):

$$A_e (\%) = \left(\frac{C - A}{A} \right) \times 100$$

Densidad global seca (ρ_s):

$$\rho_s (g/cm^3) = \left(\frac{A}{C - D} \right) \times \rho_{agua}$$

Densidad después de inmersión (ρ_i):

$$\rho_i (g/cm^3) = \left(\frac{B}{C - D} \right) \times \rho_{agua}$$

Densidad después de inmersión y ebullición (ρ_e):

$$\rho_e(g/cm^3) = \left(\frac{C}{C - D}\right) \times \rho_{agua}$$

Densidad aparente (ρ_a)

$$\rho_a(g/cm^3) = \left(\frac{A}{A - D}\right) \times \rho_{agua}$$

Volumen de vacíos (V_v)

$$V_v(\%) = \left(\frac{C - A}{C - D}\right) \times 100$$

Donde:

A: Masa seca en el horno (g)

B: Masa luego de inmersión en agua (g)

C: Masa después de inmersión y ebullición en agua (g)

D: Masa aparente sumergida (g)

ρ_{agua} : Densidad del agua (g/cm³)

2.4.6. Profundidad de carbonatación

El ensayo de profundidad de carbonatación mide la profundidad de carbonatación en una muestra de hormigón o mortero endurecido de acuerdo con la norma (UNE EN 112011, 2011), entendiéndose por carbonatación al proceso de pérdida de alcalinidad en un hormigón o mortero debido a la acción de componentes ácidos en la atmósfera, como lo es el dióxido de carbono (CO₂) y el azufre (SO₂); de esta manera el ensayo al basarse en la reducción de alcalinidad, es posible identificar este efecto mediante un indicador de pH, visible por su cambio de color.

La fenolftaleína adquiere un color púrpura al estar en contacto con superficies con ph mayor a 9.5 (no carbonatado), es incoloro con valores menores a un ph de 8 (carbonatado) y se torna de un color rosa entre un ph de 8 a 9.5. (González, E. & Alloza, A. M., s. f.)

Equipo

Se utiliza como indicador una disolución de fenolftaleína al 1%, disuelta en alcohol etílico al 70 por 100.

Procedimiento

Se somete las muestras a la intemperie durante 7 días una vez retiradas del agua de curado y de haber sido secadas sus superficies. Se realiza un corte en los especímenes que permitan observar la parte central de la muestra, en la que se rociará el indicador con ayuda de un pulverizador extendiendo una capa relativamente fina sobre la superficie de ambas caras, se observará como la parte carbonatada no sufre ningún cambio de color, sin embargo, la parte no carbonatada se teñirá de un color rosa o púrpura; luego de haberse aplicado el indicador y transcurrido 1 o 2 minutos y antes de los 15 minutos, se realiza la medición de la profundidad de carbonatación, este procedimiento no debe tardar más de 20 minutos. (UNE EN 112011, 2011)

La medición de la profundidad de carbonatación se realizará tomando medidas en cada arista si estas son homogéneas, en caso de que se tenga una forma irregular se determinará una profundidad media considerando la profundidad máxima y la profundidad mínima como se muestra en la **Fig. 2.35**. (UNE EN 112011, 2011)

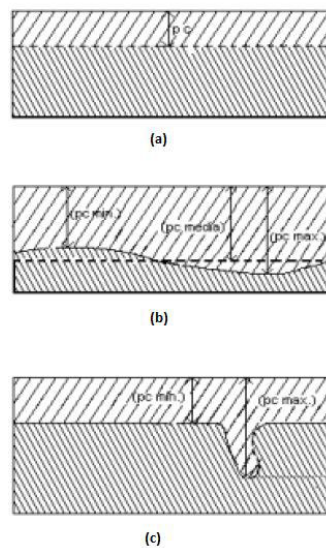


Fig. 2.35. Medida de la profundidad de carbonatación. (a) Para forma regular. (b) Para formas irregulares. (c) Para entradas irregulares.

Fuente: (UNE EN 112011, 2011)



Fig. 2.36. Muestras de 56 días partidas a la mitad luego de ser expuestas al ambiente durante 7 días.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.37. Medición de zona carbonatada luego de ser rociada con Fenolftaleína.

Foto: Luis Panamá

El mismo procedimiento se lo realizará con las muestras cilíndricas que fueron expuestas a 56 días a la intemperie y luego de haber sido realizado el ensayo de permeabilidad, midiendo y reportándose como resultados la profundidad de carbonatación, considerando además que estas muestras no fueron sometidas al proceso de curado.



Fig. 2.38. Medición de zona carbonatada en espécimen cilíndrico con calibrador.

Foto: Luis Panamá

2.4.7. Resistencia a la congelación y descongelación rápida

El ensayo de resistencia a la congelación y descongelación rápida permite determinar los efectos de esta variación de temperatura en las propiedades de hormigones y morteros (ASTM C666-15, 2015), considerando además que este fenómeno es recurrente en climas con heladas como los que se encuentra en la sierra ecuatoriana.

Equipo

El aparato de congelación y descongelación debe disponer del espacio adecuado que pueda albergar los especímenes que serán sometidos al ciclo de congelación y descongelación especificado, junto con el equipo de refrigeración y calefacción de manera que se puedan tener ciclos reproducibles de forma continua. (ASTM C666-15, 2015)

Procedimiento

El método que permite determinar la resistencia a ciclos de congelación y descongelación se obtiene de acuerdo con 2 procedimientos distintos.

- Procedimiento A: El congelamiento y deshielo se realiza en agua.
- Procedimiento B: El congelamiento se produce en aire y el deshielo en agua.

Para efecto de realización de este ensayo se tomó como guía la norma (ASTM C666-15, 2015) y diferentes investigaciones de concreto con sustitución de materiales cementantes

suplementarios, de manera que se realizaron ciertas modificaciones para adecuar los especímenes cúbicos al proceso de congelamiento y descongelamiento. Por consiguiente, se realizó un ciclo de congelamiento y descongelamiento en el que las muestras son sometidas al ciclo de congelamiento durante 12 horas a temperaturas entre 0 °C y -5 °C tratando de reproducir las bajas temperaturas de la sierra ecuatoriana, y un ciclo de descongelamiento de 12 horas, de los cuales 2 horas se los deja bajo sombra, 4 horas expuestas directamente a la luz solar si las condiciones lo permiten y 6 horas con descongelamiento en agua. (Tagle Arizaga & Zapana Matheus, 2017)



Fig. 2.39. Refrigerador CICAM a 0° C con muestras.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.40. Ciclo de descongelamiento. Fase de exposición a luz solar.

Foto: Luis Panamá

Una vez completado el ciclo de congelamiento y descongelamiento se procede a una evaluación visual de los especímenes y reportando si existen variaciones significativas en

su superficie, posteriormente se realiza el ensayo de resistencia a la compresión con la finalidad de comprobar la diferencia de esta propiedad debido al ciclo de congelamiento y descongelamiento.



Fig. 2.41. Evaluación visual luego de ciclo de congelamiento.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.42. Muestras luego de ciclo de descongelamiento.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.43. Muestra luego de ensayo de compresión cúbica.

Foto: Luis Panamá

2.4.8. Resistencia a la Compresión Cúbica

La resistencia a la compresión cúbica es uno de los parámetros principales en cuanto a la determinación de las propiedades mecánicas de morteros, este procedimiento se realiza de conformidad con la norma (NTE INEN 488, 2009) usando cubos de 50 mm de arista.

Equipo

La máquina de ensayo debe ser de tipo hidráulico o de tornillo, que permita la lectura de la carga con una precisión dentro del 1%, y con un incremento de al menos 0.1% de la carga total de la escala, además la superficie de apoyo inferior y superior deben ser lisos y de metal endurecido montado adecuadamente. (NTE INEN 488, 2009)

Procedimiento

- Se deben ensayar los especímenes inmediatamente luego de ser retiradas del agua de curado, para lo cual se debe secar todas las caras eliminando granos sueltos o incrustaciones, asegurándose a su vez que las caras que estarán en contacto con los bloques de apoyo sean superficies planas y sin ninguna curvatura.
- Con ayuda de un calibrador se miden las dimensiones A y B que corresponden a la sección transversal de la cara de apoyo, además de la dimensión C que corresponde a la altura perpendicular a la cara de apoyo, registrándose de igual manera el peso de cada espécimen.
- Se coloca con cuidado la muestra en la máquina de ensayo de manera que se encuentre centrado bajo el cabezal del apoyo superior y perfectamente nivelado.

- Aplicar la carga con un incremento uniforme de velocidad entre ambos cabezales hasta alcanzar una carga entre 900 y 1800 N/s, y registrar el valor de la carga cuando se produzca la falla. (NTE INEN 488, 2009)



Fig. 2.44. Medición de dimensiones de cubos con calibrador.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.45. Equipo de Compresión Cúbica.

Foto: Luis Panamá



Fig. 2.46. Falla por compresión cúbica en morteros.

Foto: Luis Panamá

Cálculos

La resistencia a la compresión para los cubos de 50 mm de arista se lo calcula mediante la siguiente fórmula:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde:

fm: Resistencia a la compresión en MPa.

P: Carga total máxima de falla en N.

A: Área de la sección transversal en la que se aplica la carga, en mm².

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. Resultados

3.1.1. Propiedades del Metakaolín

Se determinó la pérdida de masa por ignición para el Metakaolín obtenido luego del calentamiento de la arcilla caolinita a una temperatura de 800 °C, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 3.1. Resultados de pérdida de masa luego de calentamiento de arcilla caolinita.

Arcilla Caolinita (g)	Metakaolín (g)	Pérdida de masa (%)	Promedio (%)
1240.6	1106.6	10.8	10.6
1302.1	1176.4	9.7	
1159.3	1031.9	11.0	
1314.2	1172.2	10.8	

Elaborado: Luis Panamá

Con el valor de 10.6% de pérdida por ignición, la muestra de metakaolín se encuentra al límite del valor máximo establecido en la **Tabla 2.4**, por lo que cumple dicha condición para puzolana calcinada Clase N.

3.1.2. Flujo en Morteros

La mezcla de mortero para cada porcentaje y patrón se dividió en 2 partes, una dosificación para 9 especímenes cúbicos con el cual se fundieron 6 cubos y 2 cilindros, y una dosificación para 6 especímenes cúbicos de manera tal que se cubra la fundición de 12 cubos y 2 cilindros para cada grupo.

Tabla 3.2. Dosificación 1 para 9 cubos.

Fuente: (NTE INEN 488, 2009)

Dosificación 1		
Agua	359	g
Arcilla	0	g
Arena	2035	g
Cemento	740	g
a/c	0.485	

Elaborado: Luis Panamá

Tabla 3.3. Dosificación 2 para 6 cubos.

Fuente: (NTE INEN 488, 2009)

Dosificación 2		
Agua	242	g
Arcilla	0	g
Arena	1375	g
Cemento	500	g
a/c	0.484	

Elaborado: Luis Panamá

De esta manera se realizó el ensayo flujo de la mezcla de mortero para las 2 dosificaciones que se usaron en la elaboración de los especímenes.

3.1.2.1. Mortero Patrón

En el mortero patrón para la dosificación 1 se obtuvo un flujo del 107.63 %.

