



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE
MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR
NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN,
OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE LABORATORIO**

José Rodrigo Ramos Lemus

Asesorado por el Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, febrero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE
CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109)
UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE
LABORATORIO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ RODRIGO RAMOS LEMUS

ASESORADO POR EL ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Jaime Domingo Carranza González
EXAMINADOR	Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE LABORATORIO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 1 de octubre de 2016.

José Rodrigo Ramos Lemus

Guatemala, 3 de octubre del 2018

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Respetable Ingeniero Wong Davi

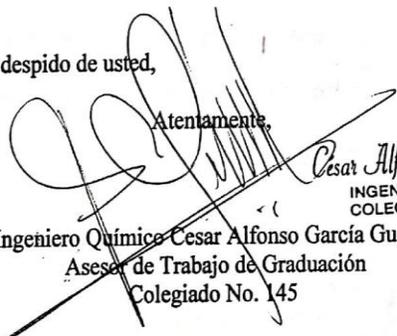
Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que, en mi calidad de asesor del trabajo de graduación del estudiante de la carrera de Ingeniería Química **JOSÉ RODRIGO RAMOS LEMUS** quien se identifica con DPI 2286985370101 y registro académico número **201213218**, he revisado el Informe Final de Trabajo de Graduación, titulado:

EVALUACION DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE LABORATORIO

Por lo que considero que el presente informe cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por **aprobado**. Dejo a su consideración que el estudiante **RAMOS LEMUS** continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona.

Sin otro particular me despido de usted,

Atentamente,


Cesar Alfonso Garcia Guerra
INGENIERO QUIMICO
COLEGIADO No. 145
Ingeniero Químico Cesar Alfonso Garcia Guerra
Asesor de Trabajo de Graduación
Colegiado No. 145



Guatemala, 22 de octubre de 2018.
Ref. EIQ.TG-IF.054.2018.

Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo 063-2016 le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por el estudiante universitario: **José Rodrigo Ramos Lemus.**
Identificado con el CUI: **2286 98537 0101.**
Identificado con registro académico: **2012-13218.**
Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO.**

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE LABORATORIO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **César Alfonso García Guerra.**

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Adela María Marroquín González
Inga. Adela María Marroquín González
COORDINADORA DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Asociación Guatemalteca de Ingenieros Químicos





USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Edificio T-5, Ciudad Universitaria, Zona 12, Guatemala, Centroamérica
EIQD-REG-SG-004

Ref.EIQ.TG.013.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **JOSÉ RODRIGO RAMOS LEMUS** titulado: **"EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAO LÍN A NIVEL DE LABORATORIO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

FACULTAD DE INGENIERIA USAC
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
DIRECTOR

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
Director
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, febrero 2019

Cc: Archivo
CSWD/ale



Formando Ingenieros Quimicos en Guatemala desde 1939

Universidad de San Carlos
de Guatemala

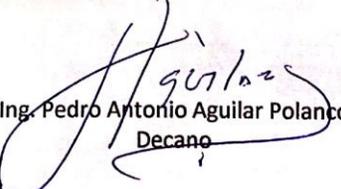


Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 091.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL ÍNDICE DE EFICIENCIA PUZOLÁNICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE EN LA NORMA COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACAOLÍN, OBTENIDO DE CAOLÍN A NIVEL DE LABORATORIO**, presentado el estudiante universitario: **José Rodrigo Ramos Lemus**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, febrero de 2019

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por cada bendición que me ha proporcionado en el transcurso de mi carrera y porque me permite finalizar esta etapa tan importante en mi vida
- Mi madre** Alba Luz Lemus Cruz, quien ha sido mi pilar no solo en esta etapa sino en mi vida. Mi persona ideal de perseverancia y mi modelo a seguir.
- Mi padre** Marcial Ramos, por ser mi ángel de la guarda, por guiar mí camino hasta estas instancias.
- Mi hermano** Eduardo Luis Ramos Lemus a quien considero como mi papá, por ser una persona de bien y es mi ejemplo de superación continua.
- Mi gemelo** José Pablo Ramos Lemus, por ser mi alma gemela desde que venimos al mundo y ser la persona con quien he compartido cada etapa de mi vida, incluyendo esta.

Mi familia

Por siempre estar pendientes de mí y por su apoyo incondicional.

Mis amigos

Por ser una fuente de apoyo incondicional, tanto en las malas como en las buenas, en todo momento de mi vida.

AGRADECIMIENTO A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera, y por convertirse en mi segunda casa en mi etapa universitaria.
Facultad de Ingeniería	Por proporcionarme los recursos necesarios para completar mi carrera universitaria.
Mi asesor	Ingeniero César García, por el tiempo que se tomó en asesorarme y apoyarme en cada etapa de mi trabajo de graduación.
Coasesora	Ingeniera Dilma Mejicanos, por el tiempo que se tomó en apoyarme en cada etapa de mi trabajo de graduación
Mi revisora	Ingeniería Adela Marroquín, por su contribución y tiempo dedicado a cada etapa de mi trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. Naturaleza del caolín	3
2.1.1. Propiedades físicas del caolín	3
2.1.2. Composición y estructura cristalina del caolín	4
2.2. Alteración hidrotermal	6
2.2.1. Reacciones de hidrólisis	9
2.3. Uso de puzolanas como aditivos en cementos	10
2.4. Naturaleza de metacaolín	16
2.4.1. Formación del metacaolín.....	16
2.4.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del metacaolín	18
2.4.3. Método de análisis térmico	19
2.5. Efecto puzolánico del metacaolín.....	19
2.6. Importancia de los aditivos de cemento en la industria	22
2.7. Características físicas y químicas del cemento Portland	22
2.7.1. Características físicas de los cementos Portland ...	23

2.7.1.1.	Finura de molido.....	23
2.7.1.2.	Rigidez y resistencia mecánica	24
2.7.2.	Características químicas de los cementos Portland.....	25
2.7.2.1.	Análisis conceptual del proceso de fraguado y curado (hidratación del cemento)	25
2.7.3.	Estructura y endurecimiento de la pasta de cemento.....	29
2.8.	Teoría del Color	30
2.8.1.	Generalidades	30
2.8.2.	Fuentes luminosas	31
2.8.3.	Medición por modelos de color.....	31
2.8.4.	Modelo CIE-L*a*b* (1976).....	32
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	33
3.1.	Variables... ..	33
3.2.	Delimitación del campo de estudio	34
3.2.1.	Localización.....	34
3.3.	Recurso humano disponible	34
3.4.	Recurso material disponible.....	35
3.4.1.	Equipo	35
3.4.2.	Cristalería	39
3.4.3.	Reactivos.....	39
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	39
3.6.	Establecimiento de la metodología experimental.....	40
3.6.1.	Proceso de recolección de muestras	40
3.6.1.1.	Identificación del tipo de caolín	40
3.6.1.2.	Preparación de metacaolín.....	41

3.6.2.	Manejo del experimento	43
3.6.2.1.	Determinación del peso residual.....	43
3.6.2.2.	Determinación de la densidad	43
3.6.2.3.	Determinación de coordenadas L*a*b* del color	43
3.6.2.4.	Composición del metacaolín.....	45
3.6.3.	Preparación para ensayos a compresión	49
3.6.3.1.	Diseño preliminar.....	49
3.6.3.2.	Método para determinar el flow	51
3.6.3.3.	Método para determinar resistencia a compresión de morteros	53
3.6.3.4.	Ensayo de la resistencia a compresión	59
3.7.	Análisis estadístico.....	61
3.7.1.	Dato promedio estadístico	61
3.7.2.	Desviación estándar	61
3.7.3.	Análisis de varianza.....	62
4.	RESULTADOS	65
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	89
5.1.	Respecto al análisis de materia prima	89
5.2.	Respecto a sus propiedades fisicomecánicas.....	93
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	103
	APÉNDICES	105
	ANEXOS	127

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Comportamiento esperado de la resistencia a compresión respecto al tiempo, variando el porcentaje de metacaolín de la mezcla.....XXI
2.	Diagrama del sistema cristalino triclinico básico de caolín..... 4
3.	Estructura cristalina del caolín 4
4.	Arreglo estructural T-O de la caolinita..... 5
5.	Diagrama de la estructura cristalina de la caolinita 5
6.	Barrido electrónico de materiales cementicios 11
7.	Diagrama de fase CaO – SiO ₂ – Al ₂ O ₃ , localización de materiales puzolánicos..... 14
8.	Calcinación de caolín de toba e hidrotermal a diferentes temperaturas para la obtención de metacaolín 18
9.	Efecto que lleva a un aumento en la compacidad del concreto..... 21
10.	Esquema bidimensional del proceso de hidratación de las partículas de cemento en una pasta compacta a edad temprana.... 28
11.	Representación sistemática del crecimiento de cristales durante el proceso de hidratación..... 28
12.	Representación gráfica de la estructura del cemento durante el fraguado..... 29
13.	Pasta de cemento hidratada: Ca(OH) ₂ y C-S-H 30
14.	Diagrama del espacio del color CIE-L*a*b* (1976) para lecturas de las coordenadas de caolín y metacaolín. 32

15.	Mufla Fisher Scientific capacidad 1 000°C para calcinación de caolín en la obtención de metacaolín	35
16.	Tableteadora Fred. S. Carver con presión máxima de 25 atm para elaboración de tabletas de caolín y metacaolín con diámetro de 13,13mm.....	36
17.	Máquina Tate-Emery Testing Machine Universal para la aplicación de esfuerzo mecánico a compresión a los morteros de cemento con adición de metacaolín con capacidad máxima de 55 000 kgf	37
18.	Moldes cúbicos estándar de acero inoxidable de 5 cm por arista para los diseños de morteros de cemento con adición de metacaolín.....	37
19.	Balanza analítica Radwag WPS 750 para la medición de masas del caolín y metacaolín	38
20.	Colorímetro para el análisis de color de materia prima del caolín y metacaolín para sus coordenadas L*a*b	38
21.	Matraz de LeChatelier especial para la determinación de densidad del caolín y metacaolín utilizando como fluido keroseno con capacidad para 10ml.....	40
22.	Unidad experimental de caolín que consiste en 70g por crisol para un total de 10 crisoles	42
23.	Unidad experimental de metacaolín posterior a calcinación del caolín que consiste en 64g. por crisol para un total de 10 crisoles....	42
24.	Diagrama de las coordenadas L*a*b de la medición del colorímetro para el caolín de origen	44
25.	Diagrama de las coordenadas L*a*b de la medición del colorímetro para el metacaolín posterior a la calcinación del caolín.....	45
26.	Diagrama Ternario CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ para el metacaolín posterior a la calcinación del caolín	47

27.	Diagrama Ternario CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃ para el caolín de origen	48
28.	Componentes de la mezcla que cuenta con cemento 5 800, metacaolín, arena estándar y agua desmineralizada para el diseño de morteros.....	50
29.	Mezcladora mecánica eléctrica para la homogenización de los componentes para el diseño de morteros	50
30.	Mesa para la determinación del flow necesario para comprobar que los diseños de mortero con adición de metacaolín cumplen respecto al mortero de referencia	52
31.	Medición de las 4 longitudes por medio de un Vernier para la determinación del flow	52
32.	Dimensión del tipo de muestra seleccionado para los morteros de cemento con adición de metacaolín.....	56
33.	Moldes de acero inoxidable que se utilizó para los diseños de mortero.....	57
34.	Llenado de moldes posterior al proceso de mezclado en el que se llevó a cabo el endurecimiento de los morteros	58
35.	Morteros de cemento luego de ser desencofrados de los moldes con 5cm por arista para posteriormente iniciar el fraguado.....	58
36.	Mortero de cemento sometido a ensayo mecánico a compresión en la prensa hidráulica	60
37.	Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado en mortero patrón.....	69
38.	Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 5 % de adición de metacaolín	70
39.	Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 10 % de adición de metacaolín	71
40.	Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 15 % de adición de metacaolín	72

41.	Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 20 % de adición de metacaolín	73
42.	Comparativa de resistencia a la compresión a 3 días vrs. porcentajes de sustitución de metacaolín	74
43.	Comparativa de resistencia a la compresión a 7 días vrs. porcentajes de sustitución de metacaolín	75
44.	Comparativa de resistencia a la compresión a 28 días vrs. porcentajes de sustitución metacaolín	76
45.	Comparativa de resistencia a la compresión a 3 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín	77
46.	Comparativa de resistencia a la compresión a 7 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín	78
47.	Comparativa de resistencia a la compresión a 28 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín	79
48.	Comparativa de resistencia a la compresión vrs. porcentajes de sustitución de metacaolín	80
49.	Comparativa de resistencia a la compresión en sustitución de metacaolín vrs. días de fraguado.....	81
50.	Comparativa de resistencia a la compresión vrs. porcentajes de adición de metacaolín	82
51.	Comparativa de resistencia a la compresión en adición vrs. días de fraguado.....	83

TABLAS

I.	Composición química de algunos materiales puzolánicos.....	13
II.	Clasificación de puzolanas	15
III.	Propiedades que aportan los componentes del cemento	24
IV.	Lista de variables	33

V.	Equipo auxiliar para el caolín, metacaolin y mezclas para el diseño de morteros con cemento con adición de metacaolín	35
VI.	Instrumentos de medición en la elaboración de morteros de cemento con adición de metacaolín.....	36
VII.	Porcentaje de pérdida en peso del caolín de origen y metacaolín posterior a la calcinación.....	41
VIII.	Densidad del caolín de origen y metacaolín posterior a la calcinación.....	41
IX.	Promedio de las tres repeticiones realizadas para las coordenadas del color L*a*b* en función de la temperatura de deshidroxilación para el caolín	44
X.	Fluorescencia de rayos X de metacaolín(750°C) y caolín de origen.....	46
XI.	Proporciones para diseño de mortero patrón.....	53
XII.	Proporciones para diseño de mortero con 5 % de adición de metacaolín.....	54
XIII.	Proporciones para diseño de mortero con 10 % de adición de metacaolín.....	54
XIV.	Proporciones para diseño de mortero con 15 % de adición de metacaolín.....	55
XV.	Proporciones para diseño de mortero con 20 % de adición de metacaolín.....	55
XVI.	Proporciones para diseño de mortero con 5 % de sustitución de metacaolín.....	56
XVII.	Proporciones para diseño de mortero con 10 % de sustitución de metacaolín.....	56
XVIII.	Ecuaciones para el análisis de varianza	62
XIX.	Diseño experimental de ensayos de mortero testigo (0 % de aditivo de metacaolín)	65

XX.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 5 % de aditivo de metacaolín.....	65
XXI.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 10 % de aditivo de metacaolín.....	66
XXII.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 15 % de aditivo de metacaolín.....	66
XXIII.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 20 % de aditivo de metacaolín.....	67
XXIV.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 5 % de sustitución con metacaolín.....	67
XXV.	Diseño experimental de ensayos de mortero con 10 % de sustitución con metacaolín.....	67
XXVI.	Índice de eficiencia puzolánica para morteros con sustitución de metacaolín.....	68
XXVII.	Índice de eficiencia puzolánica para morteros con adición de metacaolín.....	68
XXVIII.	Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para portero patrón	84
XXIX.	Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 5 % de adición de metacaolín.....	85
XXX.	Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 10 % de adición de metacaolín.....	86
XXXI.	Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 15 % de adición de metacaolín.....	87
XXXII.	Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 20 % de adición de metacaolín.....	88

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C₃A	Aluminato tricálcico
ρ_A	Densidad absoluta
C₄AF	Ferrito aluminato tetracálcico
HS	Humo de sílice
Ip	Índice de eficiencia puzolánica (%)
MK	Metacaolín
Al₂O₃%	Porcentaje en peso de óxido de aluminio (%)
SiO₂%	Porcentaje en peso de óxido de silicio (%)
C₂S	Silicato bicálcico
C-S-H	Silicato de calcio hidratado
C₃S	Silicato tricálcico
t	Tiempo

GLOSARIO

Aditivo	Es el material inerte que, unido con un aglomerante en una masa conglomerada, forma concreto o mortero. Estos se dividen según su tamaño en finos y gruesos
Arcilla	Agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedente de la descomposición de minerales de aluminio. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, siendo blanca cuando es pura. Surge de la descomposición de rocas
ASTM	Siglas en inglés que corresponden a la American Society for Testing and Materials -Sociedad americana para ensayos y materiales.
Caolín	Silicato de aluminio hidratado formado por la descomposición de feldespato y otros silicatos de aluminio. Su fórmula es $Al_2Si_2O_5(OH)_4$.
Cemento	Mezcla de caliza y arcilla, sometida a calcinación y molida, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas.

Esfuerzo a compresión Resultante de las tensiones o presiones que existe dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen.

Flow Propiedad de un mortero, medida en un laboratorio, que indica el porcentaje de incremento en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero, cuando se coloca sobre una mesa de flujo, la cual se levanta mecánicamente y se deja caer un número de veces determinado, bajo condiciones específicas

Fraguado Endurecimiento de la pasta de cemento luego de adicionar agua, refiriéndose al cambio de estado fluido al estado rígido.

Metacaolín El metacaolín es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500°C para arriba.