Tabla 3.4. Resultado ensayo de flujo para mortero patrón. Dosificación 1.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	210.50	mm
Df2	205.00	mm
Df3	209.40	mm
Df4	205.60	mm
Df	207.63	mm
%	107.63	

Elaborado: Luis Panamá

En tanto que para la dosificación 2 se tiene un flujo de 114.81%.

Tabla 3.5. Resultados ensayo de flujo para mortero patrón. Dosificación 2.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	213.65	mm
Df2	215.30	mm
Df3	214.80	mm
Df4	215.50	mm
Df	214.81	mm
%	114.81	

Elaborado: Luis Panamá

3.1.2.2. Mortero con 10% de sustitución con Metakaolín

La muestra de mortero que se encuentra con una sustitución parcial del 10% de metakaolín en la primera dosificación presentó un flujo de 101.90 %.

Tabla 3.6. Resultados ensayo de flujo para mortero con 10% de metakaolín. Dosificación 1.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	200.20	mm
Df2	199.60	mm
Df3	202.40	mm
Df4	205.40	mm
Df	201.90	mm
%	101.90	

Elaborado: Luis Panamá

En tanto para la segunda dosificación se obtuvo un flujo de 104.18 %.

Tabla 3.7. Resultados ensayo de flujo para mortero con 10% de metakaolín. Dosificación 2.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	203.10	mm
Df2	208.60	mm
Df3	205.60	mm
Df4	199.40	mm
Df	204.18	mm
%	104.18	

Elaborado: Luis Panamá

3.1.2.3. Mortero con 15% de sustitución con Metakaolín

El mortero con 15% de sustitución parcial con metakaolín refleja los siguientes resultados, obteniendo un flujo de 97.55 % para la dosificación 1.

Tabla 3.8. Resultados ensayo de flujo para mortero con 15% de metakaolín. Dosificación 1.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	196.80	mm

Df2	197.70	mm
Df3	198.10	mm
Df4	197.60	mm
Df	197.55	mm
%	97.55	

Elaborado: Luis Panamá

Mientras que para la dosificación 2 del mismo porcentaje de sustitución de 15% de metakaolín se obtuvo un porcentaje de 93.01 %.

Tabla 3.9. Resultados ensayo de flujo para mortero con 15% de metakaolín. Dosificación 2.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	194.90	mm
Df2	190.75	mm
Df3	193.60	mm
Df4	192.80	mm
Df	193.01	mm
%	93.01	

Elaborado: Luis Panamá

3.1.2.4. Mortero con 20% de sustitución con Metakaolín

El valor de flujo para la muestra de mortero con 20% de sustitución con metakaolín para la dosificación 1 es de 89.78 %.

Tabla 3.10. Resultados ensayo de flujo para mortero con 20% de metakaolín. Dosificación 1.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	193.40	mm
Df2	189.30	mm
Df3	187.70	mm
Df4	188.70	mm
Df	189.78	mm
%	89.78	

Elaborado: Luis Panamá

De la misma forma para la dosificación 2 con el porcentaje de 20% de sustitución con metakaolín se obtuvo un flujo de 94.58%.

Tabla 3.11. Resultados ensayo de flujo para mortero con 20% de metakaolín. Dosificación 2.

Ensayo de Flujo		
Do	100	mm
Df1	196.40	mm
Df2	195.70	mm
Df3	193.30	mm
Df4	192.90	mm
Df	194.58	mm
%	94.58	

Elaborado: Luis Panamá

3.1.2.5. Resultados finales de Flujo

Realizando un promedio de los valores obtenidos para cada dosificación se obtiene un valor de flujo en porcentaje para cada muestra de mortero.

Tabla 3.12. Resultados de flujo en morteros.

Muestra	Flujo (%)	
Patrón	107.63	111.22 %
	114.81	
MK10%	101.90	103.04 %
	104.18	
MK15%	97.55	95.28 %
	93.01	
MK20%	89.78	92.18 %
	94.58	

Elaborado: Luis Panamá

Representando gráficamente los resultados de la **Tabla 3.12** se observa un decrecimiento en el valor de flujo en porcentaje a medida que el porcentaje de sustitución con metakaolín aumenta.

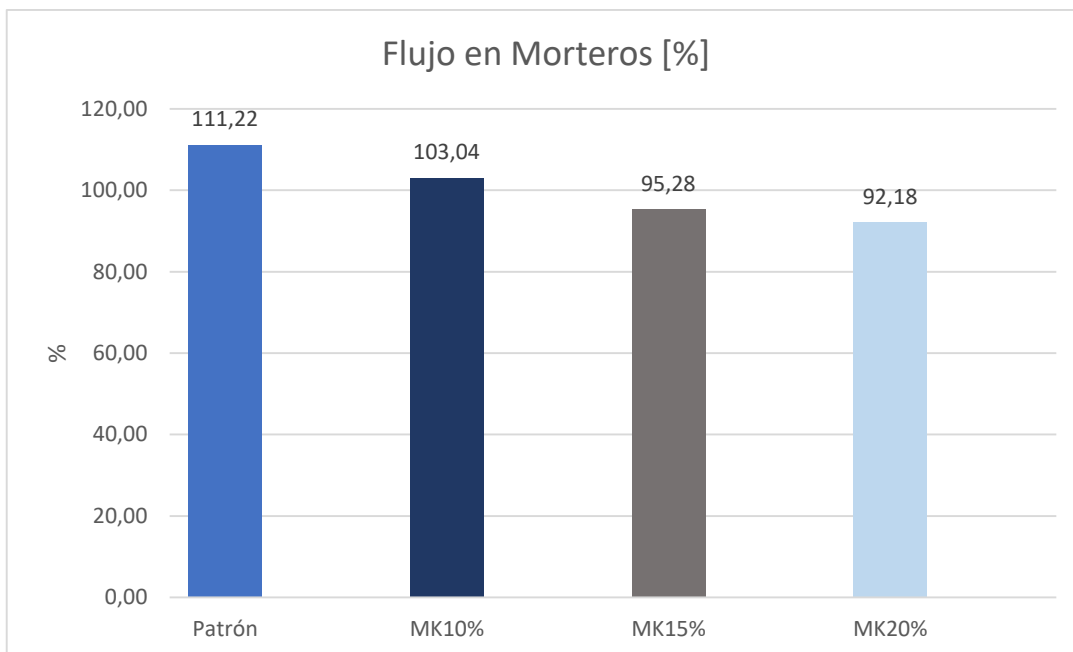


Fig. 3.1. Flujo en morteros.

Elaborado: Luis Panamá

3.1.3. Resistencia a la compresión cúbica.

Se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a la compresión de cubos de mortero para cada uno de los porcentajes de sustitución y el mortero patrón.

Tabla 3.13. Resultados de Compresión Cúbica.

Muestra	Esfuerzo (MPa)
Patrón	28.42
MK10%	31.84
MK15%	23.50
MK20%	31.68

Elaborado: Luis Panamá

Los resultados de la **Tabla 3.13** se representan gráficamente en la **Fig. 3.2**, visualizando la mayor resistencia con un valor de 31.84 MPa para un porcentaje de sustitución de 10%, y se observa un descenso de resistencia para el porcentaje de 15%, y un aumento de

resistencia nuevamente para el porcentaje de 20% de sustitución, por lo que a comparación del mortero patrón el mortero con sustitución del 10% registra un incremento de resistencia en un 12%.

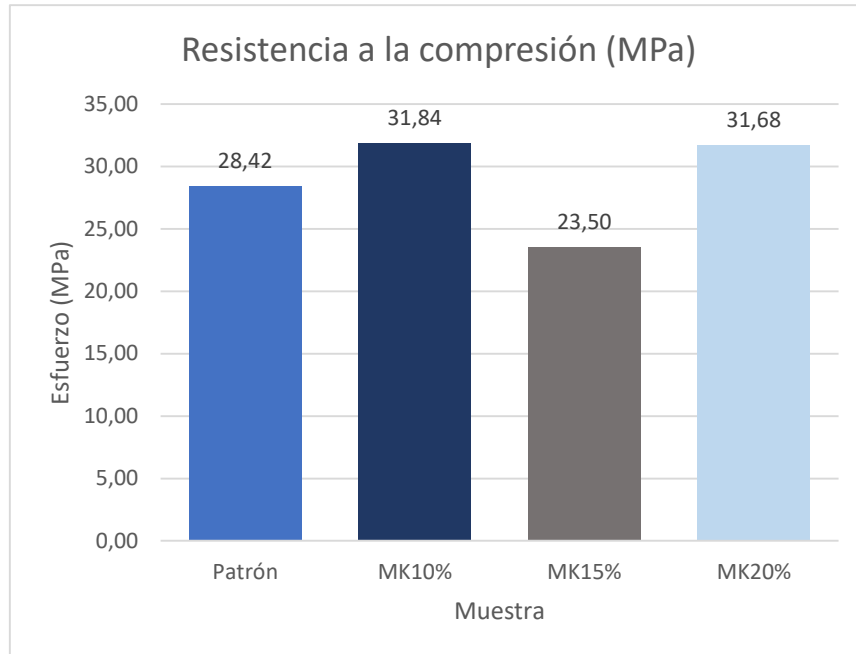


Fig. 3.2. Resistencia a la compresión cúbica.

Elaborado: Luis Panamá

3.1.4. Difracción por Rayos X

3.1.4.1. Difracción en muestra de arcilla caolinita cruda y en metakaolín

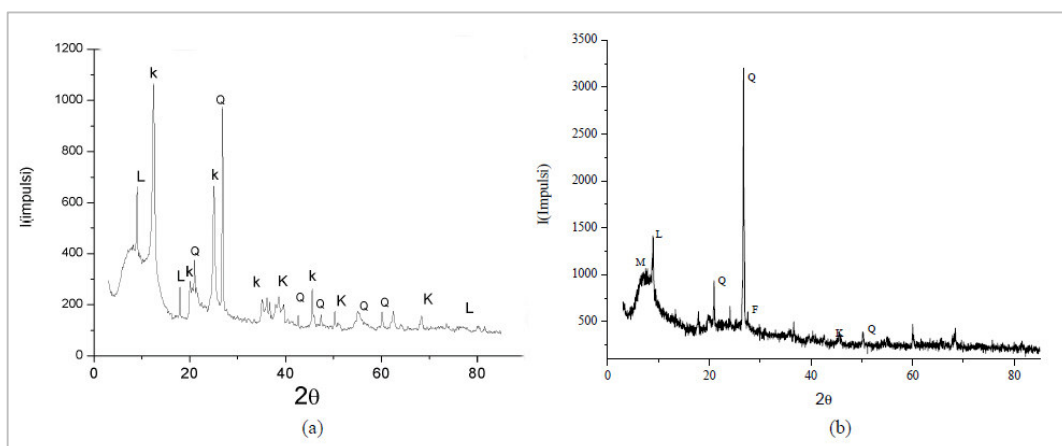


Fig. 3.3. Patrón de arcilla caolinita inicial (a) y patrón de metakaolín (b).

Elaborado: Luis Panamá

En la **Fig. 3.3** es posible identificar los distintos componentes mineralógicos mediante la siguiente nomenclatura: K-Caolinita, Q-Cuarzo, L-Mica, F-Feldespato, M-Montmorillonita; de esta manera se tiene mayor presencia de caolinita, cuarzo y mica en la arcilla inicial, y posterior al calentamiento a una temperatura de 800 °C al producir metakaolín, los picos de caolinita desaparecen, observando principalmente cuarzo, mica y feldespato.