Puzolana Materiales silíceos o alumino-silíceos, los cuales por sí solos poseen poco valor cementante, pero cuando se han dividido y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio.

Toba

Roca ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación cuyo propósito es comparar el comportamiento de las propiedades fisicomecánicas a compresión del cemento tipo 5800, al adicionar metacaolín a partir de caolín modificado térmicamente. El cemento tipo 5800 es uno los materiales más utilizados por el ser humano. Al agregar al cemento, metacaolín como aditivo se obtienen resultados confiables de eficiencia puzolánica.

Para la obtención del metacaolín, se calcinó a 750°C caolín en mufla con un tiempo de residencia de 1 hora. Se le aplicaron diferentes pruebas físicas y químicas, como el porcentaje en pérdida en peso, densidad y color, para compararlo con otros caolines de procedencia. Los porcentajes de adición se observaron y evaluaron mediante un análisis de fluorescencia de rayos X, dependiendo de los porcentajes de óxido silicio y de aluminio que contenga.

A continuación, se diseñó un mortero con un 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de metacaolín como aditivo y se comparó con un mortero de referencia con 0% de adición. La comparación se realizó en tres periodos de fraguado 3, 7 y 28 días respectivamente. Así mismo se trabajó con un 5 % y 10 % de sustitución para observar y comparar respecto a los diseños de referencia y a los de adición.

Posteriormente, se realizó una correlación de los resultados obtenidos como aplicación de análisis estadísticos. Se obtuvo en adición una eficiencia puzolánica mayor al 100 % tomando como más significativa la de 10 % que posee un comportamiento similar al diseño de referencia. En sustitución no presento mayor significancia en los diseños.

OBJETIVOS

GENERAL

Evaluación del índice de eficiencia puzolánica de morteros de cemento tipo 5800 con base a la Norma COGUANOR NTG 41003 H4 (ASTM C-109-05) utilizando como aditivo metacaolín, obtenido por activación térmica mediante la calcinación a 750°C de caolín realizado a nivel de laboratorio

ESPECÍFICOS

1. Evaluar las resistencias fisicomecánicas de morteros a compresión según inciso 3.1 en diseño de morteros con 3 variaciones de porcentajes de metacaolín.
2. Realizar ensayos de resistencias fisicomecánicas a compresión a edades de 3, 7 y 28 días de fraguado, con 4 réplicas por tiempo de fraguado en base a 3 variaciones de porcentajes cada una.
3. Comparar las propiedades fisicomecánicas a compresión de morteros con la adición de metacaolín, respecto a un mortero patrón
4. Realizar las correlaciones de respuesta al esfuerzo fisicomecánico entre los resultados con y sin metacaolín para verificar si supera uno de los diseños el 75% de eficiencia puzolánica.

5. Evaluar la existencia de diferencias significativas en las variables de respuesta de la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado mediante de un análisis de varianza (ANOVA).

6. Determinar si existe diferencia en los tiempos de fraguado, respecto a los porcentajes de metacaolín propuestos en relación al mortero patrón mediante un análisis de varianza (ANOVA).

HIPÓTESIS

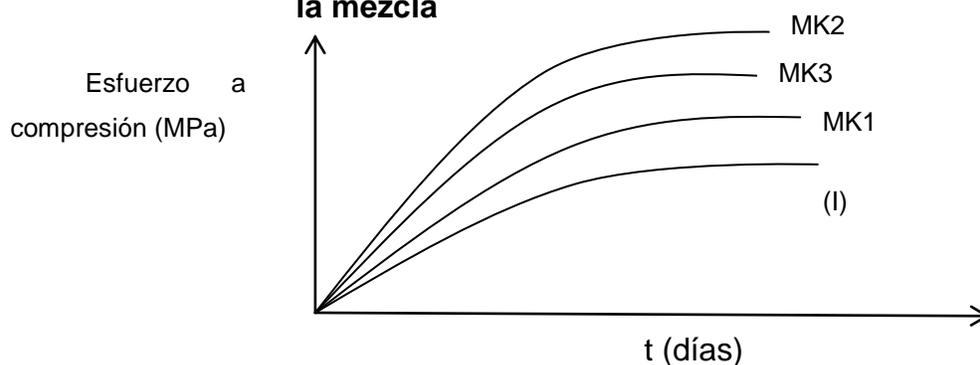
Es posible caracterizar el índice de eficiencia puzolánica para el cemento para de observar si existen variaciones en su tendencia en función del tiempo de fraguado.

Hipótesis conceptual

Se predice un comportamiento al esfuerzo de compresión parecido para cada variación de metacaolín.

- Se espera que, de las tres variaciones de metacaolín, el 15 % y de igual modo 20 % tengan una elevación al esfuerzo de compresión, sea este último el punto máximo debido a que, al 25 %, aún queda material sin reaccionar y que actúa como relleno dentro de la mezcla

Figura 1. **Comportamiento esperado de la resistencia a compresión respecto al tiempo, variando el porcentaje de metacaolín de la mezcla**



Fuente: elaboración propia

Comportamiento esperado al utilizar 15 % metacaolín (MK1), 20 % metacaolín (MK2), 25 % metacaolín (MK3) en correlación con el testigo (I).

Hipótesis Estadística

a. Hipótesis de Investigación ($H_{i,1}$)

Existe variación significativa en el tiempo de fraguado encontradas en el incremento del índice de nivel puzolánico del cemento, en función de que poseen diferente contenido de metacaolín (α).

Ha: Al menos una $\mu_{\alpha i} \neq 0$

b. Hipótesis nula ($H_{0,1}$)

No existe variación significativa en el tiempo de fraguado en el incremento del índice de nivel puzolánico del cemento, en función de que poseen diferente contenido de metacaolín (α).

$$H_0 : \mu_{\alpha 1} = \mu_{\alpha 2} = 0$$

INTRODUCCIÓN

Los morteros son mezclas de materiales aglomerantes y agregados finos que, al añadirles agua, forman masas plásticas especiales para unión de unidades de mampostería o para revestimiento de las mismas.

Las puzolanas son materiales inorgánicos, naturales o artificiales, silíceos o sílico-aluminosos con pequeñas cantidades de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio, que por sí solos poseen poco o ningún valor cementante. Están conformadas por partículas finamente divididas, amorfas o de muy pobre cristalinidad, que al entrar en contacto con un medio húmedo y a una temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento.

Las puzolanas artificiales son, generalmente, subproductos industriales y materiales tratados térmicamente, como el caolín; el cual no presenta ningún tipo de actividad puzolánica hasta el momento cuando se destruye o se transforma su estructura cristalina (metacaolín), mediante un tratamiento térmico a temperaturas entre 500°C - 600°C cuando se produce la calcinación del material.

El siguiente trabajo consiste en la obtención de metacaolín para su adición al mortero de cemento Portland, para evaluar sus diferentes propiedades fisicomecánicas a diferentes tiempos de fraguado.

1. ANTECEDENTES

Científicos de todo el mundo han investigado el metacaolín material puzolánico, en las últimas décadas debido a su composición química, $Al_2Si_2O_7$, y a su estructura cristalina amorfa.

Bajo la dirección de William D. Smiley y otros investigadores en asociación con North American Refractories Co. (Cleveland, Ohio, EEUU) patentaron en 1998 el método de producción de metacaolín usado como aditivo en materiales cementicios, mediante tratamiento térmico de caolín. Este método describe los pasos para la formación de metacaolín en polvo para reducir el contenido de hidroxilos y luego producir un material de estructura amorfa con un tamaño de partícula de mesh 325 o menos.

En 2006, Juan C. Restrepo Gutiérrez, Oscar J. Restrepo Baena y Jorge I. Tobón en asociación con el Grupo del Cemento y Materiales de Construcción de la Universidad Nacional de Colombia (Medellín, Colombia), realizaron un estudio sobre los efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland. Dicho estudio se realizó mediante técnicas convencionales de difracción de rayos X, determinando la estructura del metacaolín adicionado y propiedades de resistencia mecánica, permeabilidad y durabilidad del hormigón armado.¹

El Ing. Roberto Lainfiesta (2010) llevó a cabo un análisis de termogravimetría de dos caolines y obteniendo metacaolín mediante una calcinación a diferentes temperaturas y tiempos. En su estudio se observa la

¹ GUTIÉRREZ, Juan. *Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland*. ASTM C188-95. p. 61-62

pérdida de masa y cambio de color del metacaolin obtenido entre 600°C – 850°C por pérdida de hidroxilos (OH).²

En 2011, Janneth Torres, Ruby Mejía y Silvio Delvasto en la Universidad de Bogotá, Colombia, realizaron un estudio del efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto. Dicho estudio se realizó para observar el comportamiento con diferente contenido de MK por medio de resistencia a la compresión.³

Olga Anabela Diaz Ponce (2012) en su informe de tesis *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*, hace énfasis en las propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín, de tal forma que si puede haber una relación directa de esta arcilla con el cemento.⁴

² LAINFIESTA, Roberto. *Análisis mediante termogravimetría (640 mm de Hg) de dos caolines para la obtención de metacaolín por activación térmica*. p. 45-55

³ TORRES, Janneth. *Efecto del porcentaje de adición de metacaolin en las propiedades finales del concreto*. p. 75-76

⁴ PONCE, Olga. *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*. p.60-70.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Naturaleza del caolín

El caolín es un silicato de aluminio hidratado, producto de la descomposición de rocas feldespáticas principalmente.

2.1.1. Propiedades físicas del caolín

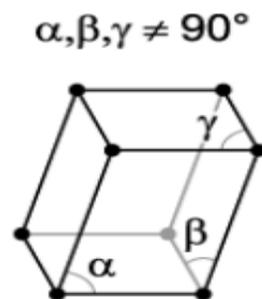
El término caolín se refiere a arcillas en las que predomina el mineral caolinita; tiene una densidad real de $2,60 \text{ g/cm}^3$ a $2,63 \text{ g/cm}^3$; su dureza es 2 en la escala de Mohs; de color blanco, puede tener diversos colores debido a las impurezas; brillo generalmente terroso mate; es higroscópico (absorbe agua); su plasticidad es de baja a moderada.

Otras propiedades importantes son la blancura, la inercia ante agentes químicos, es inodoro, aislante eléctrico, moldeable y de fácil extrusión; resiste altas temperaturas, no es tóxico ni abrasivo y tiene elevada refractariedad y facilidad de dispersión. Es compacto, suave al tacto y difícilmente fusible. Tiene gran poder cubriente y absorbente y baja viscosidad en altos porcentajes de sólidos. Además toma color azul cuando se humedece con nitrato de cobalto y se calcina (aluminio). Se reconoce por su carácter arcilloso, pero sin ayuda de rayos X es imposible distinguirlo de otros minerales.

2.1.2. Composición y estructura cristalina del caolín

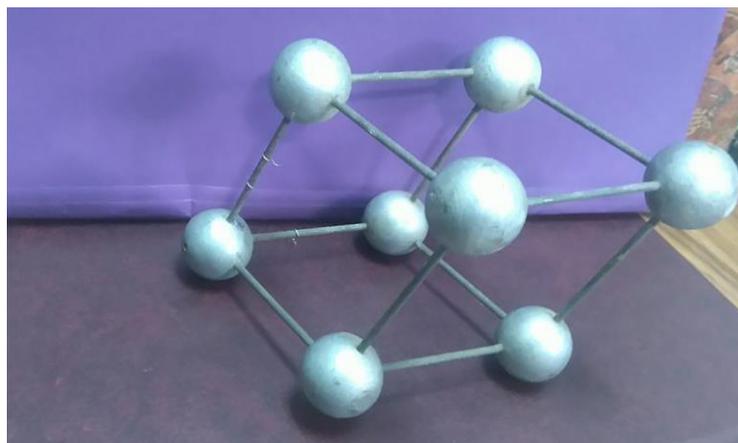
La caolinita muestra pocas variaciones en su composición. Para $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, Al_2O_3 39,5 %, SiO_2 46,5 % y H_2O 14 %. Su estructura cristalina es triclinica en láminas muy pequeñas, delgadas, rómbicas o de forma hexagonal. ($a = 5,14 \text{ \AA}$, $b = 8,93 \text{ \AA}$, $c = 7,37 \text{ \AA}$; $\alpha = 91^\circ 48'$, $\beta = 104^\circ 30'$, $\gamma = 90^\circ$).

Figura 2. Diagrama del sistema cristalino triclinico básico de caolín



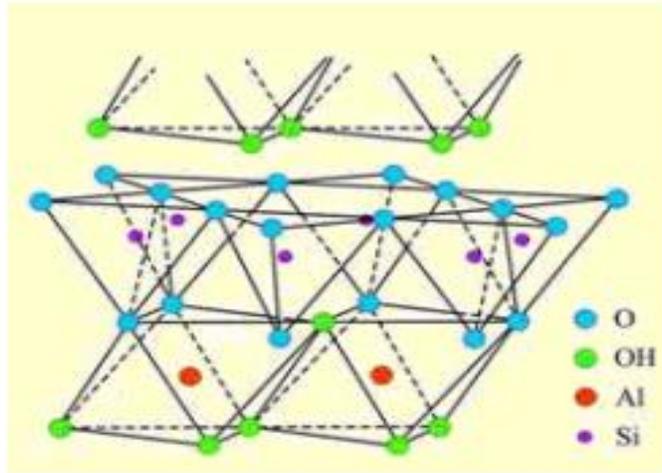
Fuente: HOWARD, Mike y HOWARD, Darcy. *Introducción a la Cristalografía y Sistemas Cristalinos*. p. 1.

Figura 3. Estructura cristalina del caolín



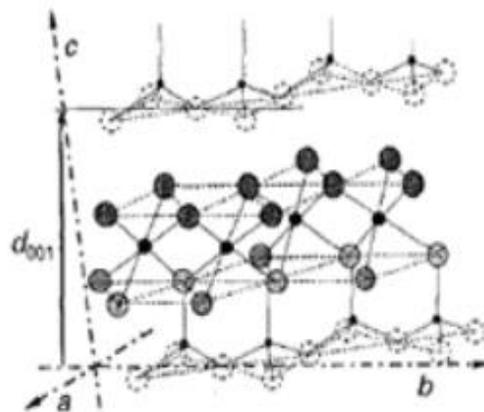
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Arreglo estructural T-O de la caolinita**



Fuente: SÁLISBURY DANA, Edward. *Tratado de Mineralogía*. p. 606.

Figura 5. **Diagrama de la estructura cristalina de la caolinita**



Fuente: HOBBS J, David y otros. *All-atom ab initio energy minimization of the kaolinite crystal structure*. p 658..

2.2. Alteración hidrotermal

La alteración hidrotermal es un término general que incluye la respuesta mineralógica, textural y química de las rocas a un cambio ambiental, en térmicos químicos y termales, en la presencia de agua caliente, vapor o gas. La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, crecimiento de nuevos minerales, disolución de minerales y/o precipitación, y reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por la misma. En efecto, la temperatura del fluido y el pH del mismo son los factores más relevantes en la asociación mineralógica resultante de los procesos de alteración hidrotermal, más que la litología.

La característica esencial de la alteración hidrotermal es la conversión de un conjunto mineral inicial en una nueva asociación de minerales más estable bajo las condiciones hidrotermales de temperatura, presión y sobre todo de composición de fluidos. La textura original de la roca puede ser modificada ligeramente o completamente obliterada por la alteración hidrotermal.

La alteración hidrotermal es un tipo de metamorfismo que involucra la recristalización de la roca a nuevos minerales más estables bajo las condiciones hidrotermales. La característica distintiva de la alteración hidrotermal es la importancia del fluido hidrotermal en transferir constituyentes y calor. Efectivamente, la alteración hidrotermal involucra la circulación de volúmenes relativamente grandes de fluidos calientes atravesando las rocas permeables, debido a la presencia de fisuras o poros interconectados

El transporte de materiales involucrados en la alteración de las rocas puede ocurrir por infiltración o por difusión (transporte por difusión de especies químicas a través de fluidos estancados en los poros de las rocas) o por una combinación de ambos procesos

Factores que controlan a la alteración hidrotermal de las rocas:

- Temperatura: y la diferencia de temperatura (Δt°) entre la roca y el fluido que la invade: cuanto más caliente el fluido, mayor será el efecto sobre la mineralogía original.
- Composición del fluido: sobre todo el pH del fluido hidrotermal: mientras más bajo el pH (fluido más ácido) mayor será el efecto sobre los minerales originales.
- Permeabilidad de la roca: una roca compacta y sin permeabilidad no podrá ser invadida por fluidos hidrotermales para causar efectos de alteración.
- Duración de la interacción agua/roca: y variaciones de la razón agua/roca. Cuanto mayor sea el volumen de aguas calientes que circulen por las rocas y por mayor tiempo, las modificaciones mineralógicas serán más completas.
- Composición de la roca: la proporción de minerales es relevante para grados menos intensos de alteración, dado que los distintos minerales tienen distinta susceptibilidad a ser alterados, pero en alteraciones intensas la mineralogía resultante es esencialmente independiente del tipo de roca original.
- Presión: este es un efecto indirecto, pero controla procesos secundarios como la profundidad de ebullición de fluidos, fracturamiento hidráulico (generación de brechas hidrotermales) y erupción o explosiones hidrotermales

La intensidad de la alteración corresponde a un término objetivo que se refiere a la extensión en que una roca ha sido alterada, mientras que el grado de alteración es un término subjetivo que requiere una interpretación basada en la mineralogía de alteración. Sin embargo, se han propuesto los términos pervasividad para indicar la intensidad de la alteración y extensividad para indicar la distribución espacial de la alteración hidrotermal.