3.1.4.2. Difracción en muestras de mortero

Los ensayos de difracción se realizaron para cada una de las muestras de mortero, tanto para el patrón, y los porcentajes de sustitución de 10%, 15%, 20%, obteniéndose las siguientes gráficas que representan los compuestos principales en su composición.

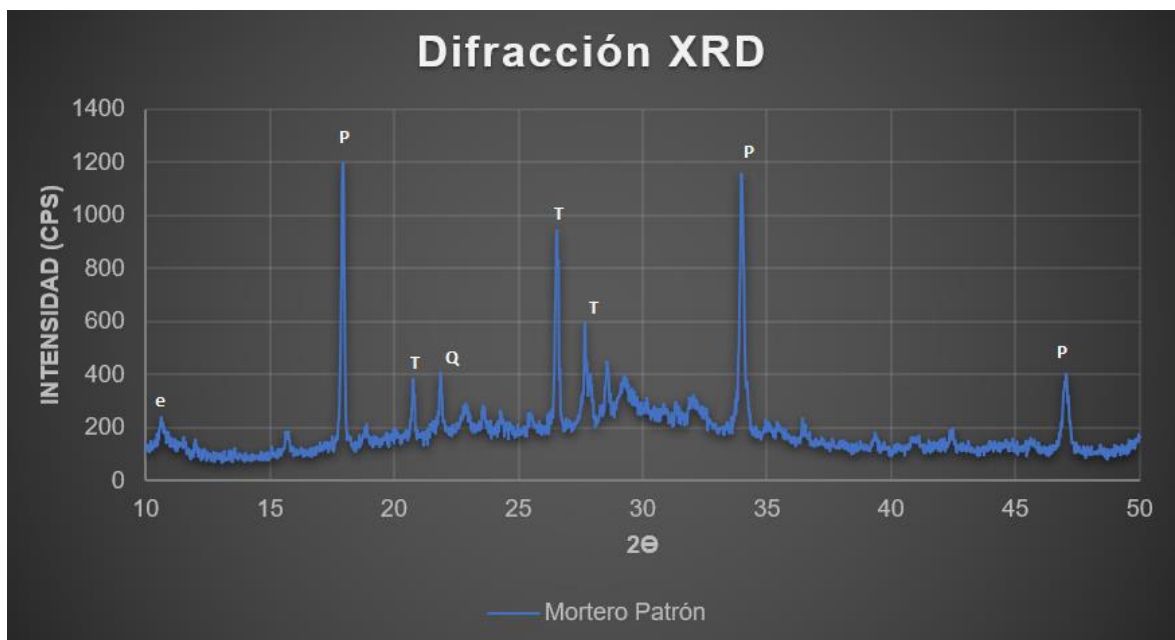


Fig. 3.4. Resultados de Difracción XRD para Mortero Patrón 56 días.

Elaborado: Luis Panamá

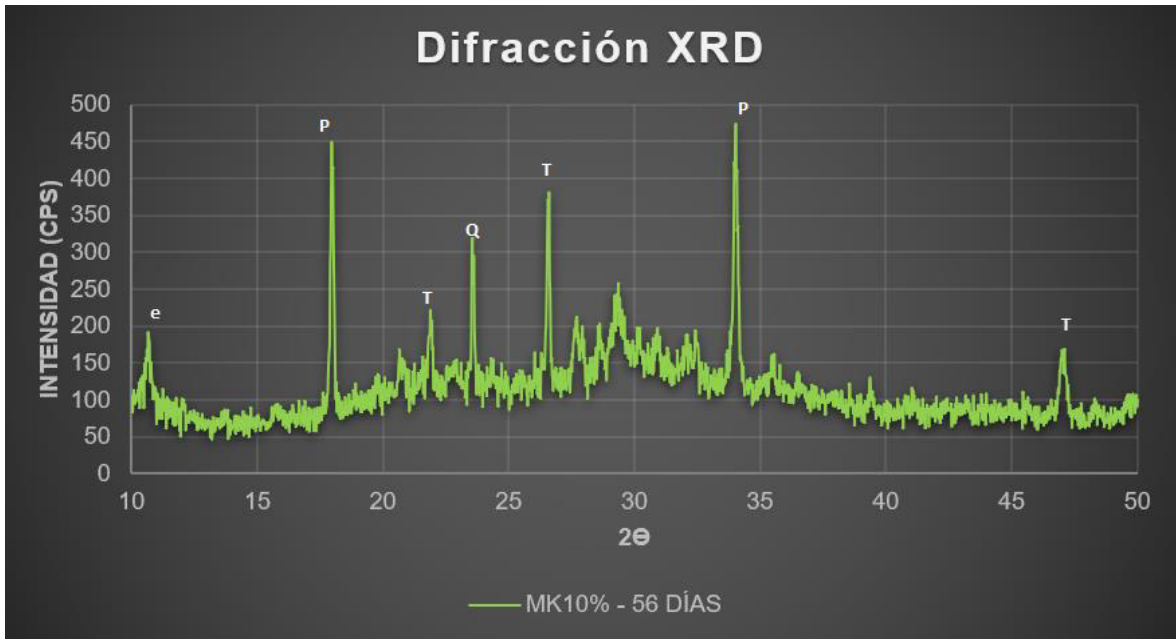


Fig. 3.5. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 10% de Metakaolín 56 días.

Elaborado: Luis Panamá

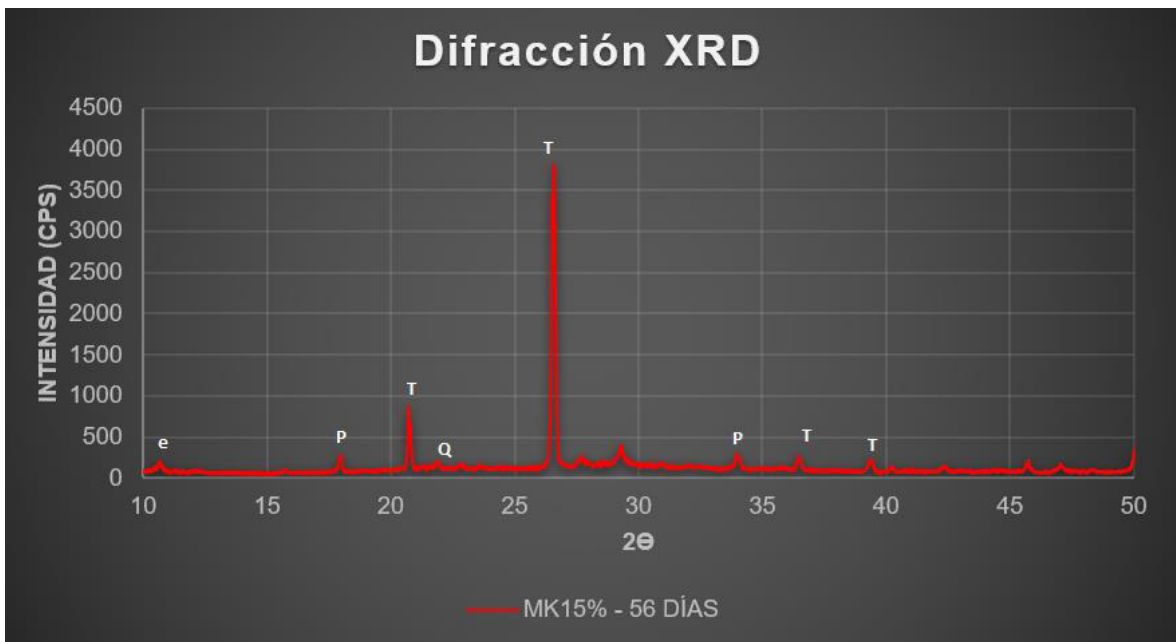


Fig. 3.6. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 15% de Metakaolín 56 días.

Elaborado: Luis Panamá

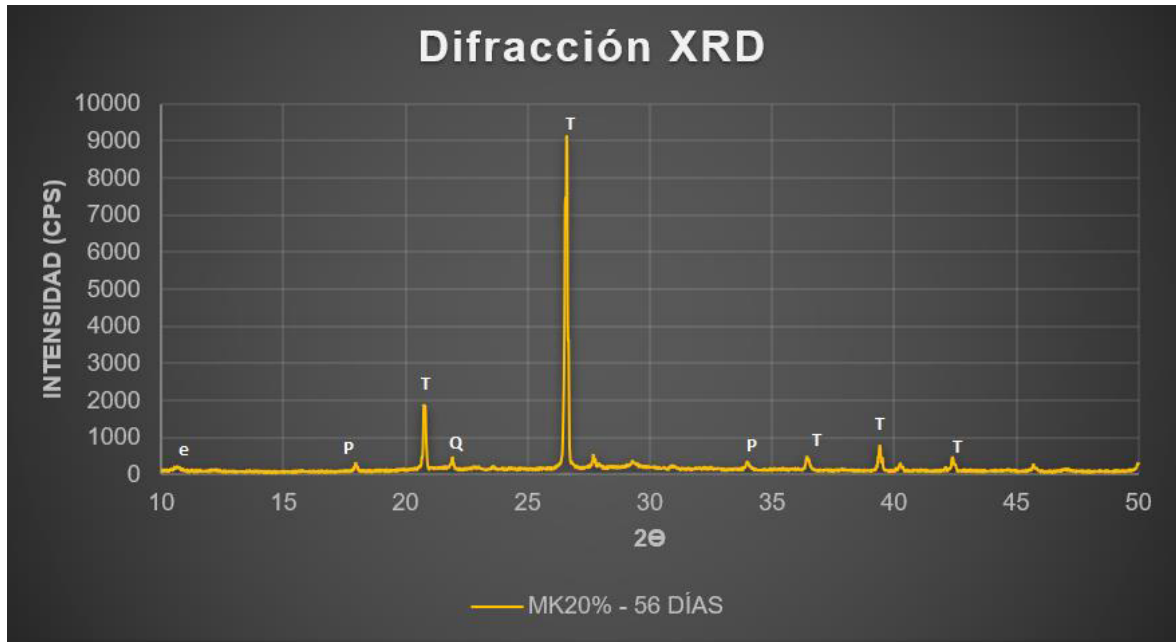


Fig. 3.7. Resultados de Difracción XRD para Mortero con 20% de Metakaolín 56 días.