- Procesos debidos a la alteración hidrotermal:
 - Reemplazo: muchos minerales de las rocas son inestables en un ambiente hidrotermal y estos tienden a ser reemplazados por nuevos minerales que son estables o al menos metaestables en las nuevas condiciones.
 - Lixiviación: algunos de los componentes químicos de las rocas son extraídos por los fluidos hidrotermales al atravesarlas, particularmente cationes metálicos, de modo que la roca es deprimida en dichos componentes o lixiviada. En ciertas condiciones, como por ejemplo donde se condensa vapor acidificado por oxidación de H_2S , la solución ácida resultante (por la presencia de H_2SO_4) ataca las rocas disolviendo minerales primarios, pero sin reemplazar los huecos resultantes que se producen.

La alteración hidrotermal produce cambios en las propiedades de las rocas alterando su densidad (aumento o disminución), porosidad, permeabilidad (aumento o disminución), susceptibilidad magnética (usualmente disminuye, pero puede aumentar cuando se deposita magnetita hidrotermal) y resistividad (usualmente, decrece porque los sulfuros metálicos permiten el paso de corrientes eléctricas, pero masas silíceas producto de alteración pueden ser más resistivas). Simultáneamente, con esos cambios físicos pueden ocurrir

eventos relacionados o sin relación como fallamiento y formación de diaclasas/fracturas que afectan el proceso de alteración.

El reemplazo, lixiviación y depositación de minerales también causa cambios químicos cuya extensión y naturaleza varía mucho, pero los cuales son obviamente función de la mineralogía.

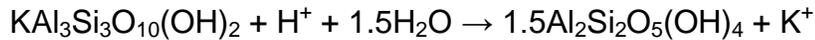
2.2.1. Reacciones de hidrólisis

La estabilidad de feldespatos, micas y arcillas en procesos de alteración hidrotermal, generalmente, se controla por hidrólisis, en la cual K^+ , Na^+ , Ca^{+2} y otros cationes se transfieren de minerales a la solución y el H^+ se incorpora en las fases sólidas remanentes. Esto ha sido denominado metasomatismo de hidrógeno.

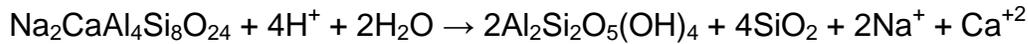
La hidrólisis es una reacción de descomposición que involucra la participación de agua. En geología corresponde a la reacción entre minerales silicatados, ya sea con agua pura o con una solución acuosa, en la cual los iones H^+ y OH^- son consumidos selectivamente. Las reacciones de hidrólisis son muy importantes en los procesos de alteración hidrotermal y algunos tipos de alteraciones son el resultado de distinto grado de hidrólisis de los minerales constituyentes de las rocas.

Alteración hidrotermal de plagioclasa → sericita → arcillas → cuarzo En términos químicos esto se puede representar por las reacciones siguientes:

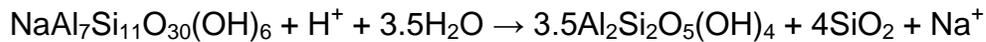
Sericita (mica potásica) → Caolin



Andesida → Caolin + Cuarzo



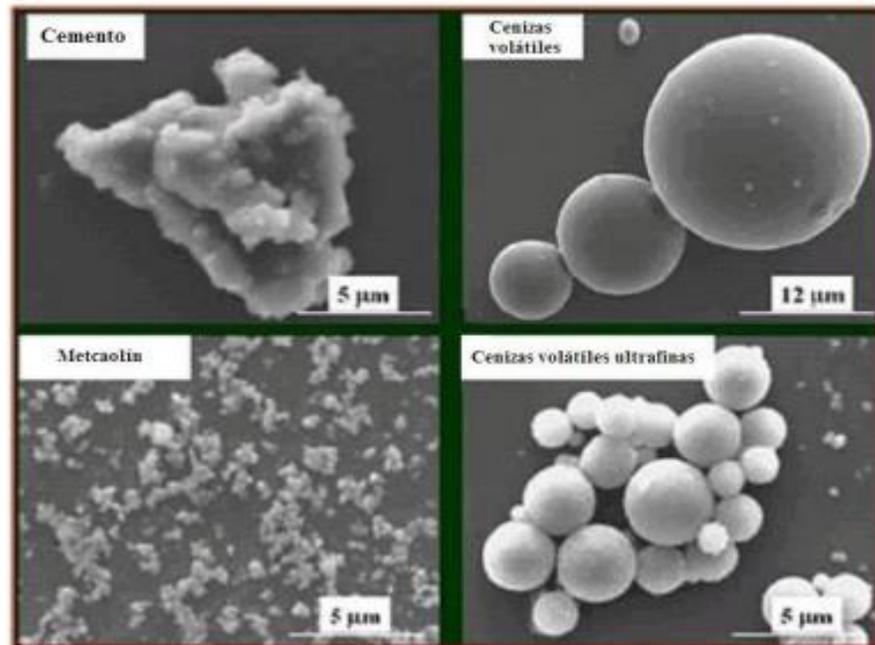
Monmorillonita → Caolin + Cuarzo



2.3. Uso de puzolanas como aditivos en cementos

Las puzolanas son materiales inorgánicos, naturales o artificiales, silíceos o sílicoaluminosos con pequeñas cantidades de calcio, magnesio, hierro, potasio y sodio que, por sí solos, poseen poco o ningún valor cementante. Están conformadas por partículas finamente divididas, amorfas o de muy pobre cristalinidad que, al entrar en contacto con un medio húmedo y a una temperatura ambiente, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento y forman silicatos dicálcicos hidratados (tobermorita) y aluminatos dicálcicos hidratados (gehlenita), encargados de la mayor parte de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las pastas, morteros y los hormigones.

Figura 6. **Barrido electrónico de materiales cementicios**



Fuente: Instituto de Materiales de Construcción, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Tehran, Iran. *Materiales cementicios suplementarios*. p. 65

Los cementos puzolánicos son cementos adicionados, que se usan en la construcción de obras donde los cementos tradicionales no logran cumplir con las funciones necesarias para su uso, debido a aspectos que puedan afectar la durabilidad y la estabilidad necesaria del elemento, o de acuerdo con requerimientos propios exigidos al material, como poder disminuir el calor de hidratación, la porosidad o la plasticidad de las mezclas.

La utilización de las puzolanas en el cemento, en términos generales, presenta un efecto en la disminución del calor de hidratación debido a que tiene un menor porcentaje de los compuestos responsables de la elevación de la temperatura durante el fraguado del cemento. Esto implica una menor

formación de capilares y, como consecuencia, una mayor densidad y compacticidad. A su vez, necesita una menor utilización de agua para el curado de los elementos realizados con este tipo de mezclas. Además, estas adiciones activas mejoran el desarrollo de resistencias y aumenta la durabilidad de los morteros y concretos.

Las puzolanas pueden clasificarse según su origen en puzolanas naturales y puzolanas artificiales. Entre las primeras se encuentran las cenizas volcánicas, tobas volcánicas, zeolitas, tierras de diatomeas (diatomitas). Entre las segundas se destacan las cenizas volantes, arcillas activadas térmicamente, microsílíce (humo de sílice), cenizas de cáscara de arroz y escoria de alto horno o de fundición.

Las puzolanas artificiales son generalmente subproductos industriales y materiales tratados térmicamente, como el caolín; el cual no presenta actividad puzolánica hasta el momento cuando se destruye o se transforma su estructura cristalina mediante un tratamiento térmico a temperaturas entre 500°C y 600°C, cuando se produce la calcinación del material.

A continuación, se presenta un cuadro comparativo, que hace referencia a los intervalos, de la composición química, de los materiales puzolánicos, como metacaolines, polvo de perlita, cenizas volantes y humo de sílice, así mismo se destacan algunos cementos

Tabla I. **Composición química de algunos materiales puzolánicos**

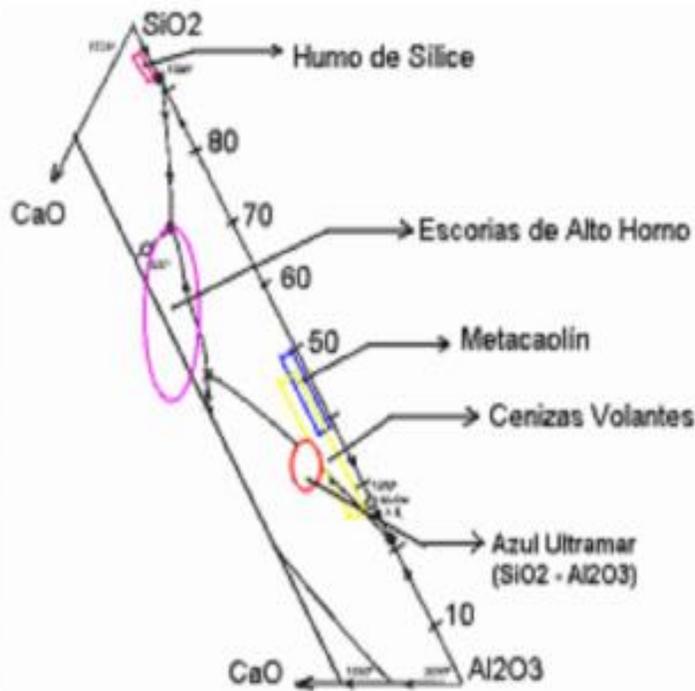
Material	Composición			
	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO %
Metacaolín	49.55 - 75.53	23.11 – 45.29	0.57 4.32	0.00 – 2.71
Humo de sílice	96.00	0.30	0.20	0.03
Polvo de perlita	76.89	10.51	2.48	0.12
Escorias de alto	32.71	15.75	1.38	42.11
Cenizas volantes	49.80 – 53.36	6 26.40 – 26.99	9 4.94 – 9.30	0.00 – 1.40

Fuente: RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo y otros., *Efectos de la adición de Metacaolín en el cemento Pórtland*. p. 153.

En la tabla anterior se establece la composición química de los materiales reconocidos y manejados como puzolánicos, como el metacaolín. En todos los casos los porcentajes totales de SiO₂ y Al₂O₃ varían entre el 90 % y 48 %, el humo de sílice está en 96 %. Para el caso de las cenizas volantes el porcentaje es menor, pero no de manera considerable, alrededor de 82 %; para el polvo de perlita 87 % y para las escorias de alto horno alrededor del 48 %.

Entre las propiedades que se atribuyen a los cementos con adiciones está su cualidad puzolánica, que consiste en reacciones ocurridas durante la etapa de fraguado y endurecimiento. Además, contribuyen al aumento de las resistencias mecánicas y durabilidad, propiedades más altas de las que se alcanzarían sin la adición de puzolanas.

Figura 7. Diagrama de fase CaO – SiO₂ – Al₂O₃, localización de materiales puzolánicos



Fuente: RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo y otros. *Efectos de la adición de Metacaolín en el cemento Pórtland*. p. 153.

Los concretos presentan una excelente resistencia al ataque químico frente a aguas ácidas, pero la resistencia a la compresión temprana suele presentarse ligeramente inferior con respecto al cemento Pórtland puro. Después de 90 días, esta diferencia se anula o se minimiza porque los silicatos activados de la puzolana reaccionan con el hidróxido de calcio libre que resulta como subproducto de las reacciones químicas en la hidratación del cemento, especialmente de la cal libre, alita y belita. Otra propiedad es la de ser resistente a los sulfatos. Es una consecuencia de la reacción de la puzolana

con los aluminatos del clínker, al posibilitar la solubilidad de éstos últimos. Adicionalmente, estos productos contribuyen a una mayor impermeabilidad del hormigón y presentan un comportamiento más estable a la reacción con los álcalis del cemento, convirtiéndolo en un inhibidor de la reacción álcali-agregado determinado por un análisis de reactividad potencial.

El hormigón en estado fresco, elaborado con cementos adicionados tiene la característica de que las partículas puzolánicas le otorgan una mayor trabajabilidad y una mayor cohesión de la matriz, que evita la segregación de los agregados finos y gruesos durante su manipulación y colocación. Sin embargo, la reacción del material puzolánico con el agua y con la cal libre puede afectar la trabajabilidad de la mezcla, por ello, se debe agregar algún tipo de aditivos tal como plastificantes o superplastificantes que mejoren la trabajabilidad de las mezclas.

Tabla II. **Clasificación de puzolanas**

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

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 618-08^a.

2.4. Naturaleza de metacaolín

El metacaolín es un producto que se obtiene del proceso de calcinación del caolín que se describe a continuación.

2.4.1. Formación del metacaolín

Entre los 100°C y 200° C, las arcillas minerales pierden la mayoría de humedad del agua adsorbida. Luego, entre 500°C-800°C la caolinita se calcina y pierde agua a través de deshidroxilación, lo cual corresponde, teóricamente, a un 13,96% de su peso. La deshidroxilación del caolín a metacaolín es un proceso endotérmico debido a la gran cantidad de energía requerida para remover químicamente los enlaces de los iones hidroxilos. Arriba de este rango de temperatura, la caolinita se convierte en metacaolín, con un orden cristalino amorfo de dos dimensiones.

Para producir la puzolana debe alcanzarse la deshidroxilación por completo sin sobrecalentamiento, en otras palabras, tostado pero no quemado. A continuación se destacan las fases de reacciones y descomposiciones bajo la acción del calor sobre la caolinita

- Fase de desecación

Transcurre hasta unos 110°C y primero pierde la humedad adsorbida externa y del agua intersticial después, cuya eliminación exige la difusión hasta la superficie y esta difusión está frenada por los efectos capilares. El objeto se contrae, proporcionalmente, al agua eliminada. Para evitar deformaciones, pues interesa amasar, con mínima agua, es decir; arcillas de máxima plasticidad. Por

último, se elimina el agua que recubre superficialmente a las partículas; hay contracción, pero no mucha y, desde luego, no es proporcional.

- Fase de deshidratación

Transcurre hasta unos 350°C con la eliminación del agua de hidratación de coloide (interior del retículo cristalino). Se produce poca contracción, pero sí huecos intergranulares que contribuyen a la mayor porosidad fina del material.

- Fase de reacción

- A aproximadamente 550°C se produce la deshidroxilación de los grupos hidroxilos que contiene la caolinita, formando metacaolinita:



- A 573 °C se produce la transición de fase de cuarzo α a β . No tiene consecuencias en el ciclo de calentamiento por la relativa gran flexibilidad del entramado de partículas empaquetadas.
- Se forma sanidina, feldespato alcalino mezcla en el intervalo de 700°C a 1000°C. La temperatura de formación depende de la relación sodio/potasio. Aumenta la porosidad y la contracción de manera significativa.
- Entre 950 y 1000°C el metacaolín se transforma en una fase con estructura espinela y sílice amorfa libre. La estructura cristalina y composición de la espinela está todavía en discusión. Estudios de microanálisis recientes indican que se trata de un aluminosilicato con estructura de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ conteniendo alrededor de 8 % en peso de SiO_2 .

Figura 8. **Calcinación de caolín de toba e hidrotermal a diferentes temperaturas para la obtención de metacaolín**



2.4.2. Determinación de las propiedades fisicoquímicas del metacaolín

Los procedimientos para el examen físico se pueden obtener, principalmente, de la Sociedad Americana para la Examinación de Materiales (ASTM). Esta organización describe los procedimientos específicos de diferentes arcillas equivalentes para el análisis del metacaolín.

La arcilla se seleccionó de acuerdo con las siguientes propiedades físicas: tipo de arcilla, gravedad específica y tamaño de partícula. De acuerdo con las pruebas químicas se tomó en cuenta la cantidad de óxidos de silicio y aluminio presentes

2.4.3. Método de análisis térmico

El análisis térmico abarca a los grupos de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o productos de reacción en función de la temperatura, mientras la sustancia se somete a un programa de temperatura controlada.

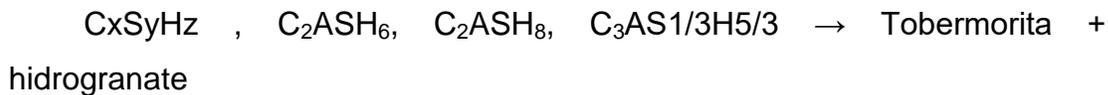
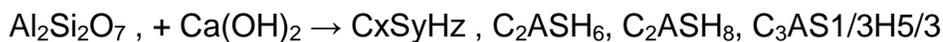
Estos métodos encuentran una amplia aplicación tanto en el control de calidad como en la investigación de productos industriales, como polímeros, productos farmacéuticos, arcillas y minerales. Estos métodos incluyen la termogravimetría (TGA), el análisis térmico diferencial (DTA), termodensimetría (TDA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC).

2.5. Efecto puzolánico del metacaolín

El metacaolín es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente. Se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500°C y 600°C. Esta temperatura transforma su estructura cristalina al romper los enlaces de Van der Waals (OH-) que unen los tetraedros de sílice, SiO₂, y los octaedros de alúmina, Al₂O₃. Es decir; al perder el agua combinada por la acción térmica se destruye la estructura cristalina del caolín. Otros autores han determinado temperaturas diferentes para la producción del metacaolín ampliando el rango entre 700°C y 900°C, mostrando que no solo es importante la temperatura sino el tiempo de estadía, condiciones del horno, tamaño de partícula y pureza del caolín. Una observación importante es que a temperaturas mayores de 950°C decae la actividad puzolánica del metacaolín.

El metacaolín reacciona con el hidróxido de calcio libre del proceso de hidratación del cemento para formar C_2S secundario el cual, posteriormente, forma el gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, el silicoaluminato bicálcico hidratado (gehlenita) y, en algunas ocasiones, hidrogranates (hydrogarnet), que contribuyen con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas.

La reacción:



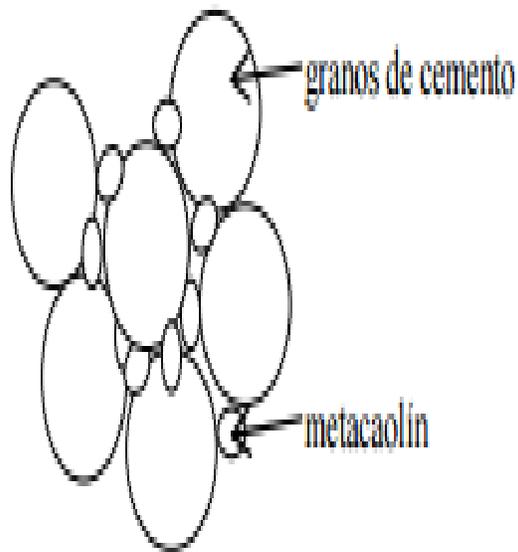
La variación en los productos de la reacción se le atribuye, principalmente, a la variación en la relación sílice/alúmina del metacaolín. Las diferentes investigaciones realizadas con metacaolín permiten establecer un panorama sobre el desarrollo de estos estudios, que dan cuenta del interés de los investigadores en este material. Fundamentalmente, su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y concretos, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y aumento de la durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, comparable o superior al humo de sílice.

La otra finalidad del metacaolín, aún más importante, es la reacción con la portlandita, conocida como reacción puzolánica. Por ser un silicato de aluminio, promueve reacciones con el hidróxido de calcio formando cristales de "C-S-H",

y otros cristales resistentes, pertenecientes al grupo de la gelenita, cuya composición es del tipo silicoaluminato de calcio hidratado.

Esta función puzolánica de alto desempeño lleva a un incremento en la resistencia a compresión y en otras propiedades del concreto.

Figura 9. **Efecto que lleva a un aumento en la compacidad del concreto**



Fuente: Universidad Nacional de Asunción. Facultad de ingeniería. *Hormigones de Alta Resistencia utilizando metacaolín*. p.135.

2.6. Importancia de los aditivos de cemento en la industria

En la industria de la construcción se han desarrollado múltiples aditivos para concretos para otorgarle diversas características. El objetivo de la adición es mejorar las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como sólido.

En su forma básica, el concreto es una mezcla de cemento de diferentes resistencias físico-mecánicas, agua y agregados finos y gruesos. El cemento es el cementante principal en el concreto. La mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante.

Estos materiales son, generalmente, subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, ellos pueden ser procesados, o no, antes de utilizarlos en los concretos. Algunos son denominados puzolanas, que por sí mismos no tienen propiedades cementicias, pero cuando se utilizan con el cemento, reaccionan para formar componentes cementantes.

Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento algunas veces son referidas como adiciones minerales, pero necesitan cumplir los requerimientos de las normas establecidas. Ellos pueden ser incorporados individualmente o en combinación en el concreto, también pueden ser añadidos a la mezcla de concreto como un cemento que contenga la adición, inclusive, como un ingrediente dosificado separadamente en la planta de concreto premezclado.

2.7. Características físicas y químicas del cemento Portland

Ciertas características físicas y químicas del cemento permiten que se realicen cambios en él para mejorar su rendimiento si se dan de la manera

adecuada. Esas características se pueden alterar dando como resultados cementos de baja calidad y poco resistentes. A continuación se explicarán brevemente algunas de ellas.

2.7.1. Características físicas de los cementos Portland

Las características físicas de los cementos Portland están íntimamente ligadas con su contextura, como su nombre hace referencia; su forma, tamaño, su manera de reaccionar y transformarse frente a estímulos de origen físico.

2.7.1.1. Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tiene lugar durante su fraguado y primer endurecimiento.

Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento hidratan solo en profundidades de 0.01 mm, por lo que, si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte.

Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que, en general, resulta perjudicial), el conglomerante resulta más susceptible a la meteorización (envejecimiento) después de un almacenamiento prolongado y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero dado que las resistencias mecánicas aumentan con la finura el cemento Portland debe estar finamente molido, pero no en exceso. Lo deseable es que un cemento alcance sus resistencias debidas, a las distintas edades, por su

calidad de *clínker*, no por la finura de molido. Las nuevas normativas no incluyen prescripciones para finura de molido.

2.7.1.2. Rigidez y resistencia mecánica

Cuando la pasta se fragua, adquiere rigidez y, con el tiempo, resistencia. La resistencia mecánica de un hormigón será mayor si la del cemento empleado también lo es.

Pero esta característica no es la única que debe buscarse, ya que por sí sola no garantiza otras igual de necesarias, o quizás más como la durabilidad. Como resistencia de un cemento se entiende la de un mortero normalizado amasado con arena de características y granulometría determinadas y con relación agua/cemento establecida.

La tabla III describe cómo actúan algunas de las propiedades físicas del cemento de acuerdo con sus componentes químicos.

Tabla III. **Propiedades que aportan los componentes del cemento**

Propiedades	S ₃ C	S ₂ C	C ₃ A	C ₄ AF
Velocidad de hidratación	Grande	Pequeño	Instantánea	Grande
Calor de hidratación	Grande	Pequeño	Grande	Pequeño
Resistencia mecánica	Grande y pronta	Grande y tardía	Escasa	Escasa
Resistencia química	Aceptable	Buena	Malísima	Buena

Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. p. 32.

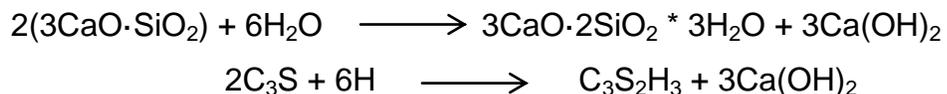
2.7.2. Características químicas de los cementos Portland

Las propiedades químicas del cemento así como las físicas están ligadas con su contextura intermolecular.

2.7.2.1. Análisis conceptual del proceso de fraguado y curado (hidratación del cemento)

Cuando los compuestos potenciales del cemento entran en contacto con el agua, forman productos de hidratación, los cuales, con el paso del tiempo, producen una masa firme y dura que se conoce como pasta de cemento endurecida.⁵

El primer compuesto potencial que se hidrata en proporción considerables es el (C₂S), porque su estructura atrae con mayor facilidad a las moléculas de agua y se presenta en mayor cantidad dentro de la composición del cemento convencional. Su hidratación se realiza según la ecuación (que se presenta en dos simbologías):



Debido a su alta velocidad de hidratación, contribuye de manera muy importante a las resistencias iniciales, siendo su velocidad de hidratación alta.⁶ Cuando el agua entra en contacto con la superficie de las partículas no

⁵ GUTIÉRREZ, Juan. *Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland*. ASTM C188-95. p. 61-62

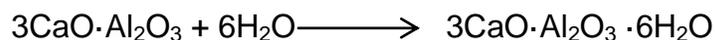
⁶ PONCE, Olga. *La evolución de la industria del cemento con énfasis en Latinoamérica*. p. 60-70

hidratadas, una porción de estas se disuelve y se obtiene una disolución sobresaturada sobre la superficie y una red de hidratos por donde dicha disolución migra hacia los poros más grandes por capilaridad.

Los hidratos que forman la red precipitan gradualmente al ser arrastrados a una superficie o área con diferentes condiciones, dentro de los capilares y, con esto, forman una superficie afín para la aglomeración de las partículas hidratadas subsecuentes. Estos hidratos pueden clasificarse según la región estructural donde se encuentren. Los hidratos internos presentan una estructura más densa y compacta, a pesar de tener una composición constante.

Al precipitar, el C_3S forma “cristales poligonales bien formados”, cuyo tamaño es mayor cuanto más tienden a encontrarse al exterior de la estructura y la definición de su celda es mejor cuanto mayor es la cantidad de partículas de agua que entran en contacto con él. El producto de la hidratación del C_3S se conoce como tobermorita gel (CSH), y es el componente principal de la pasta de cemento, pues le confiere sus propiedades de adherencia y al secarse, es el principal responsable de la resistencia mecánica.

El aluminato tricálcico (C_3A) también presenta una velocidad de hidratación muy alta, el proceso es casi instantáneo, controlado generalmente con la adición de sulfato de calcio. Por tanto, el C_3A compite directamente con el C_3S por las partículas de agua durante los primeros momentos del proceso. Estos son los contribuyentes principales de la resistencia inicial. El proceso de hidratación de este complejo se representa con la siguiente ecuación:



El producto de este subproceso C_3AH_6 , que se conoce como trisulfoaluminato de calcio o etringita, presenta cristales alargados similares a varillas que forman una especie de enrejado, siendo el principal responsable de la expansión del cemento al ser curado.

Finalmente, el C_2S tiene la velocidad de hidratación más baja, proceso que ocurre según la ecuación:

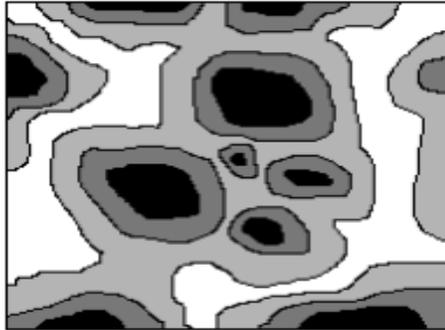


Tanto el C_3S como el C_2S producen hidróxido de calcio como subproducto (en diferente proporción) el cual, dentro de la mezcla, sirve como una reserva alcalina que protege a los otros hidratos de un ataque electroquímico o solvatación por un disolvente y presenta cristales en forma de placas hexagonales de varios milímetros de diámetro, a diferencia de otros hidratos que son amorfos.

Como bien se sabe, el proceso de fraguado y curado del cemento es exotérmico, ya que todos los hidratos presentan una mayor estabilidad que los compuestos potenciales a partir de los que se forman, el valor de entalpía de cada proceso es proporcional a su respectiva velocidad de hidratación.

Es decir, que el proceso de hidratación inicial se lleva a cabo en núcleos de material no hidratado, sobre los cuales se depositan los hidratos, formando su estructura característica, como se muestra en la siguiente figura.

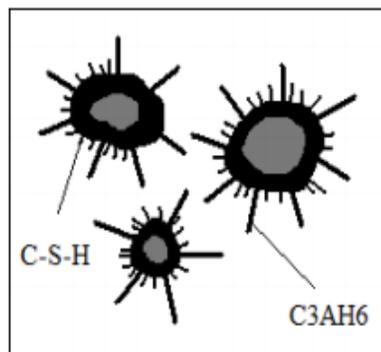
Figura 10. **Esquema bidimensional del proceso de hidratación de las partículas de cemento en una pasta compacta a edad temprana**



Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo, material no hidratado*; gris oscuro: hidratos internos; gris claro: hidratos externos. <http://www.concrete.0catch.com>. Consulta: octubre 2017

Cuando los hidratos se precipitan y crecen suficientemente, comienzan a sobresalir de la superficie de los núcleos y semejan agujas, como se observa en la siguiente figura.

Figura 11. **Representación sistemática del crecimiento de cristales durante el proceso de hidratación**

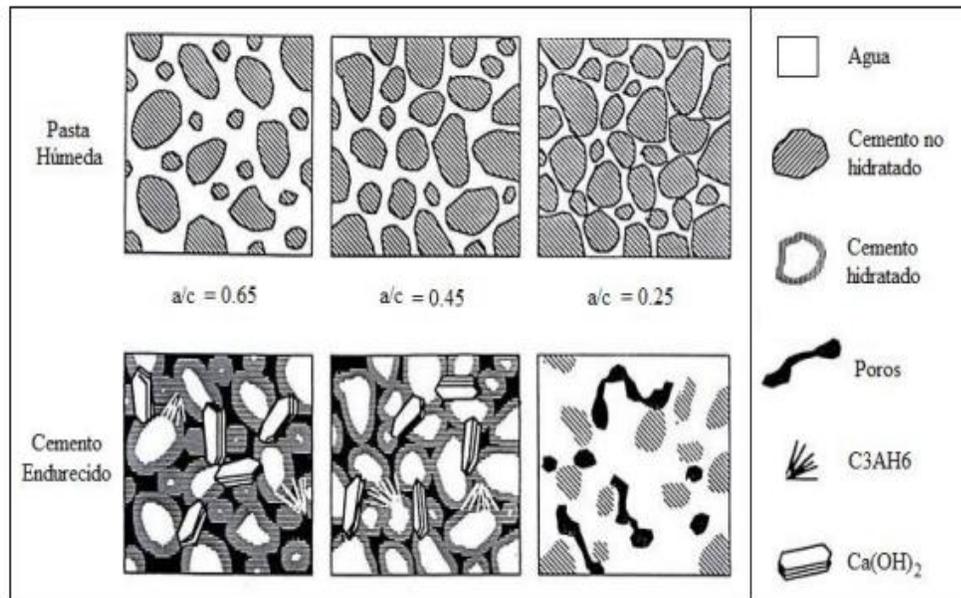


Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. <http://www.concrete.0catch.com>. Consulta: octubre 2017

2.7.3. Estructura y endurecimiento de la pasta de cemento

Considerando lo anterior, se establece que la estructura de la pasta del cemento es: “una suspensión plástica compuesta por diferentes cristales dispersos en una disolución saturada”, que le confieren diferentes propiedades mecánicas a nivel macroscópico.

Figura 12. Representación gráfica de la estructura del cemento durante el fraguado



Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. <http://www.concrete.0catch.com>. Consulta: octubre 2017.

Esto es resultado de una compleja red de relaciones intermoleculares, en un marco compuesto por partículas sólidas y burbujas de aire ocluidas. Aquí se encuentra la influencia de fuerzas intermoleculares de atracción y repulsión, provocadas, específicamente, por iones positivos y negativos en las superficies

sólidas y la disolución que las rodea y, por supuesto, las moléculas de agua presentes en todo el sistema.

Al endurecerse, la estructura del cemento depende del estado anterior, pasta húmeda, cuantificable a través de la relación de agua y sólidos con que se prepara. Esto se observa en la siguiente figura.

Figura 13. **Pasta de cemento hidratada: Ca(OH)_2 y C-S-H**



Fuente: MASSANA GUITART, D. Jordi. *Durabilidad de Morteros de cemento en contacto con purines de cerdo*. <http://www.concrete.0catch.com>. Consulta: octubre 2017.

2.8. Teoría del Color

El ojo es un sistema fotosensible, con un fotorreceptor que es la retina. En ella hay dos tipos de células, los conos y los bastones.

2.8.1. Generalidades

Los conos son los responsables de la visión del color. Hay tres tipos de conos, cada uno de ellos sensible a un tipo de luz distinta: a la luz roja, a la verde y a la azul. No importa cuál sea la composición espectral de la radiación

que llega a la retina, su respuesta será evaluada según tres parámetros (división tricromática).

Las diferentes longitudes de onda del espectro visible, comprendidas aproximadamente entre los 400 y los 700 nm, son percibidas por el ojo humano como colores. Todos los colores son combinación variable de luz roja (r), verde (g) y azul (b).

2.8.2. Fuentes luminosas

Una de las muchas clasificaciones que se podrían hacer de fuentes luminosas es:

- Primarias: las que emiten su propia luz.
- Secundarias: las que reflejan o difuminan la luz emitida por otra fuente.

Si se trabaja con fuentes luminosas primarias se usarán sistemas aditivos, mientras que, si se trabaja con fuentes secundarias.

2.8.3. Medición por modelos de color

La idea de la medición de modelos del color surge para facilitar la especificación de objetos en colores de una forma estándar. Se busca un sistema de coordenadas tridimensional en el cual se defina un subespacio donde cada color quede definido por un punto único.