Elaborado: Luis Panamá

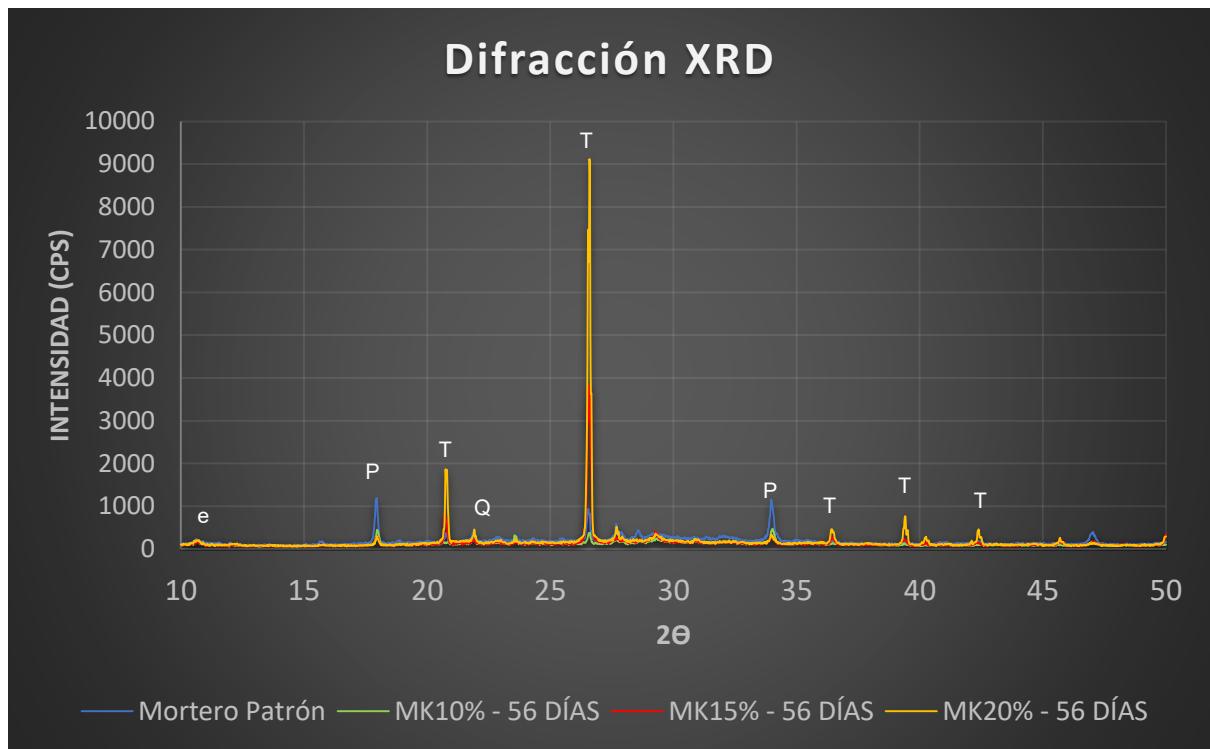


Fig. 3.8. Gráfica de comparación de resultados de difracción.

Elaborado: Luis Panamá

Los picos más representativos se pueden notar en la **Fig. 3.8**, teniendo etringita en el rango de 2θ de 10 a 15, portlandita entre 15 a 20 y 30 a 35, tobermorita de 20 a 25 y de 25 a 30, y finalmente cuarzo entre 20 y 25, extrayendo los valores de intensidad de los datos que arroja el difractómetro, los cuales se muestran en la **Tabla 3.14**.

Tabla 3.14. Valores de intensidad de compuestos en muestras de mortero a 56 días.

Compuesto		Rango 2θ		Mortero Patrón - 56 días	Metakaolín 10% - 56 días	Metakaolín 15% - 56 días	Metakaolín 20% - 56 días
e:	Etringita	10	15	239	191	212	215
p:	Portlandita	15	20	1192	450	307	299
T:	Tobermorita	20	25	383	168	864	1867
Q:	Cuarzo	20	25	405	319	329	456
T:	Tobermorita	25	30	940	380	3812	9117
p:	Portlandita	30	35	1153	473	292	344

Elaborado: Luis Panamá

Los resultados se muestran gráficamente para una mayor apreciación de la variación de los compuestos en las muestras.

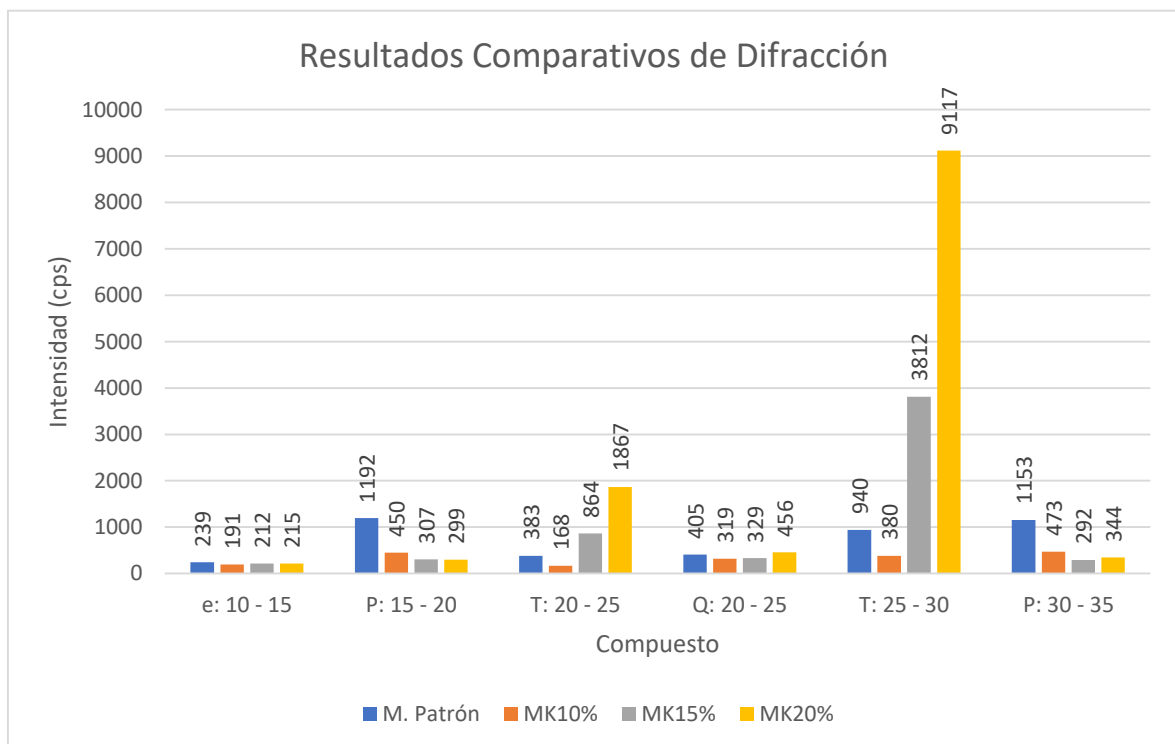


Fig. 3.9. Resultados comparativos de Difracción.

Elaborado: Luis Panamá

De acuerdo con la gráfica de la **Fig. 3.9** la presencia de etringita en la muestra disminuye a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de metakaolín, esto debido a que este mineral se forma por la hidratación del cemento en el fraguado, y al disminuir la proporción de cemento en la mezcla la cantidad de etringita decrecerá, observándose el valor mínimo en el porcentaje de 10% con un valor de 191; de la misma forma se tiene el mismo comportamiento en cuanto a la portlandita en el rango de 15 y 20, mineral el cual está asociado a la hidratación del silicato bicálcico y tricálcico; por otro lado, es posible evidenciar el incremento de la presencia de tobermorita para los porcentajes de 15% y 20%, mineral el cual es responsable de la resistencia.

3.1.5. Ensayo de Absorción, Densidad y Porosidad

Una vez realizado el ensayo de acuerdo con la norma (ASTM C642-21, 2021) se obtuvieron resultados de los siguientes parámetros:

Tabla 3.15. Resultados de ensayo de absorción.

PROPIEDAD	M. Patrón	MK10%	MK15%	MK20%
ABSORCION DESPUES DE INMERSIÓN (%)	8.1	7.4	7.7	7.2
ABSORCIÓN DESPUÉS DE INMERSION Y EBULLICIÓN (%)	8.2	7.4	7.5	7.2
DENSIDAD GLOBAL SECA (g/cm3)	2.0	2.1	2.0	2.0
DENSIDAD DESPUES DE INMERSIÓN (g/cm3)	2.2	2.2	2.2	2.2
DENSIDAD DESPUÉS DE INMERSIÓN Y EBULLICIÓN (g/cm3)	2.2	2.2	2.2	2.2
DENSIDAD APARENTE (g/cm3)	2.4	2.4	2.4	2.4
VOLUMEN DE VACÍOS (%)	16.6	15.2	15.4	14.8

Elaborado: Luis Panamá

Se puede notar con los valores presentados en la **Tabla 3.15** que la absorción después de la inmersión y después de la inmersión y ebullición obtiene su valor mínimo de 7.2% para un porcentaje de sustitución del 20% en ambas propiedades, reduciéndose en un 11% y 12% respectivamente.

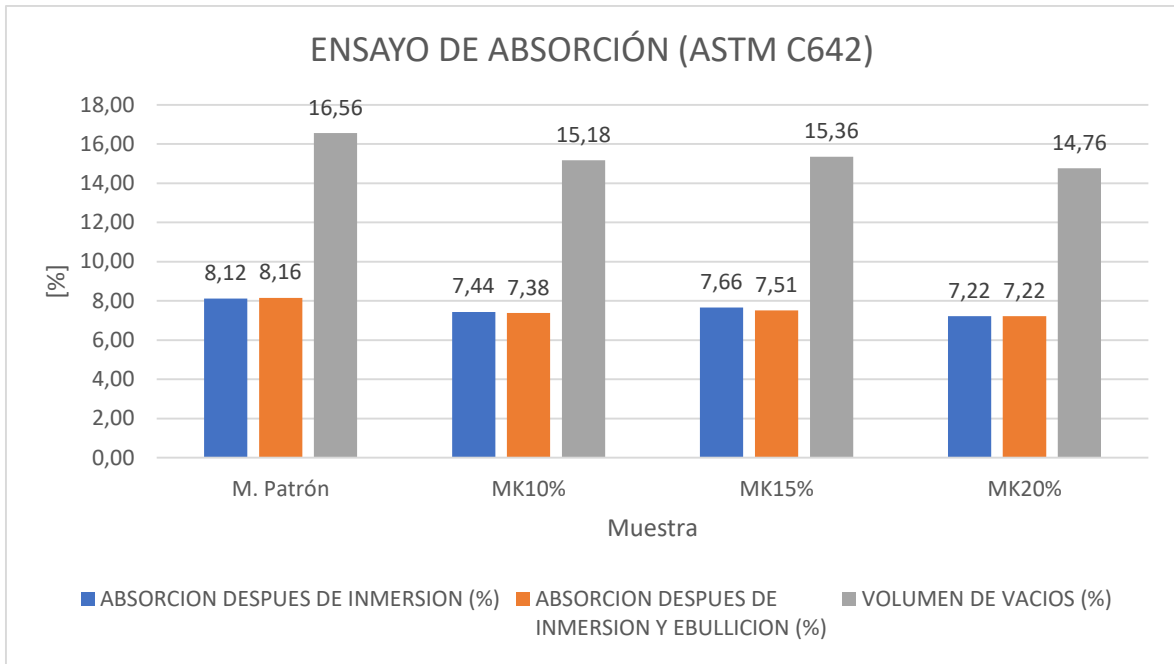


Fig. 3.10. Gráfica de barras de resultados de ensayo de absorción [%].

Elaborado: Luis Panamá

El porcentaje de volumen de vacíos obtiene un similar comportamiento, siendo el menor para un porcentaje de sustitución del 20% con un valor de 14.8%.