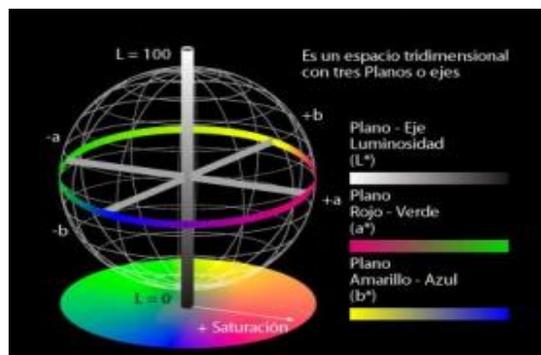
2.8.4. Modelo CIE-L*a*b* (1976)

La necesidad de un espacio de color uniforme condujo a la transformación de una serie de transformaciones no lineales del espacio CIE XYZ 1931 que concluyeron en la especificación concreta de una de estas transformaciones en lo que se conoce como espacio de color CIE 1976 (L*a*b*).

En 1960, la CIE desarrolló el modelo Lu^*v^* . Finalmente, en 1976, para superar los problemas del modelo X y Y, la CIE desarrolló el modelo colorimétrico L*a*b* (también llamado CIE-L*a*b*). El espacio CIE-L*a*b* permite especificar estímulos de color en un espacio tridimensional.

El eje L* es el de luminosidad y va de 0 (negro) a 100 (blanco). Los otros dos ejes de coordenadas son a* y b*, y representan variación entre rojizo-verdoso, y amarillento-azulado, respectivamente con valores que van del -120 al +120. Aquellos casos en los que $a^*=b^*=0$ son acromáticos; por eso el eje L* representa la escala acromática de grises que va de blanco al negro.

Figura 14. Diagrama del espacio del color CIE-L*a*b* (1976) para lecturas de las coordenadas de caolín y metacaolín



Fuente: MÉNDEZ, David Méndez y otros. *Coordenadas del color*. p. 1.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se detallan las variables para el cálculo de los índices de eficiencia puzolánica obtenidos mediante las pruebas mecánicas.

Tabla IV. **Lista de variables**

Variable	Unidad	Descripción
Índice de actividad puzolánica Ip	%	Es el valor que expresa la capacidad de la puzolana para reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementicios.
R	MPa	El promedio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero de ensayo
R1	MPa	El promedio de resistencia a la compresión de las muestras de mortero patrón

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se relaciona al metacaolín obtenido a partir de caolín, llevando a cabo una adición al cemento 5800 y observando su comportamiento.

3.2.1. Localización

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

- Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería/USAC.
- Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Sección de Morteros y Aglomerantes, Facultad de Ingeniería/USAC.
- Laboratorio de Fisicoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia/USAC.
- Laboratorio de Control de Calidad, Siegwark Guatemala, S. A. (Zona 8, Mixco, Guatemala, C. A.)

3.3. Recurso humano disponible

Desarrollo del proyecto: José Rodrigo Ramos Lemus, estudiante de Ingeniería Química.

Asesor: Ingeniero Químico Cesar Alfonso García Guerra, docente de la escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería USAC.

Co-asesora: Ingeniera Civil Dilma Yanet Mejicanos Jol, docente de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería USAC

3.4. Recurso material disponible

El estudio cuenta con equipos para el desarrollo experimental que a continuación se describen.

3.4.1. Equipo

Tabla V. **Equipo auxiliar para el caolín, metacaolín y mezclas para el diseño de morteros con cemento con adición de metacaolín**

Nombre del equipo	Descripción	Marca	Modelo	Aplicaciones
Mufla	Temperatura máxima: 1 000°C 110 V	Barnstead Thermolyne	1 400 Furnace	Calcinación
Mezcladora mecánica eléctrica	Capacidad de 4,73 litros	-	-	Preparación de pasta de cemento
Empastilladora	Presión máxima: 25atm	Fred. S. Carver	One Chatam Road	Pastilla de 13,13mm de diámetro

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Mufla Fisher Scientific capacidad 1 000°C para calcinación de caolín en la obtención de metacaolín**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de extractos vegetales (LIEXVE), USAC.

Figura 16. **Tableteadora Fred. S. Carver con presión máxima de 25 atm para elaboración de tabletas de caolín y metacaolín con diámetro de 13,13mm**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Físicoquímica, Escuela de Química, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia/USAC.

Tabla VI. **Instrumentos de medición en la elaboración de morteros de cemento con adición de metacaolín**

Nombre del equipo	Descripción	Marca	Modelo	Aplicaciones
Prensa para ensayo a compresión	Capacidad máxima: 55 000 kg	-	Tate-Emery Testing Machine Universal	Aplicación de esfuerzo mecánico de compresión
Molde para cubos de cemento	ASTM C109	-	-	Contenedor de especímenes para el fraguado
Balanza analítica	Resolución de 0,001 gramos. Rango 0– 750 gramos 110 V	Radwag	WPS 750/C/1	Medición de masa

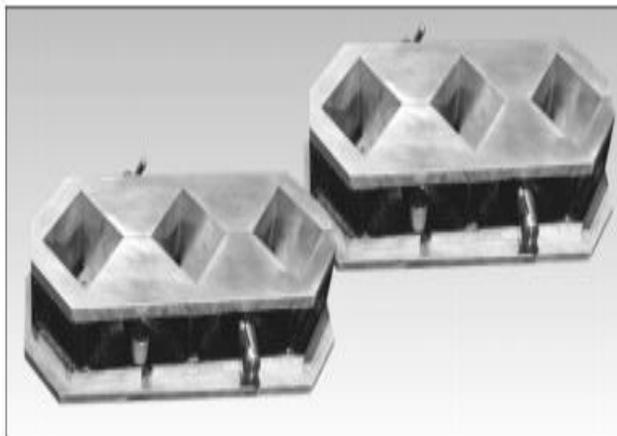
Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Máquina Tate-Emery Testing Machine Universal para la aplicación de esfuerzo mecánico a compresión a los morteros de cemento con adición de metacaolín con capacidad máxima de 55 000 kgf**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Centro de Investigaciones de Ingeniería (CII), Sección de Morteros y Aglomerantes, Facultad de Ingeniería/USAC.

Figura 18. **Moldes cúbicos estándar de acero inoxidable de 5 cm por arista para los diseños de morteros de cemento con adición de metacaolín**



Fuente: elaboración propia.

Figura 19. **Balanza analítica Radwag WPS 750 para la medición de masas del caolín y metacaolín**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de extractos vegetales (LIEXVE), USAC.

Figura 20. **Colorímetro para el análisis de color de materia prima del caolín y metacaolín para sus coordenadas L*a*b**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Control de Calidad, Siegwark Guatemala, S. A. (Zona 8, Mixco, Guatemala, C. A.)

3.4.2. Cristalería

- Cápsulas de porcelana
- Espátula
- Tenazas
- Cronómetro
- Matraz de Le Chatelier especial

3.4.3. Reactivos

- 33 libras Caolín mineral procesado en Surtiquímicos S.A, departamento de El Progreso, Guatemala.
- 1 saco de cemento tipo 5800
- 25 libras de Arena Sílica de testeo, Ottawa
- Agua desmineralizada
- Querosina libre de agua

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La investigación utilizó una técnica cuantitativa debido a la naturaleza del fenómeno de interés, pues los parámetros que lo caracterizan son medibles en su mayoría por métodos convencionales. Los parámetros cualitativos adicionales sirvieron como referencia a la construcción de una interpretación y sus respectivas conclusiones, sin ser el centro de atención dentro de los resultados.

3.6. Establecimiento de la metodología experimental

Se estableció un procedimiento a lo largo de la investigación como parte previa a la fase experimental.

3.6.1. Proceso de recolección de muestras

El proceso para recolectar la información de la calcinación del caolín para la obtención de metacaolín y, posteriormente, utilizarlo como aditivo en los morteros en la evaluación de eficiencia puzolánica se describe a continuación.

3.6.1.1. Identificación del tipo de caolín

Para la identificación del tipo de caolín de procedencia se emplearon tres diferentes métodos, densidad, porcentaje de pérdida en peso y análisis de color.

Figura 21. **Matraz de LeChatelier especial para la determinación de densidad del caolín y metacaolín utilizando como fluido keroseno con capacidad para 10ml**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Porcentaje de pérdida en peso del caolín de origen y metacaolín posterior a la calcinación**

Temperatura (°C)	Pérdida en peso %			
	1	2	3	\bar{x}
25	100	100	100	100
750	91,40	92,85	90,00	91,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Densidad del caolín de origen y metacaolín posterior a la calcinación**

Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)			
	1	2	3	\bar{x}
25	2,216	2,216	2,215	2,216
750	2,860	2,863	2,859	2,861

Fuente: elaboración propia.

3.6.1.2. Preparación de metacaolín

Se colocaron 2 cápsulas de porcelanas con 70,0 gramos cada una de las muestras de caolín; posteriormente, se elevó la temperatura de la mufla (figura 15) a 750°C. Una vez que se llegó y estabilizó la temperatura, se introdujeron las muestras y se dejó durante un periodo de 1 hora. Finalizado este periodo, se extrajo las muestras y se introdujo las siguientes dos porcelanas, así hasta obtener suficiente metacaolín para el diseño de morteros de cemento.

Una muestra de 70,0 gramos de caolín en polvo ya triturado constituyó la unidad experimental. Esta muestra estaba contenida en cápsulas de porcelanas limpiadas previamente con agua regia para eliminar metales que pudieran alterar la calcinación de materia prima y obtención de metacaolín.

Figura 22. **Unidad experimental de caolín que consiste en 70g por crisol para un total de 10 crisoles**



Fuente: elaboración propia .

Figura 23. **Unidad experimental de metacaolín posterior a calcinación del caolín que consiste en 64g. por crisol para un total de 10 crisoles**



Fuente: elaboración propia.

3.6.2. Manejo del experimento

Antes de realizar la adición al cemento, al metacaolín se le realizó diferentes pruebas fisicomecánicas.

3.6.2.1. Determinación del peso residual

Las muestras colectadas se colocaron en una desecadora hasta lograr la temperatura ambiente. Finalmente, se midió el peso (W_r) residual de cada una de ellas. Después se almacenó cada una de las muestras dentro de una bolsa de polietileno hermética para evitar la absorción de humedad y realizar la medición de densidad y color.

3.6.2.2. Determinación de la densidad

La medición de la densidad de caolín y metacolin durante el experimento, se realizó por medio de una variación al Método Estándar para la Determinación de la Densidad de Cemento Hidráulico, según la norma ASTM C 188-95, en el cual se utilizó un matraz de Le Chatelier especial y querosina libre de agua. Se empleó una cantidad de 1.0 gramo como muestra para la determinación de la densidad.

3.6.2.3. Determinación de coordenadas $L^*a^*b^*$ del color

Las medición de las coordenadas $L^*a^*b^*$ del color para el caolín y metacolin, se realizó de acuerdo con una variación en la Norma UNE 80117, "Métodos de ensayo de cementos. Ensayos físicos. Determinación del color en los cementos

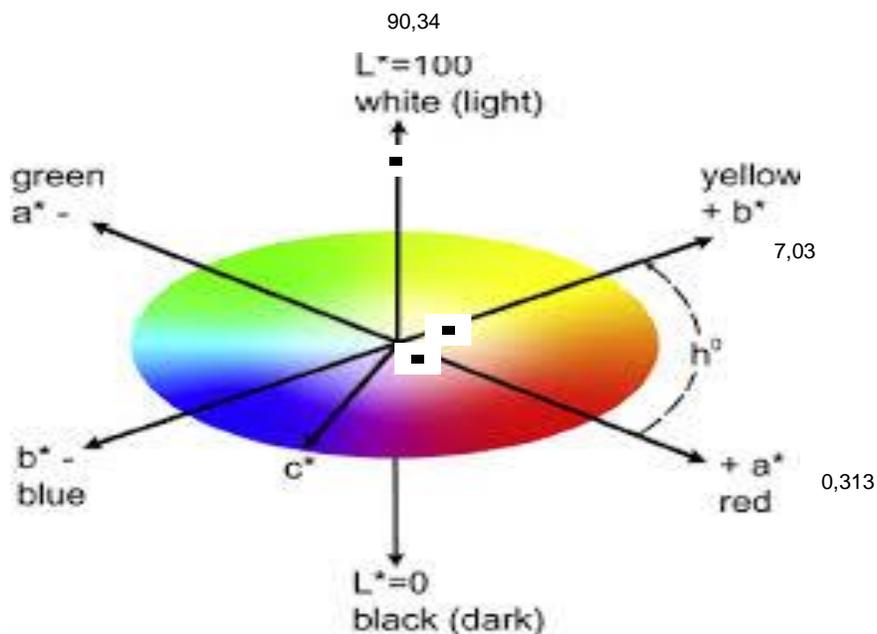
blancos”, en el cual se utilizó una empastilladora (figura 16) la muestra para luego medir los parámetros $L^*a^*b^*$ en un colorímetro en el modelo CIE- $L^*a^*b^*$.

Tabla IX. Promedio de las tres repeticiones realizadas para las coordenadas del color $L^*a^*b^*$ en función de la temperatura de deshidroxilación para el caolín

Temperatura (°C)	L^*	a^*	b^*
25	90,34	0,31	7,03
750	83,70	6,07	14,67

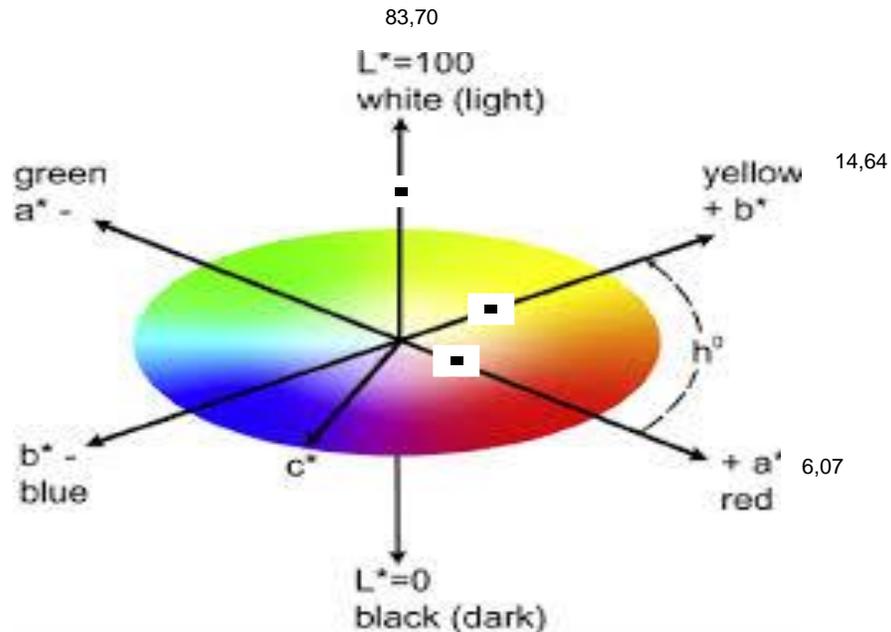
Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Diagrama de las coordenadas $L^*a^*b^*$ de la medición del colorímetro para el caolín de origen



Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Diagrama de las coordenadas L*a*b de la medición del colorímetro para el metacaolín posterior a la calcinación del caolín



Fuente: elaboración propia.

3.6.2.4. Composición del metacaolín

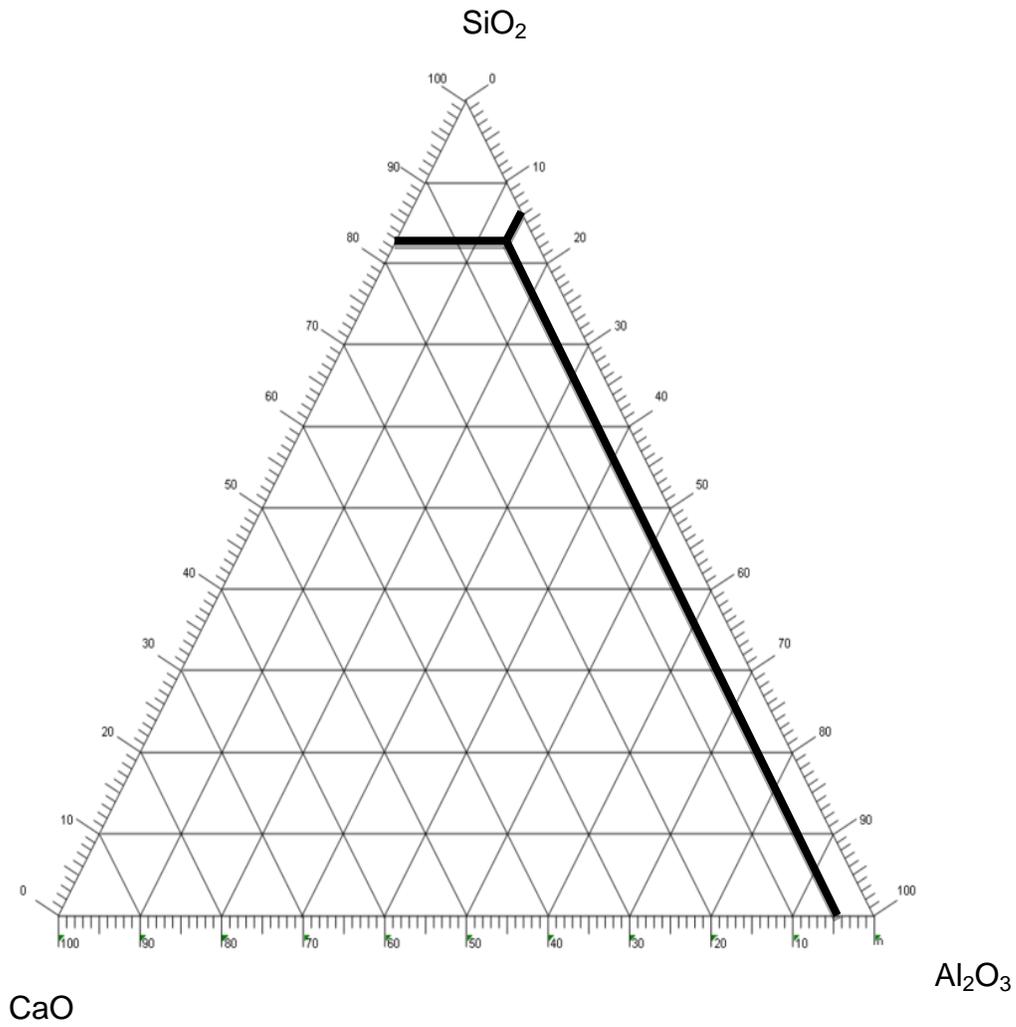
Como se observa en la tabla I, el metacaolín posee diferentes porcentajes de óxidos dependiendo de su pureza y del lugar de origen que fue extraído y procesado. Con apoyo del CETEC de Cementos Progreso se le realizó un análisis de Fluorescencia de rayos X a la materia prima para poder determinar el contenido mineral que posee y se logra observar en la siguiente tabla.