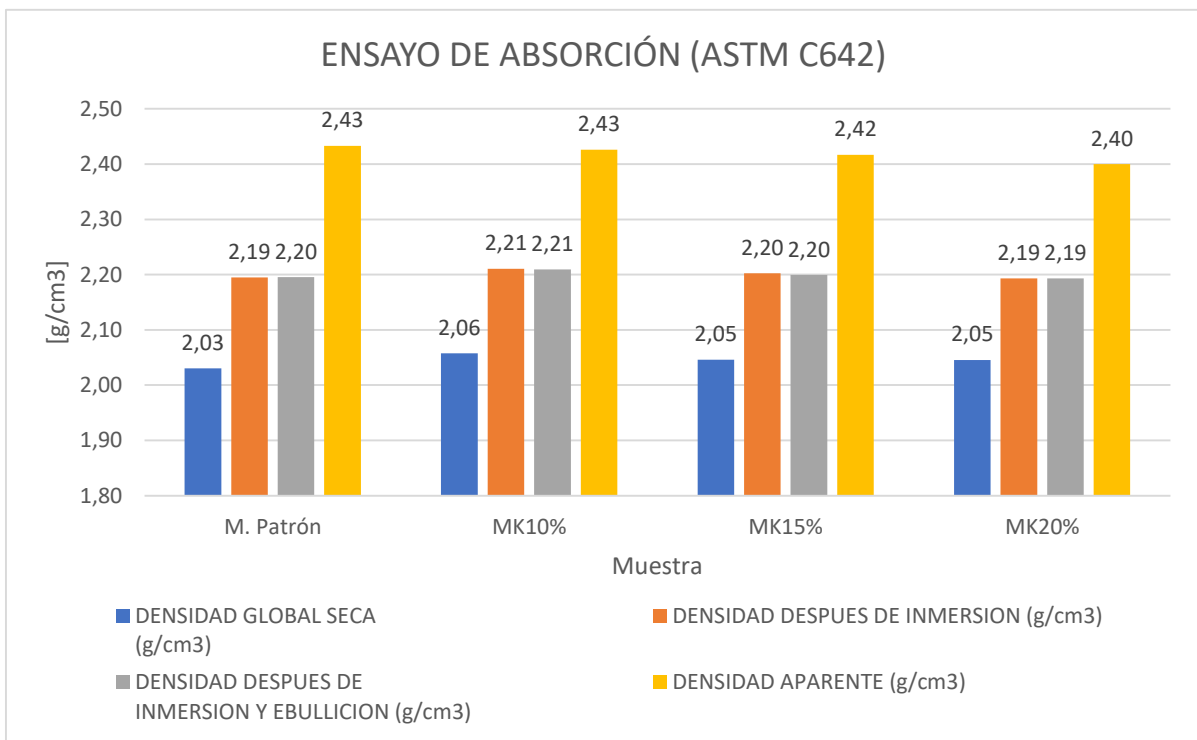


Fig. 3.11. Gráfica de barras de resultado de ensayo de absorción. [g/cm3]

Elaborado: Luis Panamá

En cuanto a propiedades como la densidad global seca, densidad después de inmersión, densidad después de inmersión y ebullición y la densidad aparente de las muestras, los valores de resultados difieren mínimamente.

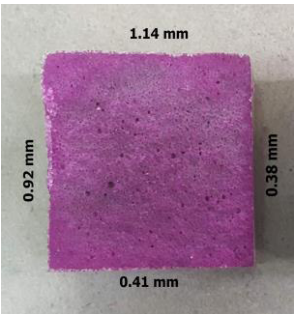
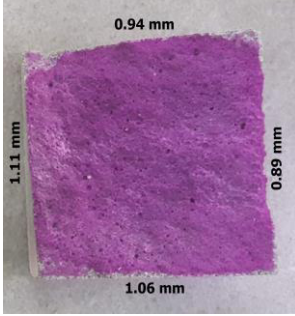
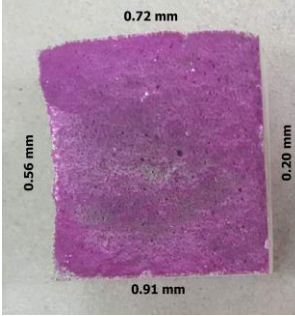

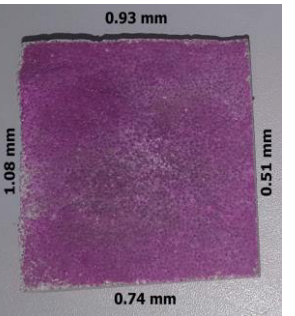
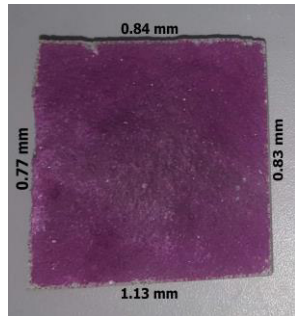
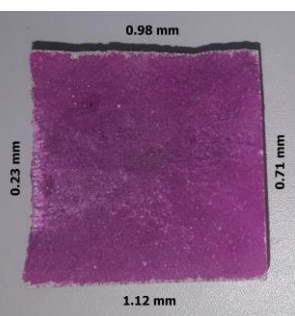
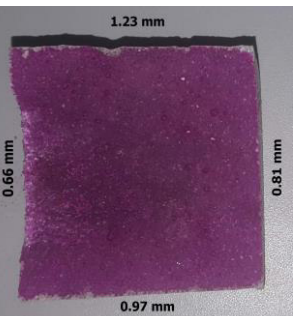
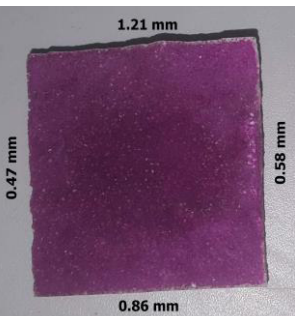
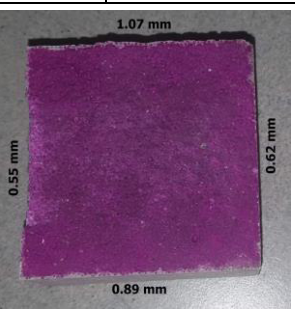
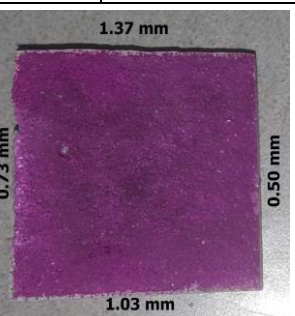
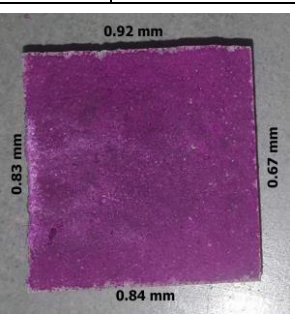
3.1.6. Profundidad de Carbonatación

El ensayo de profundidad de carbonatación se realizó para 2 tipos de muestras, especímenes cúbicos y cilíndricos:

- Los cubos de mortero estuvieron en agua de curado por 56 días, a partir de los cuales se los retiró y secó adecuadamente dejando que estén expuestos a la intemperie durante 7 días antes de realizar el ensayo.
- Los especímenes cilíndricos estuvieron expuestos a la intemperie durante 56 días sin estar en agua de curado, además la profundidad de carbonatación se lo realizó luego de que en estas se haya realizado el ensayo de permeabilidad.

3.1.6.1. Profundidad de carbonatación en cubos de mortero

Tabla 3.16. Resultados de profundidad de carbonatación en cubos.

	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Mortero Patrón			
	Máx: 1.14 mm	Máx: 1.11 mm	Máx: 0.91 mm
Metakaolín 10%			
	Máx: 1.17 mm	Máx: 0.93 mm	Máx: 1.13 mm
Metakaolín 15%			
	Máx: 1.12 mm	Máx: 1.23 mm	Máx: 1.21 mm
Metakaolín 20%			
	Máx: 1.07 mm	Máx: 1.37 mm	Máx: 0.92 mm

Elaborado: Luis Panamá

Tabla 3.17. Resultados de valores promedio de profundidad de carbonatación en cubos de mortero a 56 días.

Muestra	Profundidad de carbonatación (mm)
Mortero Patrón	1.05
Metakaolín 10%	1.08
Metakaolín 15%	1.19
Metakaolín 20%	1.12


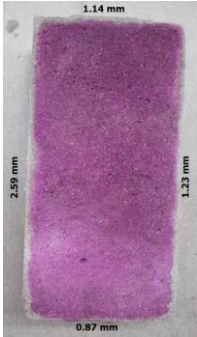
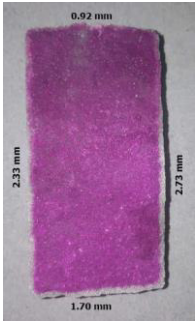
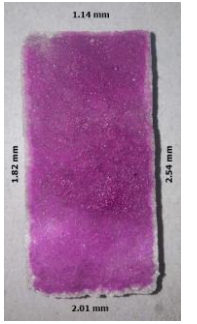
Elaborado: Luis Panamá

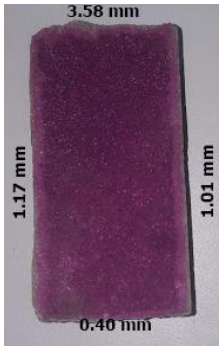
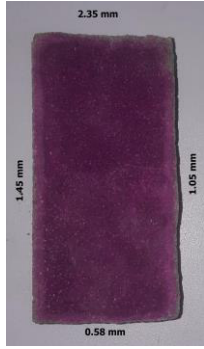


La **Tabla 3.17** refleja los resultados de los valores promedios obtenidos de profundidad de carbonatación, observando un incremento máximo en el porcentaje de sustitución de 15%, con un valor de 1.19 mm como valor máximo promedio, a diferencia del mortero patrón con un valor de 1.05 mm.

3.1.6.2. Profundidad de carbonatación en cilindros de mortero

Los resultados de profundidad de carbonatación en este caso se lo realizaron para cilindros que no tuvieron el proceso de curado, midiéndose los resultados a los 56 días.

Tabla 3.18. Resultados de profundidad de carbonatación en cilindros.

	Muestra 1	Muestra 2
Mortero Patrón		
	Máx: 2.14 mm	Máx: 2.59 mm
Metakaolín 10%		
	Máx: 2.73 mm	Máx: 2.54 mm

Metakaolín 15%		
	Máx: 3.58 mm	Máx: 2.35 mm
Metakaolín 20%		
	Máx: 2.06 mm	Máx: 3.87 mm

Elaborado: Luis Panamá

Tabla 3.19. Resultados de valores promedio de profundidad de carbonatación en cilindros de mortero a 56 días.

Muestra	Profundidad de carbonatación (mm)
Mortero Patrón	2.37
Metakaolín 10%	2.64
Metakaolín 15%	2.97
Metakaolín 20%	2.97

Elaborado: Luis Panamá

Los resultados de profundidad de carbonatación en cilindros presentados en la **Tabla 3.19** muestran un incremento máximo para los porcentajes de sustitución de 15% y 20%, con un valor de 2.97 mm a comparación del mortero patrón que tiene un valor de 2.37 mm, teniendo así un incremento del 25.32 %.

3.1.7. Resistencia a congelación y descongelación rápida

Luego de haberse realizado el ciclo de congelamiento y descongelamiento rápido a los cubos de mortero se realizó la compresión cúbica de los mismos obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3.20. Resultados de compresión cúbica luego de congelación y descongelación.

Muestra	Esfuerzo (MPa)
Patrón	31.44
MK10%	32.63
MK15%	28.45
MK20%	30.63

Elaborado: Luis Panamá

Graficando los valores de resultados mostrados en la **Tabla 3.20** se puede evidenciar la misma tendencia de la **Fig. 3.2**, teniendo una reducción en la resistencia para el mortero con un porcentaje de sustitución de 15%, y teniendo el valor máximo para el porcentaje de sustitución de 10%, con un valor de 32.63 MPa, además que con dichos valores a comparación de los valores de los especímenes que no fueron sometidos al ciclo de congelación y descongelación, es evidente un aumento en la resistencia a la compresión.

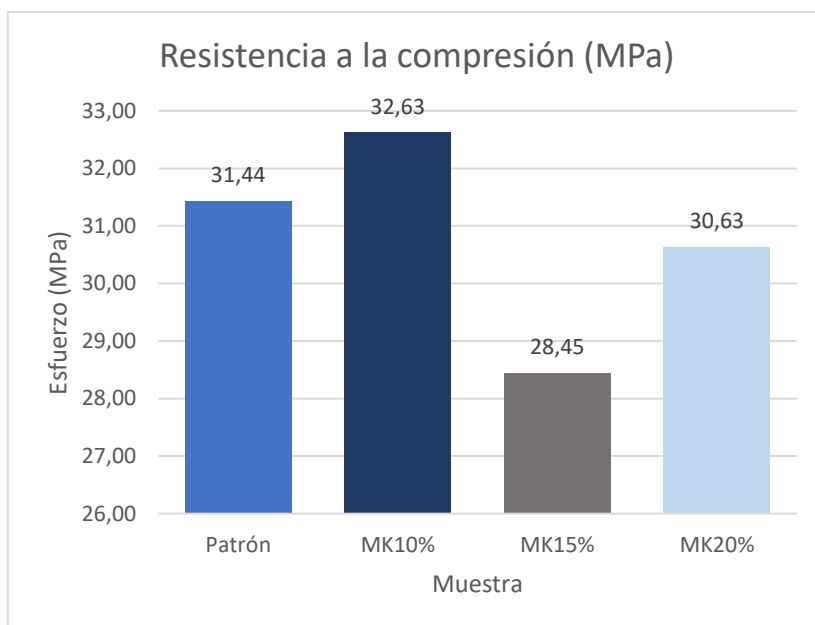


Fig. 3.12. Resistencia a la compresión cúbica luego de congelación y descongelación.

Elaborado: Luis Panamá

3.1.8. Ensayo de Permeabilidad

Una vez realizado el ensayo de permeabilidad y siendo medido la profundidad de penetración del agua en los especímenes cilíndricos se tienen los siguientes resultados descritos en la **Tabla 3.21**.

Tabla 3.21. Resultados de Permeabilidad en Especímenes Cilíndricos.

Descripción		Profundidad de Penetración (mm)	
M. Patrón	PL1	52.67	52.64
	PL2	52.60	
Metakaolín 10%	MK10PL1	51.28	49.66
	MK10PL2	48.04	
Metakaolín 15%	MK15PL1	51.29	51.14
	MK15PL2	50.98	
Metakaolín 20%	MK20PL1	50.14	50.11
	MK20PL2	50.07	

Elaborado: Luis Panamá

Los resultados muestran que el porcentaje de sustitución que menor profundidad de penetración de agua presenta es el correspondiente al 10% con un valor 49.66 mm, mientras que el valor más alto es de 52.64 mm correspondiente al mortero patrón.

3.2. Conclusiones

- De acuerdo con los resultados obtenidos en cuanto al ensayo de flujo en morteros para cada una de las muestras, se obtiene un flujo de valor de 111.22% para el mortero patrón, valor el cual según los requisitos de la norma (NTE INEN 488, 2009) debe de ser de $110\% \pm 5\%$ en morteros con la dosificación establecida en la misma norma, mientras que los valores de resultados de flujo en cuanto a mortero con sustitución parcial de cemento con metakaolín decrecen a medida que se aumenta el porcentaje de sustitución, teniendo un valor de 103.04% para una sustitución de 10%, 95.28% para una sustitución de 15% y 92.18% para una sustitución del 20%, debido principalmente a que el metakaolín absorbe mayor cantidad de agua de mezcla dado su estado deshidroxilado y seco inicial, por lo que el uso de porcentajes altos de sustitución con metakaolín representan una reducción en la trabajabilidad de mezclas de mortero, teniendo una mezcla con baja consistencia.
- Se puede constatar además el incremento de la resistencia a la compresión de morteros con sustitución parcial de metakaolín en los especímenes cúbicos ensayados a los 56 días, notándose que la mayor resistencia se obtiene para el mortero con porcentaje de sustitución del 10% con un valor de 31.84 MPa, a comparación de la muestra de control o patrón que adquirió una resistencia de 28.42 MPa, teniendo un incremento del 12%; tomando estos valores como referencia se realizó el ensayo de resistencia a la compresión luego de ciclos de congelamiento y descongelamiento para verificar cambios en su resistencia mecánica debido a este efecto recurrente en la zona de la sierra por las bajas temperaturas, obteniendo como resultado que la tendencia de aumento de resistencia se mantiene semejante a las muestras que no se sometieron al ciclo, con el mayor valor correspondiente de igual manera al porcentaje de 10% con un esfuerzo de 32.63 MPa y de 31.44 MPa para el mortero patrón, deduciéndose que el efecto del congelamiento a una temperatura de 0°C y descongelamiento posterior, no inciden en gran medida en las muestras con metakaolín, y observando además que no presentan cambios significativos visualmente en su superficie.
- Realizado el ensayo de difracción por rayos x para la arcilla caolinita y el metakaolín obtenido producto del tratamiento térmico a 800°C , se puede concluir que efectivamente se logró la deshidroxilación y la transformación en metakaolín de la arcilla cruda, notándose una mayor proporción de cuarzo y mica, y la eliminación de minerales de caolinita; en tanto, para las muestras de mortero con sustitución parcial de metakaolín se pudo evidenciar la presencia de etringita, portlandita,

cuarzo y tobermorita, esta última es el gel que se produce por la hidratación del silicato bicálcico y silicato tricálcico y responsable de proporcionar la resistencia al cemento, y se pudo ratificar que a medida que se incrementaba el porcentaje de sustitución incrementaba el valor del pico de tobermorita, verificándose además con los ensayos de resistencia a la compresión.

- Se encuentra una correlación entre los resultados obtenidos tanto para la absorción después de inmersión, y después de inmersión y ebullición, con los resultados de porcentaje de volumen de vacíos, teniendo que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución con metakaolín, el volumen de vacíos o porosidad disminuye, esto debido al hecho de que las partículas más finas de metakaolín rellenan los espacios vacíos en la mezcla de mortero, reduciendo así su porosidad y por ende la absorción de agua en ambos casos; considerando que el porcentaje que mejor comportamiento muestra es el correspondiente a una sustitución del 20% con metakaolín, con un volumen de vacíos de 14.76 % y un valor de absorción de 7.22 %, a comparación del mortero patrón que presentaron valores de 15.76 % y 8.12 – 816 % respectivamente.
- En cuanto a la permeabilidad y la incidencia de la sustitución parcial con metakaolín en la mezcla de mortero, se puede concluir una mejora en el porcentaje de sustitución del 10% al tener un valor de profundidad de penetración del agua bajo presión de 49.66 mm, a diferencia del valor de 52.64 mm obtenido en el la muestra de control, mostrando una reducción del 5.66%; además en los porcentajes de 15% y 20% de sustitución también se evidencia la reducción de la profundidad de penetración, aunque la que mejor resultado muestra cómo se mencionó en un inicio es el correspondiente al 10% de sustitución, debido principalmente a la reducción del volumen de vacíos por las partículas finas de metakaolín que rellenan las zonas porosas en la mezcla de mortero, y dado que a porcentajes más altos de sustitución el metakaolín no llega a reaccionar completamente con el agua, lo que permite que en ciertas zonas aumente la porosidad, y por ende la permeabilidad.
- Los resultados correspondientes a la profundidad de carbonatación muestran un incremento en dicho valor en los cubos de mortero a medida que aumenta el porcentaje de sustitución con metakaolín, teniendo un valor promedio de profundidad de carbonatación de 1.05 mm en el mortero patrón, y un valor máximo en el porcentaje de sustitución de 15% de 1.19 mm, es decir, un incremento del 13.33% en cubos de mortero expuestos al ambiente durante un período de 7 días luego de 28 días de curado; de la misma forma para los resultados obtenidos en los

especímenes cilíndricos se evidencia esta relación directamente proporcional entre el porcentaje de sustitución y la profundidad de carbonatación.

- Se concluye que como fue planteado en un inicio los antecedentes del proyecto, la sustitución con metakaolín mejoran las propiedades de durabilidad y resistencia a los 56 días en mezclas de mortero, teniendo que para resistencia a compresión el valor óptimo fue el correspondiente al 10% de sustitución, para absorción, porosidad y volumen de vacíos fue el porcentaje de sustitución de 20%, para permeabilidad se obtuvo un valor de 10%, mientras que para la carbonatación se puede afirmar que el incremento de porcentaje de sustitución aumenta la profundidad de carbonatación, y para efectos de ciclos de congelamiento y descongelamiento, no existe mayor variación ni cualitativa ni cuantitativa en dichos resultados que pueda ser considerada significativa.

3.3. Recomendaciones

- Para el uso de metakaolín en morteros se recomienda aumentar la cantidad de agua de mezcla, de tal manera que se pueda obtener una mejor consistencia, sin embargo, no se ha estudiado la incidencia del aumento del agua en la dosificación con metakaolín, que, si bien podría representar una mejora en su trabajabilidad, tendría como consecuencia una reducción de su resistencia a la compresión al aumentar la relación agua – cemento.
- En cuanto al ensayo de difracción por rayos x, los resultados obtenidos son únicamente valores semicuantitativos y con un análisis interpretativo, por lo que si es menester la obtención de resultados cuantitativos más precisos y confiables, es necesario el uso de software especializado para el análisis de la composición mineralógica y química de las muestras de mortero con sustitución parcial de metakaolín.
- Si bien los resultados obtenidos del ensayo de absorción muestran que son mayormente favorables con el porcentaje de sustitución de 20%, se debe considerar el punto anterior, que para tener una adecuada trabajabilidad requerirá mayor cantidad de agua en la dosificación, lo que reduciría su resistencia a la compresión, y además considerar variables como el tiempo de curado, lo que sería un punto a tomar en cuenta si se requiere mejorar únicamente esta propiedad al usar morteros con sustitución parcial de metakaolín.