Tabla X. **Fluorescencia de rayos X de metacaolín(750°C) y caolín de origen**

Compuesto	Porcentaje (%)	
	Metacaolin	Caolin
SiO ₂	73,80	32,0
Al ₂ O ₃	12,65	4,0
Fe ₂ O ₃	0,80	11,62
CaO	1,90	24,0
MgO	0,00	2,25
SO ₃	0,00	0,0
P a F	2,29	2,5
Na ₂ O	0,72	1,8
K ₂ O	5,08	18,2
MnO	0,02	0,25
TiO ₂	0,18	0,8
P ₂ O ₅	0,00	0,0
Cr ₂ O ₃	0,06	0,1
Total	97,50	97,52

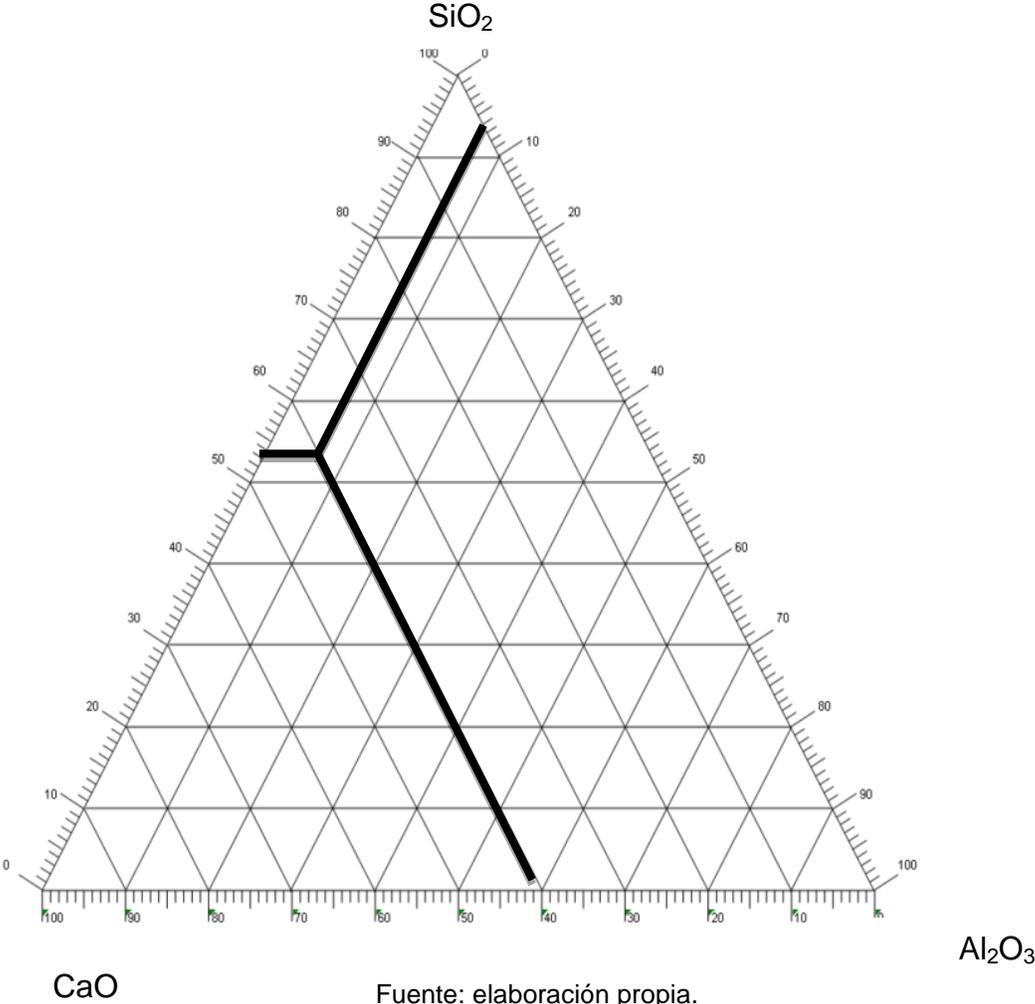
Fuente: CETEC, Cementos Progreso.

Figura 26. **Diagrama Ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ para el metacaolin posterior a la calcinación del caolín**



Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Diagrama Ternario CaO-SiO₂-Al₂O₃ para el caolín de origen



3.6.3. Preparación para ensayos a compresión

Seguido de realizar las pruebas fisicomecánicas al metacaolín se procede a realizar las mezclas con los diseños propuestos.

3.6.3.1. Diseño preliminar

Con la Norma ASTM C109/C109M-05 y Coguanor NTG 41003 H4, se estableció que las muestras de ensayo se conforman con la proporción de cemento y arena estándar para todo ensayo de este tipo y con una forma cúbica de 2 in o 5 cm de arista.

Con los ensayos de resistencia se mide la reactividad puzolánica de una mezcla de material. Dichos ensayos se especifican en la Norma COGUANOR NTG 41044 y tomando como referencia las Normas internacionales como la ASTM C-593 “Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use With Lime” y C-618 “Standard especification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Concrete”, que son las que se aplican para el ensayo de mezclas con cemento adicionado con puzolana

Estas normas indican parámetros de resistencia mínimos que debe cumplir en su resistencia a la compresión a edades 7 y 28 días, que son las edades en las que se conoce la evolución importante de la resistencia, dichos valores se profundizarán, así como, a las normas que les rigen.

La arena que se utilizó se clasifica como estándar, y debía asegurarse un carácter inocuo, es decir, que no existiera la posibilidad de reacción adversa con las partículas del cemento (según ASTM C-289-87).

Figura 28. **Componentes de la mezcla que cuenta con cemento 5 800, metacaolín, arena estándar y agua desmineralizada para el diseño de morteros**



Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Mezcladora mecánica eléctrica para la homogenización de los componentes para el diseño de morteros**



Fuente: elaboración propia.

3.6.3.2. Método para determinar el flow

- Colocar el molde en el centro de la mesa de flow.
- Agregar mortero aproximadamente 1 pulgada de espesor (preparado según Método para la determinación de resistencias a la compresión) en el molde hasta la mitad del mismo.
- Golpear con el tamper 20 veces en toda la superficie del mortero.
- Llenar el molde hasta que sobresalga una pequeña cantidad de mortero, y luego golpear 20 veces con el tamper.
- Nivelar el mortero con una cuchara de albañil, mediante un movimiento suave sobre la orilla del molde.
- Limpiar la mesa de flow de cualquier exceso de mortero o agua que pueda tener en la superficie.
- Retirar el molde del mortero 1 minuto después de completar operación de mezclado. Inmediatamente activar el mecanismo de la mesa de flow para dar 25 golpes en 15 segundos.
- Utilizado un vernier, determinar el flow 4 veces el diámetro del mortero a lo largo de las líneas marcadas sobre la mesa en 4 diferentes posiciones de la mesa sucesivamente.
- Regresar el mortero a la licuadora, para continuar con el método para la determinación de resistencia a la compresión.
- Calcular resultados y anotarlos.

$$\text{Flow} = L1 + L2 + L3 + L4$$

Figura 30. **Mesa para la determinación del flow necesario para comprobar que los diseños de mortero con adición de metacaolín cumplen respecto al mortero de referencia**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Medición de las 4 longitudes por medio de un Vernier para la determinación del flow**



Fuente: elaboración propia.

3.6.3.3. Método para determinar resistencia a compresión de morteros

- Preparar la muestra que se analizará, el agua y la arena por utilizar. Con los materiales preparados se obtienen 9 cubos.
- Colocar las cantidades pesadas de arena, agua, cemento y metacaolin en bolsas plásticas un día anterior de la elaboración de la mezcla. La cantidad de materiales que deben mezclarse a la vez en un molde de mortero para 9 muestras como puede observarse en las siguientes tablas.

Tabla XI. **Proporciones para diseño de mortero patrón**

Material	9 cubos
Cemento (g)	740
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	Necesaria para flow $110 \pm 5,359$
Rel. Agua/Cemento	0,485
MK(g)	0

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XII. **Proporciones para diseño de mortero con 5 % de adición de metacaolín**

Material	9 cubos
Cemento (g)	740
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	354 flow 104
Rel. Agua/mortero	0,478
MK(g)	37

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XIII. **Proporciones para diseño de mortero con 10 % de adición de metacaolín**

Material	9 cubos
Cemento (g)	740
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	360, flow 108
Rel. Agua/Mortero	0,486
MK(g)	74

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XIV. **Proporciones para diseño de mortero con 15 % de adición de metacaolín**

Material	9 cubos
Cemento (g)	740
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	354, flow 105
Rel. Agua/mortero	0,478
MK(g)	111

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XV. **Proporciones para diseño de mortero con 20 % de adición de metacaolín**

Material	9 cubos
Cemento (g)	740
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	374, flow 105
Rel. Agua/mortero	0,505
MK(g)	148

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XVI. Proporciones para diseño de mortero con 5 % de sustitución de metcaolín

Material	9 cubos
Cemento (g)	703
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	347, flow 106
Rel. Agua/mortero	0,49
MK(g)	37

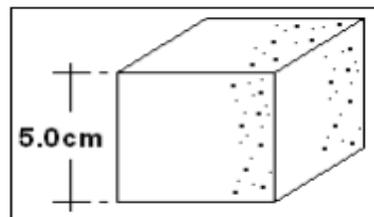
Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

Tabla XVII. Proporciones para diseño de mortero con 10 % de sustitución de metacaolín

Material	9 cubos
Cemento (g)	703
Arena (g)	2 035
Agua aproximada (ml)	347, flow 106
Rel. Agua/mortero	0,49
MK(g)	37

Fuente: elaboración propia según Norma ASTM C 109.

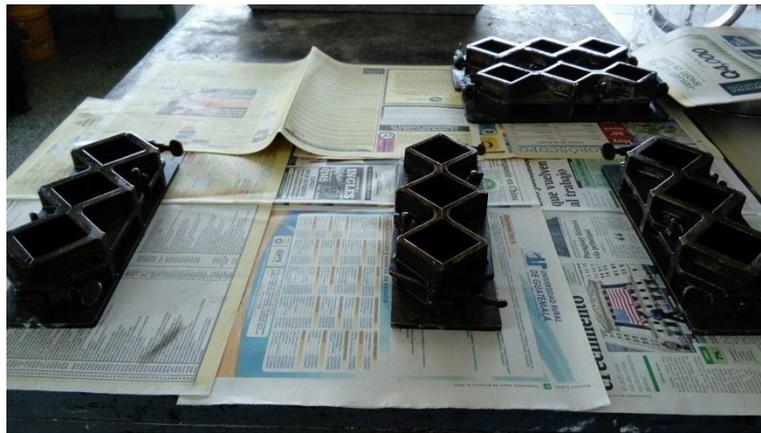
Figura 32. Dimensión del tipo de muestra seleccionado para los morteros de cemento con adición de metcaolín



Fuente: elaboración propia según Norma ASTM International-ASTM C109/C109M-05, 2005.

- Realizar para cada una de las mezclas el mismo procedimiento que se detalló para la determinación del flow.

Figura 33. **Moldes de acero inoxidable que se utilizó para los diseños de mortero**



Fuente: elaboración propia.

- Iniciar el llenado de los moldes con el mortero en un tiempo no mayor a 2 minutos y 30 segundos de haber finalizado la mezcla del mortero. El llenado se hace en 2 etapas: se coloca una primera etapa de mortero de aproximadamente 1 pulgada de espesor (la mitad de la profundidad del molde). Se golpea con el tamper el mortero en cada compartimiento de los cubos, 32 veces aproximadamente. La presión aplicada deberá ser la necesaria para asegurar el llenado uniforme de los moldes.
- Llenar cada uno de los cubos hasta completar el volumen con el mortero que sobra en el tazón, siguiendo los pasos de llenado en la primera capa y llevando el mortero hasta los extremos del molde.
- Identificar los moldes y colocarlos en el gabinete.

- Sacar los cubos de los moldes en un tiempo de 24 +/- 0.5 horas después de haber finalizado su preparación y colocarlos en agua satura con cal, dentro del gabinete.

Figura 34. **Llenado de moldes posterior al proceso de mezclado en el que se llevó a cabo el endurecimiento de los morteros**



Fuente: elaboración propia.

Figura 35. **Morteros de cemento luego de ser desencofrados de los moldes con 5cm por arista para posteriormente iniciar el fraguado**



Fuente: elaboración propia.

3.6.3.4. Ensayo de la resistencia a compresión

- Determinar la resistencia a compresión. Para ello, colocar las muestras dentro de la maquina rompe cubos, al cumplirse cada una de las edades en el ensayo con su respectiva tolerancia en horas:

Edad de la Prueba	Tolerancia
3 días	± 1 h
7 días	± 3 h
28 días	± 12 h

Fuente: elaboración propia.

- Si más de una muestra es removida del gabinete para la prueba, mantener las muestras con limpiado seco hasta que se cumpla el tiempo de prueba. Es preferible mantener las muestras en agua con cal dentro del gabinete húmedo, hasta el tiempo de prueba.
- Secar las muestras con un paño y remover las partículas del cubo. Revisar que las caras donde se aplicará la fuerza, se encuentren planas, marcarlas y medir sus dimensiones así como su peso.

Figura 36. **Mortero de cemento sometido a ensayo mecánico a compresión en la prensa hidráulica**



Fuente: elaboración propia.

3.7. Análisis estadístico

Para la interpretación y análisis de los datos se utilizó diferentes fórmulas estadísticas.

3.7.1. Dato promedio estadístico

El promedio (\bar{a}) permite obtener un dato representativo para cada variable en cada medición, de esta forma se tomaron en cuenta las posibles variaciones aleatorias junto con la desviación estándar:

$$\bar{a} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio

a_i : valor i .

n : número de datos.

3.7.2. Desviación estándar

La desviación estándar (S_a), permite cuantificar la dispersión de los valores para una misma medición respecto al valor promedio, lo cual representa el error aleatorio causado por diversos factores:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_i^n |\bar{a} - a_i|}{n - 1}}$$

Donde:

\bar{a} : valor promedio

ai: valor i.

n: número de datos.

S_a: desviación estándar de la variable a.

3.7.3. Análisis de varianza

El análisis de varianza realizado permite determinar si el error sistemático en los datos de cada variable, pueden atribuirse a factores reales y comprobables, o pueden considerarse errores aleatorios, al relacionarlas entre sí.

Tabla XVIII. Ecuaciones para el análisis de varianza

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados(SC)	Cuadrado de Medias	F Calculada	F Tabulada
Bloques	r - 1	$\sum_{k=1}^r \frac{Y_{..k}^2}{ab} - \frac{Y_{...}^2}{abr}$	SC _{bloq} /gl _{bloq}	CM _{bloq} /CM _{ee}	
A	a - 1	$\sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{rb} - \frac{Y_{...}^2}{abr}$	SC _A /gl _A	CM _A /CM _{ee}	F _{tab(a-1, gl_{ee}, α)}
B	b - 1	$\sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{ra} - \frac{Y_{...}^2}{abr}$	SC _B /gl _B	CM _B /CM _{ee}	F _{tab(b-1, gl_{ee}, α)}
AB	(a - 1) (b - 1)	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{r} - \frac{Y_{...}^2}{abr} - SC_A - SC_B$	SC _{AB} /gl _{AB}	CM _{AB} /CM _{ee}	F _{tab(a-1, b-1, gl_{ee}, α)}
Error	ab - 1 (r - 1)	SC _{TOTAL} - SC _{bloques} - SC _A - SC _B - SC _{AB}	Sc _{ee} /gl _{ee}		
Total	abr - 1	$\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^r Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{...}^2}{abr}$			

Fuente: OCHAETA, Karen. *Análisis de las Curvas Termogravimétricas (640 mm de Hg) para el estudio de la calcinación de tres calizas con diferente contenido de magnesio en función de la densidad utilizando el método ASTM C188-95.* p.4.

El análisis de varianza para determinar si la fuente de variación (A: tiempo de fraguado y B: eficiencia puzolánica) influye de manera que existan diferencias significativas entre las respuestas de cada tratamiento.

Regla de decisión:

Si $F_c \geq F_t$ Se rechaza la hipótesis nula (es decir, si existen diferencias significativas)

Si $F_c < F_t$ No se rechaza la hipótesis nula.

Asimismo, si la diferencia entre F_c y F_t es positiva, se analizará de la siguiente manera:

- $\log(F_c - F_t) < 0$ = Diferencia poco significativa
- $0 < \log(F_c - F_t) < 1$ = Diferencia significativa baja
- $1 < \log(F_c - F_t) < 10$ = Diferencia significativa notable
- $10 < \log(F_c - F_t) < 100$ = Diferencia significativa extraordinaria.

4. RESULTADOS

Tabla XIX. **Diseño experimental de ensayos de mortero testigo (0 % de aditivo de metacaolín)**

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 700	3 760	5 150
R2	3 630	4 650	4 940
R3	3 770	4 880	4 900
Promedio	3 700	4 400	5 000

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Diseño experimental de ensayos de mortero con 5 % de aditivo de metacaolín**

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 400	4 710	5 450
R2	3 670	4 540	6 250
R3	3 630	4 360	5 490
Promedio	3 570	4 500	5 700

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Diseño experimental de ensayos de mortero con 10 % de aditivo de metacaolín**

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	4 150	4 740	4 920
R2	4 370	5 110	5 790
R3	4 070	4 960	5 240
Promedio	4 200	4 900	5 300

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Diseño experimental de ensayos de mortero con 15 % de aditivo de metacaolín**

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 670	4 870	4 630
R2	4 080	4 930	4 480
R3	4 130	5 190	6 260
Promedio	4 000	5 000	5 100

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. Diseño experimental de ensayos de mortero con 20 % de aditivo de metacaolín

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 570	5 240	5 810
R2	3 810	4 380	6 080
R3	4 220	5 020	5 630
Promedio	3 900	4 800	5 800

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. Diseño experimental de ensayos de mortero con 5 % de sustitución con metacaolín

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 320	4 110	4 180
R2	3 210	3 020	3 930
R3	3 460	4 220	4 580
Promedio	3 300	3 800	4 200

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. Diseño experimental de ensayos de mortero con 10 % de sustitución con metacaolín

Resistencia (PSI)	Tiempo (días)		
	3	7	28
R1	3 700	3 990	4 610
R2	3 500	3 880	4 910
R3	3 660	4 100	4 930
Promedio	3 620	3 990	4 820

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. Índice de eficiencia puzolánica para morteros con sustitución de metacaolín

Porcentajes de adición	Edad en Días		
	3	7	28
0%	100 %	100 %	100 %
5%	89,2 %	86,4 %	84,0 %
10%	97,8 %	90,7 %	96,4 %

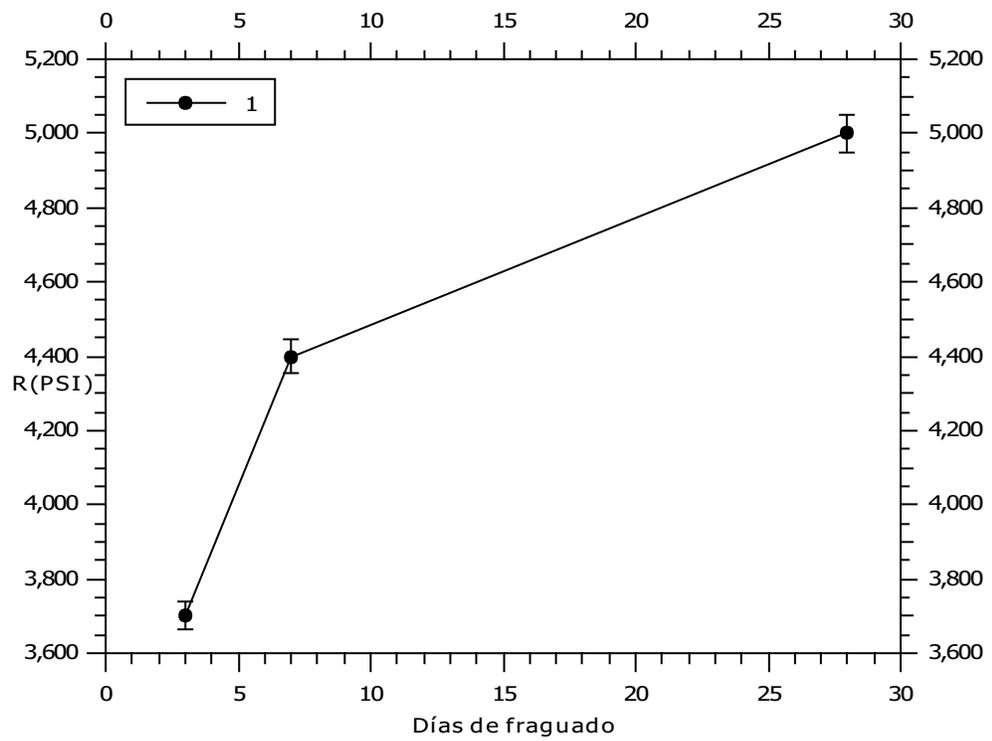
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. Índice de eficiencia puzolánica para morteros con adición de metacaolín

Porcentajes de adición	Edad en Días		
	3	7	28
0%	100 %	100 %	100 %
5%	96,5 %	102,3 %	114 %
10%	113,5 %	111,4 %	106,0 %
15%	108,1 %	113,6 %	102,0 %
20%	105,4 %	109,1 %	116,0 %

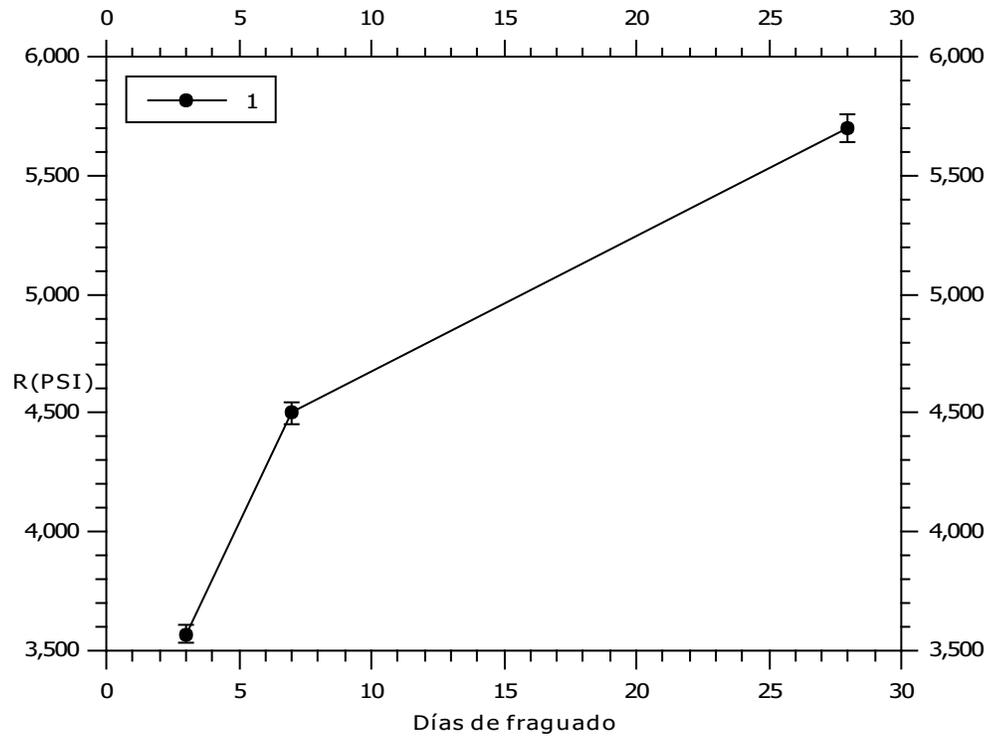
Fuente: elaboración propia.

Figura 37. **Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado en mortero patrón**



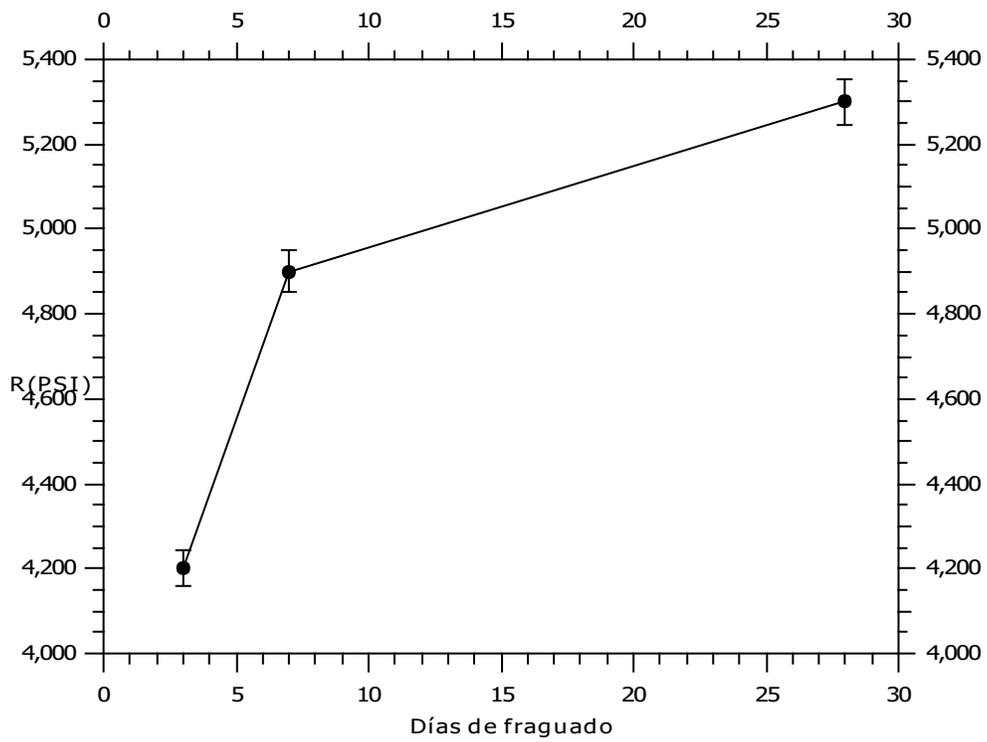
Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 5 % de adición de metacaolín**



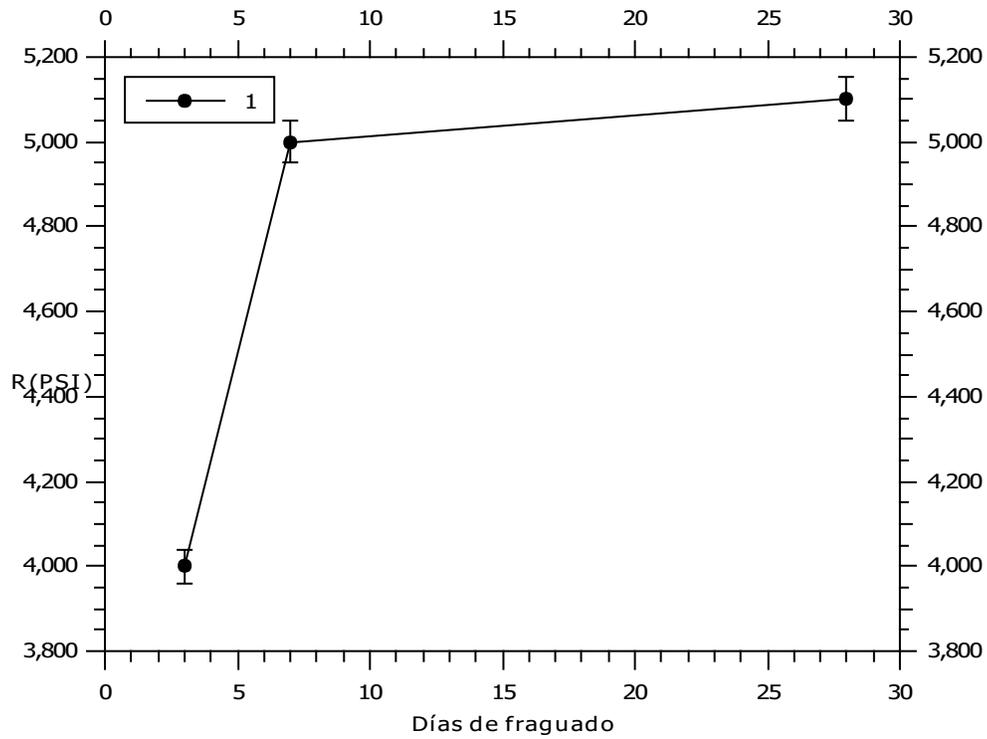
Fuente: elaboración propia.

Figura 39. **Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 10 % de adición de metacaolín**



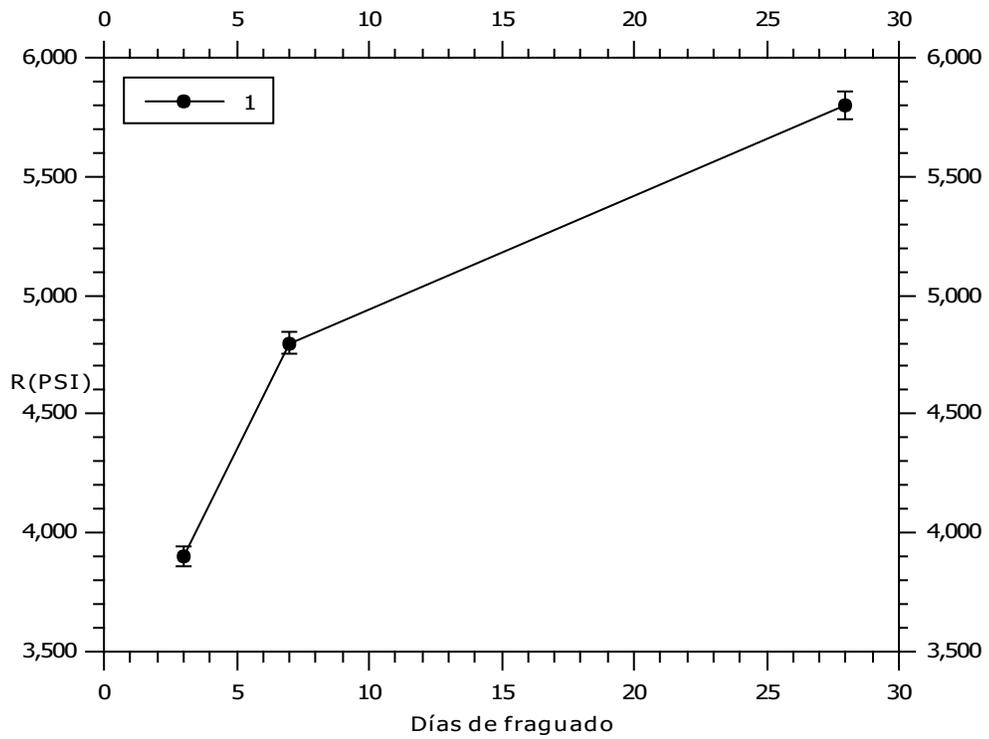
Fuente: elaboración propia.