- Se recomienda realizar ensayos de carbonatación acelerada con los equipos adecuados que permitan acelerar dicho proceso, debido principalmente al hecho de que el CO₂ se encuentra en una baja concentración en la atmósfera, y para evidenciar en mayor medida los efectos de la carbonatación en morteros se necesita de un período muy largo de tiempo.
- La incidencia del tiempo de curado y la dosificación en cuanto a la cantidad de agua, pueden ser consideradas de igual manera variables en este tipo de investigación, por lo que para un mejor análisis del efecto de estos parámetros es necesario una investigación más minuciosa.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Razak, H., Chai, H. K., & Wong, H. S. (2004). Near surface characteristics of concrete containing supplementary cementing materials. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), 883-889. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2003.10.001>
- ASTM C305-20. (2020). *American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency.*
- ASTM C618-19. (2019). *American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*
- ASTM C642-21. (2021). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.*
- ASTM C666-15. (2015). *American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing.*
- ASTM C778-21. (2021). *American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Standard Sand.*
- Bakera, A. T., & Alexander, M. G. (2019). Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties. *RILEM Technical Letters*, 4, 89-102. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.94>
- Barbhuiya, S., Chow, P., & Memon, S. (2015). Microstructure, hydration and nanomechanical properties of concrete containing metakaolin. *Construction and Building Materials*, 95, 696-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.101>
- D2 PHASER. (s. f.). Recuperado 5 de septiembre de 2022, de <https://www.bruker.com/es/products-and-solutions/diffractometers-and-scattering-systems/x-ray-diffractometers/d2-phaser.html>
- Frías, M., de Rojas, M. I. S., & Cabrera, J. (2000). The effect that the pozzolanic reaction of metakaolin has on the heat evolution in metakaolin-cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 209-216. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00231-](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00231-8)

- Gonçalves, M. C., & Margarido, F. (Eds.). (2015). *Materials for Construction and Civil Engineering*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-08236-3>
- González, E. & Alloza, A. M. (s. f.). *CURSO DE PRÁCTICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN: TEMA 16. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. Recuperado 5 de septiembre de 2022, de <https://campusvirtual.ull.es/ocw/mod/page/view.php?id=1620>
- HOLCIM S.A. (2021, agosto 13). *Especificaciones Técnicas Cemento Holcim Fuerte*. Holcim Ecuador S.A. <https://www.holcim.com.ec/cemento-holcim-fuerte>
- Homayoonmehr, R., Ramezani pour, A. A., & Mirdarsoltany, M. (2021). Influence of metakaolin on fresh properties, mechanical properties and corrosion resistance of concrete and its sustainability issues: A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 103011. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103011>
- Ilic, B., Mitrovic, A., & Milicic, L. (2010). Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijska Industrija*, 64(4), 351-356. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>
- Khatib, J. M., Baalbaki, O., & ElKordi, A. A. (2018). Metakaolin. En *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* (pp. 493-511). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102156-9.00015-8>
- Khatib, J. M., & Clay, R. M. (2004). Absorption characteristics of metakaolin concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 19-29. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00188-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00188-1)
- McLaws, I. J. (1971). Uses and specifications of silica sand. *Res. Counc. Alberta, Bull.; (Canada)*, 71-4. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/6007711>
- Mejía de Gutiérrez, Rubí, Rodríguez, C., Rodríguez, E., & Delvasto, S. (2009). *Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros*. 11.

- NTE INEN 488. (2009). *Norma Técnica Ecuatoriana. CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MORTEROS EN CUBOS DE 50 mm DE ARISTA.*
- NTE INEN 873. (2017). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN. ARENA NORMALIZADA. REQUISITOS.*
- NTE INEN 1108. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana. AGUA POTABLE. REQUISITOS.*
- NTE INEN 1855-2. (2015). *Norma Técnica Ecuatoriana. HORMIGONES. HORMIGÓN PREPARADO EN OBRA. REQUISITOS.*
- NTE INEN 2380. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana. CEMENTO HIDRÁULICO. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS.*
- NTE INEN 2502. (2009). *Norma Técnica Ecuatoriana. CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DEL FLUJO EN MORTEROS.*
- Ramezaniapour, A. A. (2014). *Cement Replacement Materials.* Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36721-2>
- Rubenstein, M. (2012, mayo 9). Emissions from the Cement Industry. *State of the Planet.* <https://news.climate.columbia.edu/2012/05/09/emissions-from-the-cement-industry/>
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary Cementing Materials* (Vol. 37). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-17866-5>
- Snellings, R., Chwast, J., Cizer, Ö., De Belie, N., Dhandapani, Y., Durdzinski, P., Elsen, J., Haufe, J., Hooton, D., Patapy, C., Santhanam, M., Scrivener, K., Snoeck, D., Steger, L., Tongbo, S., Vollpracht, A., Winnefeld, F., & Lothenbach, B. (2018). RILEM TC-238 SCM recommendation on hydration stoppage by solvent exchange for the study of hydrate assemblages. *Materials and Structures*, 51(6), 172. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1298-5>
- SYCA. (s. f.). *Arena sílice.* Syca. Recuperado 7 de diciembre de 2021, de <https://syca.net/productos/arena-silice>

- Tagle Arizaga, A. F., & Zapana Matheus, L. K. (2017). Evaluación del deterioro del concreto con contenidos variables de aire incorporado y fibras de polipropileno sometido a congelamiento a edades tempranas. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3306>
- Torre, A. (2004). Curso básico de tecnología del concreto. *Universidad Nacional de Ingeniería, Lima Perú*.
- UNE EN 12390-8. (2020). *Asociación Española de Normalización (UNE)*. *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión*.
- UNE EN 112011. (2011). *Asociación Española de Normalización (UNE)*. *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*.
- Vejmelková, E., Pavlíková, M., Keppert, M., Keršner, Z., Rovnaníková, P., Ondráček, M., Sedlmajer, M., & Černý, R. (2010). High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1404-1411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.01.017>

5. ANEXOS

ANEXO I

INFORME DE RESULTADOS COMPRESIÓN CÚBICA



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



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0404 - I
Hoja 01 de 02

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA
Teléfono: 0992517365

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 ²)	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-19	PL1 - MORTERO PATRÓN	2022-07-14	56	291,5	108	7,63	74,84	291	28,6
2	2022-05-19	PL2 - MORTERO PATRÓN	2022-07-14	56	295,4	108	7,75	76,03	291	28,6
3	2022-05-19	PL3 - MORTERO PATRÓN	2022-07-14	56	292	108	7,44	73,01	287	28,1
4	2022-05-25	MK10L1 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-20	56	295,6	102	8,92	87,49	338	33,1
5	2022-05-25	MK10L2 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-20	56	300,1	102	8,88	87,09	339	33,3
6	2022-05-25	MK10L3 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-20	56	296,2	102	7,73	75,79	297	29,1
7	2022-05-30	MK15L1 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-25	56	292,6	98	5,80	56,84	220	21,5
8	2022-05-30	MK15L2 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-25	56	297,6	98	6,53	64,05	247	24,2
9	2022-05-30	MK15L3 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-25	56	294,1	98	6,59	64,67	253	24,8
10	2022-06-01	MK20L1 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-27	56	288,8	90	9,12	89,44	348	34,1
11	2022-06-01	MK20L2 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-27	56	292,6	90	8,78	86,09	339	33,2
12	2022-06-01	MK20L3 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-27	56	289,7	90	7,37	72,29	282	27,7

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 VILLACIS
JEFE DE LABORATORIO



Telf.: 2976300
Ext.: 1609

CCM-023-006-I

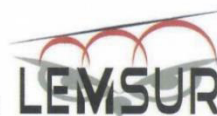
Dirección: Ladrón de Guevara E11-253 y Andalucía / Edif. Ing. Civil / Mezanine / Ofic. M15 Email: lemsur@epn.edu.ec

ANEXO II

INFORME DE RESULTADOS COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS LUEGO DE CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO



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



COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO

INF. No. 22 - 0404 - I
Hoja 02 de 02

Quito, 9 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE

Razón social: LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA
Teléfono: 0992517365

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 / cm ²)	ESFUERZO (MPa)
1	2022-05-24	PL10 - MORTERO PATRÓN	2022-07-19	56	290,3	115	9,50	93,17	357	35,0
2	2022-05-24	PL11 - MORTERO PATRÓN	2022-07-19	56	295,1	115	8,20	80,45	305	29,9
3	2022-05-24	PL12 - MORTERO PATRÓN	2022-07-19	56	293,3	115	8,85	86,78	336	32,9
4	2022-05-26	MK10L10 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-21	56	290,3	104	9,50	93,17	357	35,0
5	2022-05-26	MK10L11 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-21	56	295,1	104	8,20	80,45	305	29,9
6	2022-05-26	MK10L12 - MORTERO 10% METAKAOLIN	2022-07-21	56	293,3	104	8,85	86,78	336	32,9
7	2022-05-31	MK15L10 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-26	56	285,4	93	8,22	80,63	317	31,1
8	2022-05-31	MK15L11 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-26	56	284,3	93	6,78	66,45	260	25,5
9	2022-05-31	MK15L12 - MORTERO 15% METAKAOLIN	2022-07-26	56	283,9	93	7,53	73,82	293	28,8
10	2022-06-02	MK20L10 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-28	56	290,2	95	8,58	84,11	323	31,6
11	2022-06-02	MK20L11 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-28	56	293,2	95	8,09	79,29	305	29,9
12	2022-06-02	MK20L12 - MORTERO 20% METAKAOLIN	2022-07-28	56	293,1	95	8,18	80,26	310	30,4

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-022-006-I

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

ANEXO III

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD



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



PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 22 - 0423 - I
Hoja 01 de 01

Quito, 23 de agosto de 2022

DATOS DEL CLIENTE


Razón social: LUIS FERNANDO PANAMÁ QUILUMBANGO
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA
Teléfono: ***

DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: CLASIFICACIÓN Y USO DE METAKAOLIN COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO EN EL HORMIGÓN
Contratante: ***
Contratista: ***
Fiscalizador: ***
NORMA: UNE-EN 12390-8

No.	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DE AGUA	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN MÁXIMA (mm)	FILTRACIONES DE AGUA
1	PL1	2022-07-21	Probeta cilíndrica	Paralela	53.0	No
2	PL2	2022-07-21	Probeta cilíndrica	Paralela	53.0	No
3	MK10 PL1	2022-07-28	Probeta cilíndrica	Paralela	51.0	No
4	MK10 PL2	2022-07-28	Probeta cilíndrica	Paralela	48.0	No
5	MK15 PL1	2022-08-04	Probeta cilíndrica	Paralela	51.0	No
6	MK15 PL2	2022-08-04	Probeta cilíndrica	Paralela	51.0	No
7	MK20 PL1	2022-08-19	Probeta cilíndrica	Paralela	50.0	No
8	MK20 PL2	2022-08-19	Probeta cilíndrica	Paralela	50.0	No

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


ING. MERCEDES VILLACÍS
JEFE DEL LABORATORIO



PERMH-22-003-I

Telf.: 2976300
Ext.: 1609

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

ANEXO IV

PÉRDIDA POR IGNICIÓN

RESULTADOS LUEGO DE TRATAMIENTO TÉRMICO											
Arcilla a 800 °C	Tiempo de Exposición		Velocidad de Exposición		Antes		Después		Pérdida de masa		Promedio de pérdida de masa
	157	min	5	°C/min	1240.6	g	1106.6	g	10.8	%	
					1302.1		1176.4		9.7		
					1159.3		1031.9		11.0		
					1314.2		1172.2		10.8		
										10.6	

ANEXO V

ENSAYO DE COMPRESIÓN CÚBICA A 56 DÍAS

MORTEROS PATRONES (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
19/5/2022	PL1	14/7/2022	5.106	5.128	5.175	291.50	74.84	26.18	28.58	28.42
19/5/2022	PL2	14/7/2022	5.160	5.158	5.123	295.40	76.03	26.62	28.57	
19/5/2022	PL3	14/7/2022	5.107	5.088	5.178	292.00	73.01	25.98	28.10	

MORTEROS 10% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
25/5/2022	MK10L1	20/7/2022	5.123	5.153	5.106	295.60	87.49	26.40	33.14	31.84
25/5/2022	MK10L2	20/7/2022	5.059	5.177	5.188	300.10	87.09	26.19	33.25	
25/5/2022	MK10L3	20/7/2022	5.105	5.099	5.132	296.20	75.79	26.03	29.12	

MORTEROS 15% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
30/5/2022	MK15L1	25/7/2022	5.126	5.15	5.151	292.60	56.84	26.40	21.53	23.50
30/5/2022	MK15L2	25/7/2022	5.103	5.189	5.154	297.60	64.05	26.48	24.19	
30/5/2022	MK15L3	25/7/2022	5.105	5.113	5.131	294.10	64.67	26.10	24.78	

MORTEROS 20% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
1/6/2022	MK20L1	27/7/2022	5.165	5.073	5.041	288.80	89.44	26.20	34.13	31.68
1/6/2022	MK20L2	27/7/2022	5.096	5.083	5.153	292.60	86.09	25.90	33.24	
1/6/2022	MK20L3	27/7/2022	5.095	5.126	5.174	289.70	72.29	26.12	27.68	

ANEXO VI

ENSAYO DE COMPRESIÓN CÚBICA A 56 DÍAS – CICLO DE CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO

MORTEROS PATRONES (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
24/5/2022	PL10	19/7/2022	5.102	5.117	5.152	291.40	87.9	26.11	33.67	31.44
24/5/2022	PL11	19/7/2022	5.094	5.170	5.206	295.30	87.61	26.34	33.27	
24/5/2022	PL12	19/7/2022	5.095	5.056	5.103	289.90	70.52	25.76	27.38	

MORTEROS 10% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
26/5/2022	MK10L10	21/7/2022	5.128	5.187	5.133	290.30	93.17	26.60	35.03	32.63
26/5/2022	MK10L11	21/7/2022	5.118	5.251	5.174	295.10	80.45	26.87	29.94	
26/5/2022	MK10L12	21/7/2022	5.114	5.155	5.14	293.30	86.78	26.36	32.92	

MORTEROS 15% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
31/5/2022	MK15L10	26/7/2022	5.109	5.079	5.092	285.40	80.63	25.95	31.07	28.45
31/5/2022	MK15L11	26/7/2022	5.122	5.085	5.112	284.30	66.45	26.05	25.51	
31/5/2022	MK15L12	26/7/2022	5.098	5.035	5.120	283.90	73.82	25.67	28.76	

MORTEROS 20% METAKAOLÍN (COMPRESIÓN CÚBICA) 56 DÍAS										
Fecha de Fabricación	Descripción	Fecha de Ensayo	A (cm)	B (cm)	C(cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Área (cm ²)	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo (MPa)
2/6/2022	MK20L10	28/7/2022	5.186	5.128	5.113	290.20	84.11	26.59	31.63	30.63
2/6/2022	MK20L11	28/7/2022	5.113	5.184	5.166	293.20	79.29	26.51	29.91	
2/6/2022	MK20L12	28/7/2022	5.114	5.169	5.152	293.10	80.26	26.43	30.36	

ANEXO VII

DATOS ENSAYO DE ABSORCIÓN

MORTERO PATRÓN								
PROBETA N°	MASA DE PROBETA SECA AL HORNO (g)							MASA SECA FINAL (g)
	24h.	48h.	Δ%	OBSERVACION	72h.	Δ%	OBSERVACION	
1	265.530	264.410	0.42	OK		100.00	-	264.41
2	264.870	263.600	0.48	OK		100.00	-	263.60
3	267.942	267.360	0.22	OK		100.00	-	267.36
PROBETA N°	MASA DE PROBETA DESPUES DE INMERSION EN AGUA (g)							MASA DESPUES DE INMERSION FINAL (g)
	48h.	72h.	Δ%	OBSERVACION	96h.	Δ%	OBSERVACION	
1	286.165	286.213	0.02	OK		100.00	-	286.21
2	285.215	285.291	0.03	OK		100.00	-	285.29
3	288.403	288.424	0.01	OK		100.00	-	288.42
PROBETA N°	MASA DESPUES DE INMERSION (g)							
	EBULLICION 5h + 14h	SUMERGIDO APARENTE						
1	286.335	155.600						
2	285.391	155.360						
3	288.511	157.500						

MORTERO PATRÓN			
PROPIEDAD	PROBETA N°	VALOR	PROMEDIO
ABSORCION DESPUES DE INMERSION (%)	1	8.25	8.12
	2	8.23	
	3	7.88	
ABSORCION DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (%)	1	8.29	8.16
	2	8.27	
	3	7.91	
DENSIDAD GLOBAL SECA (g/cm ³)	1	2.02	2.03
	2	2.03	
	3	2.04	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION (g/cm ³)	1	2.19	2.19
	2	2.19	
	3	2.20	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (g/cm ³)	1	2.19	2.20
	2	2.19	
	3	2.20	
DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	1	2.43	2.43
	2	2.44	
	3	2.43	
VOLUMEN DE VACIOS (%)	1	16.77	16.56
	2	16.76	
	3	16.14	

MORTERO CON 10% METAKAOLÍN								
PROBETA N°	MASA DE PROBETA SECA AL HORNO (g)							MASA SECA FINAL (g)
	24h.	48h.	Δ%	OBSERVACION	72h.	Δ%	OBSERVACION	
1	272.910	269.653	1.19	Secar 24h. más	269.235	0.16	OK	269.24
2	272.040	268.823	1.18	Secar 24h. más	268.427	0.15	OK	268.43
3	272.460	269.144	1.22	Secar 24h. más	268.769	0.14	OK	268.77
PROBETA N°	MASA DE PROBETA DESPUES DE INMERSION EN AGUA (g)							MASA DESPUES DE INMERSION FINAL (g)
	48h.	72h.	Δ%	OBSERVACION	96h.	Δ%	OBSERVACION	
1	288.744	288.755	0.00	OK		100.00	-	288.76
2	288.560	288.536	0.01	OK		100.00	-	288.54
3	289.103	289.109	0.00	OK		100.00	-	289.11
PROBETA N°	MASA DESPUES DE INMERSION (g)							
	EBULLICION 5h + 14h	SUMERGIDO APARENTE						
1	288.582	158.100						
2	288.372	157.700						
3	288.953	158.200						

MORTERO CON 10% METAKAOLÍN			
PROPIEDAD	PROBETA N°	VALOR	PROMEDIO
ABSORCION DESPUES DE INMERSION (%)	1	7.25	7.44
	2	7.49	
	3	7.57	
ABSORCION DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (%)	1	7.19	7.38
	2	7.43	
	3	7.51	
DENSIDAD GLOBAL SECA (g/cm ³)	1	2.06	2.06
	2	2.05	
	3	2.06	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION (g/cm ³)	1	2.21	2.21
	2	2.21	
	3	2.21	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (g/cm ³)	1	2.21	2.21
	2	2.21	
	3	2.21	
DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	1	2.42	2.43
	2	2.42	
	3	2.43	
VOLUMEN DE VACIOS (%)	1	14.83	15.18
	2	15.26	
	3	15.44	

MORTERO CON 15% METAKAOLÍN								
PROBETA N°	MASA DE PROBETA SECA AL HORNO (g)							MASA SECA FINAL (g)
	24h.	48h.	Δ%	OBSERVACION	72h.	Δ%	OBSERVACION	
1	275.432	271.042	1.59	Secar 24h. más	269.761	0.47	OK	269.76
2	274.735	270.315	1.61	Secar 24h. más	269.115	0.44	OK	269.12
3	278.004	273.359	1.67	Secar 24h. más	272.219	0.42	OK	272.22
PROBETA N°	MASA DE PROBETA DESPUES DE INMERSION EN AGUA (g)							MASA DESPUES DE INMERSION FINAL (g)
	48h.	72h.	Δ%	OBSERVACION	96h.	Δ%	OBSERVACION	
1	290.391	290.445	0.02	OK		100.00	-	290.45
2	290.212	290.169	0.01	OK		100.00	-	290.17
3	292.681	292.623	0.02	OK		100.00	-	292.62
PROBETA N°	MASA DESPUES DE INMERSION (g)							
	EBULLICION 5h + 14h	SUMERGIDO APARENTE						
1	289.905	158.300						
2	289.781	157.700						
3	292.299	159.500						

MORTERO CON 15% METAKAOLÍN			
PROPIEDAD	PROBETA N°	VALOR	PROMEDIO
ABSORCION DESPUES DE INMERSION (%)	1	7.67	7.66
	2	7.82	
	3	7.50	
ABSORCION DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (%)	1	7.47	7.51
	2	7.68	
	3	7.38	
DENSIDAD GLOBAL SECA (g/cm ³)	1	2.05	2.05
	2	2.04	
	3	2.05	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION (g/cm ³)	1	2.21	2.20
	2	2.20	
	3	2.20	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (g/cm ³)	1	2.20	2.20
	2	2.19	
	3	2.20	
DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	1	2.42	2.42
	2	2.42	
	3	2.42	
VOLUMEN DE VACIOS (%)	1	15.31	15.36
	2	15.65	
	3	15.12	

MORTERO CON 20% METAKAOLÍN								
PROBETA N°	MASA DE PROBETA SECA AL HORNO (g)							MASA SECA FINAL (g)
	24h.	48h.	Δ%	OBSERVACION	72h.	Δ%	OBSERVACION	
1	277.097	274.471	0.95	Secar 24h. más	273.099	0.50	OK	273.10
2	277.301	274.791	0.91	Secar 24h. más	273.504	0.47	OK	273.50
3	281.845	279.190	0.94	Secar 24h. más	277.816	0.49	OK	277.82
PROBETA N°	MASA DE PROBETA DESPUES DE INMERSION EN AGUA (g)							MASA DESPUES DE INMERSION FINAL (g)
	48h.	72h.	Δ%	OBSERVACION	96h.	Δ%	OBSERVACION	
1	293.159	293.131	0.01	OK		100.00	-	293.13
2	292.909	292.912	0.00	OK		100.00	-	292.91
3	297.827	297.865	0.01	OK		100.00	-	297.87
PROBETA N°	MASA DESPUES DE INMERSION (g)							
	EBULLICION 5h + 14h	SUMERGIDO APARENTE						
1	293.227	159.100						
2	292.874	159.500						
3	297.803	162.300						

MORTERO CON 20% METAKAOLÍN			
PROPIEDAD	PROBETA N°	VALOR	PROMEDIO
ABSORCION DESPUES DE INMERSION (%)	1	7.34	7.22
	2	7.10	
	3	7.22	
ABSORCION DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (%)	1	7.37	7.22
	2	7.08	
	3	7.19	
DENSIDAD GLOBAL SECA (g/cm ³)	1	2.04	2.05
	2	2.05	
	3	2.05	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION (g/cm ³)	1	2.19	2.19
	2	2.20	
	3	2.20	
DENSIDAD DESPUES DE INMERSION Y EBULLICION (g/cm ³)	1	2.19	2.19
	2	2.20	
	3	2.20	
DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)	1	2.40	2.40
	2	2.40	
	3	2.41	
VOLUMEN DE VACIOS (%)	1	15.01	14.76
	2	14.52	
	3	14.75	