Figura 40. **Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 15 % de adición de metacaolín**



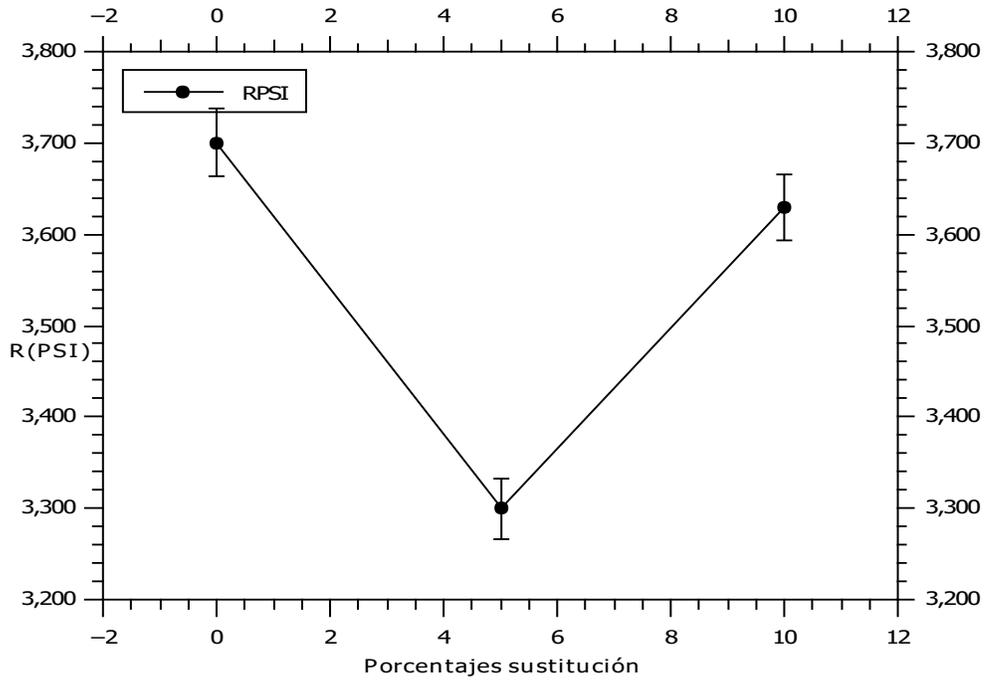
Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Comportamiento de resistencia a la compresión vrs. días de fraguado con 20 % de adición de metacaolín**



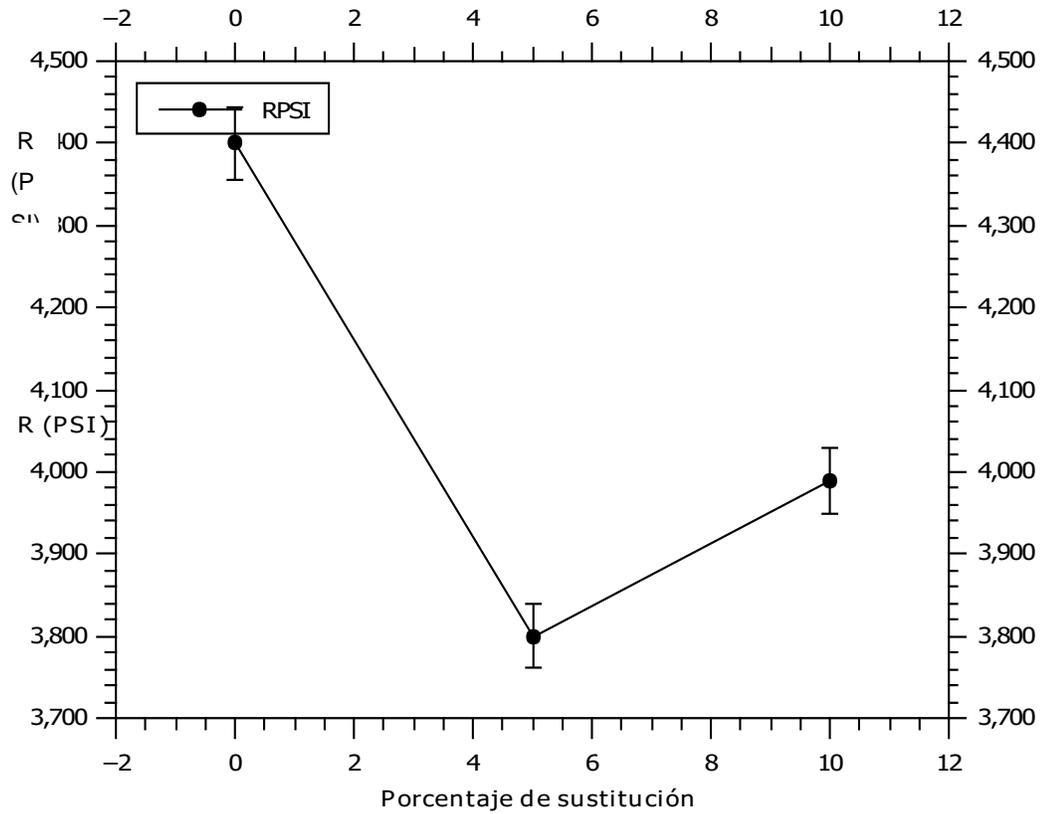
Fuente: elaboración propia.

Figura 42. **Comparativa de resistencia a la compresión a 3 días vrs. porcentajes de sustitución de metacaolín**



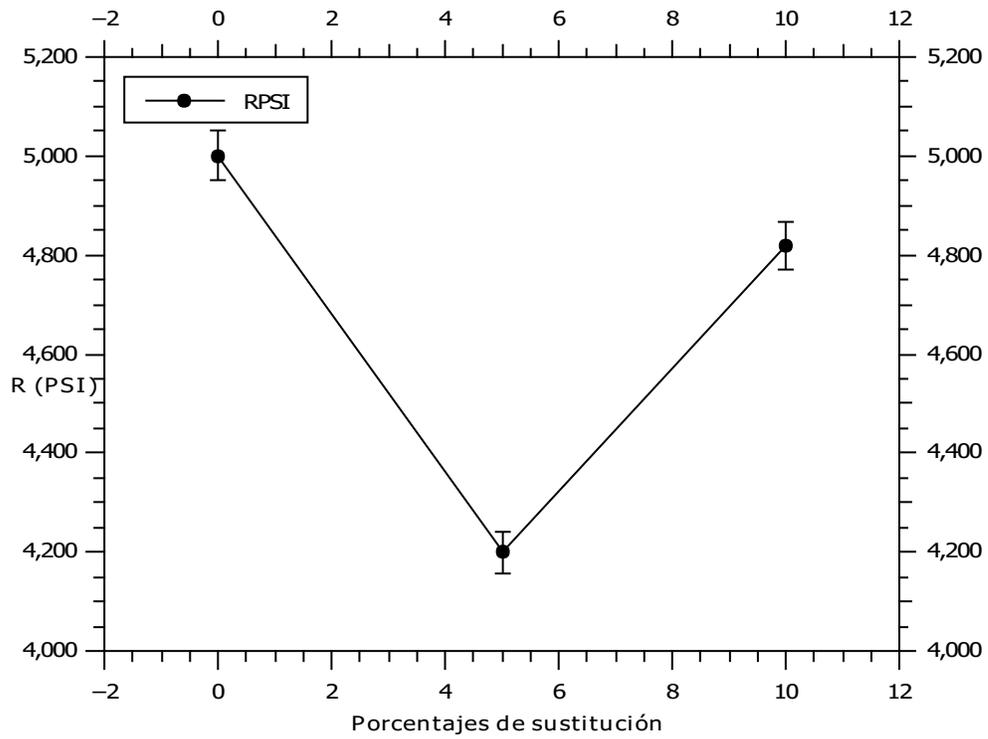
Fuente: elaboración propia.

Figura 43. **Comparativa de resistencia a la compresión a 7 días vs. porcentajes de sustitución de metacaolín**



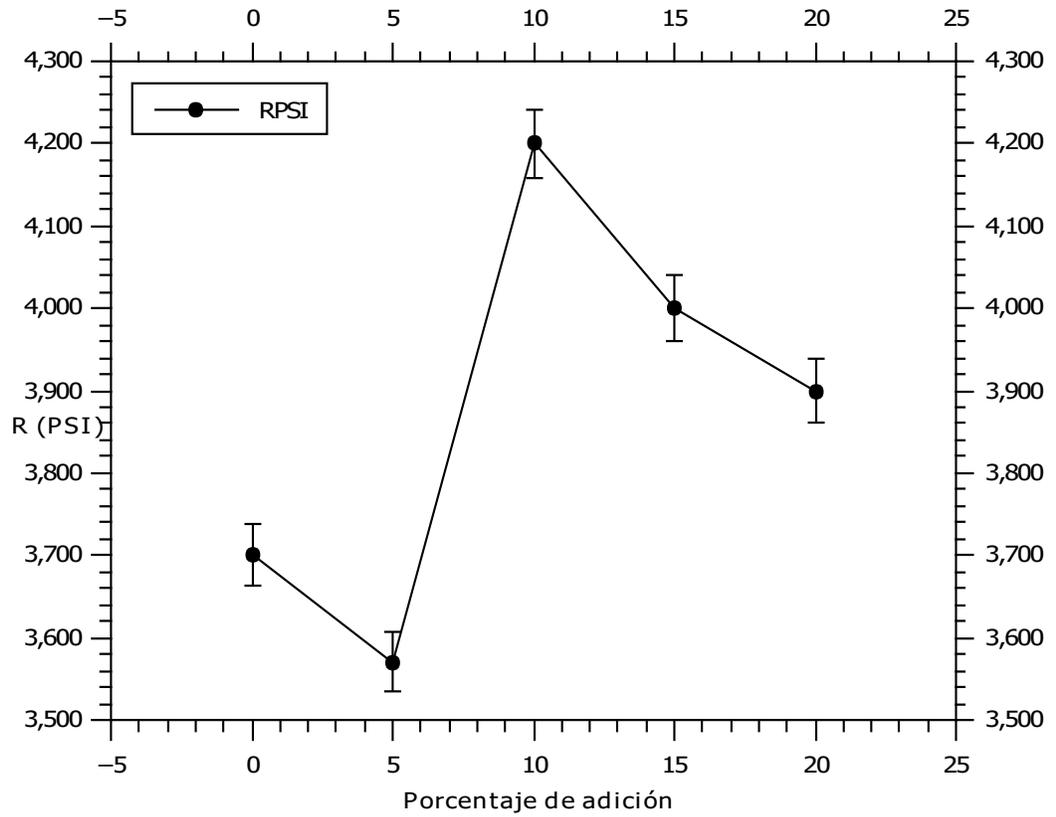
Fuente: elaboración propia.

Figura 44. **Comparativa de resistencia a la compresión a 28 días vrs. porcentajes de sustitución metacaolín**



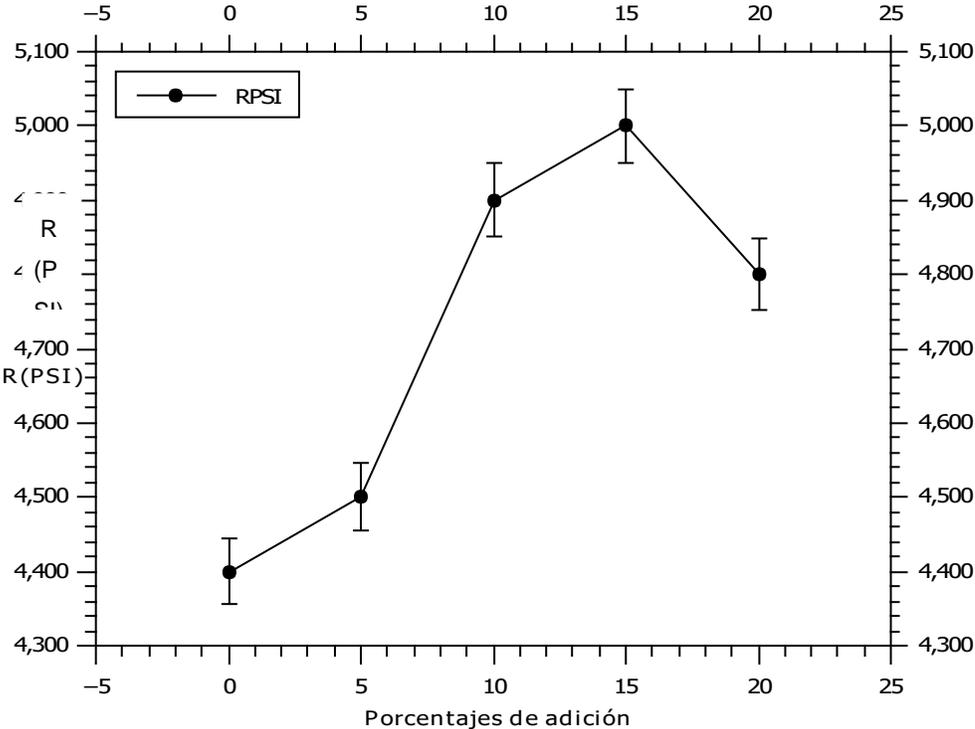
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Comparativa de resistencia a la compresión a 3 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín**



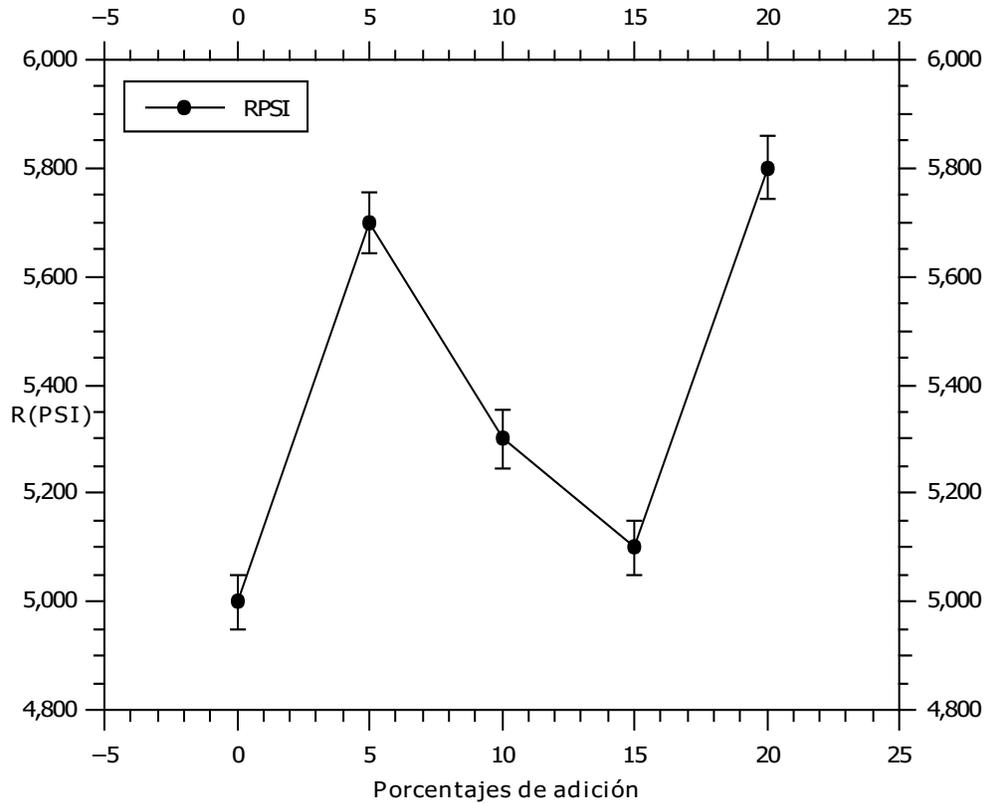
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **Comparativa de resistencia a la compresión a 7 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín**



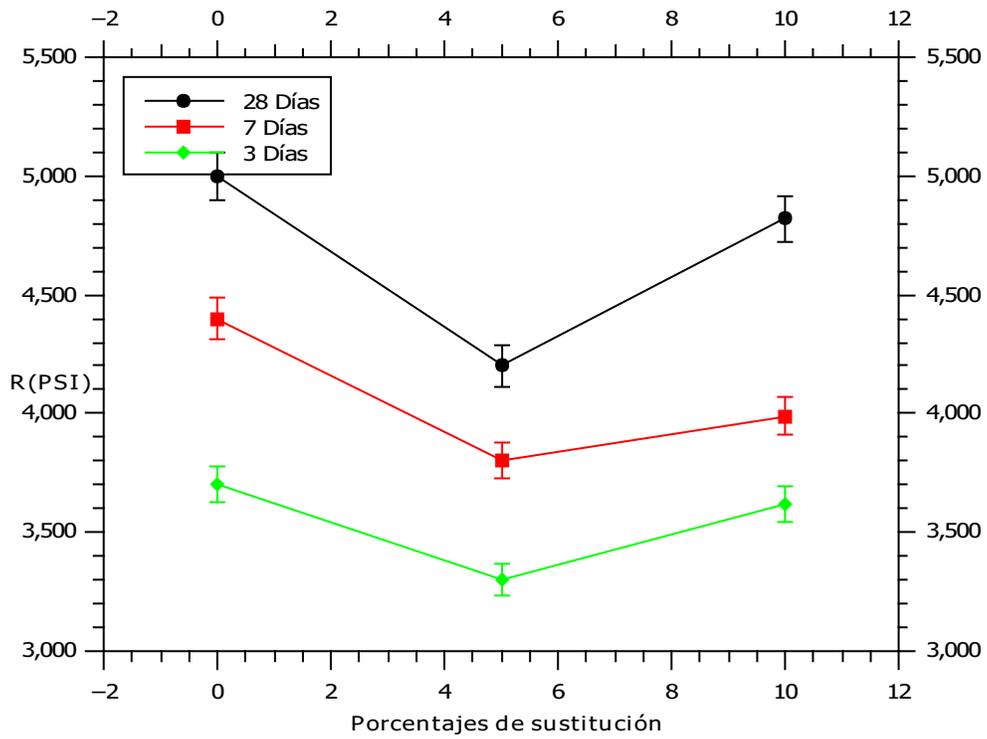
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **Comparativa de resistencia a la compresión a 28 días vrs. porcentajes de adición de metacaolín**



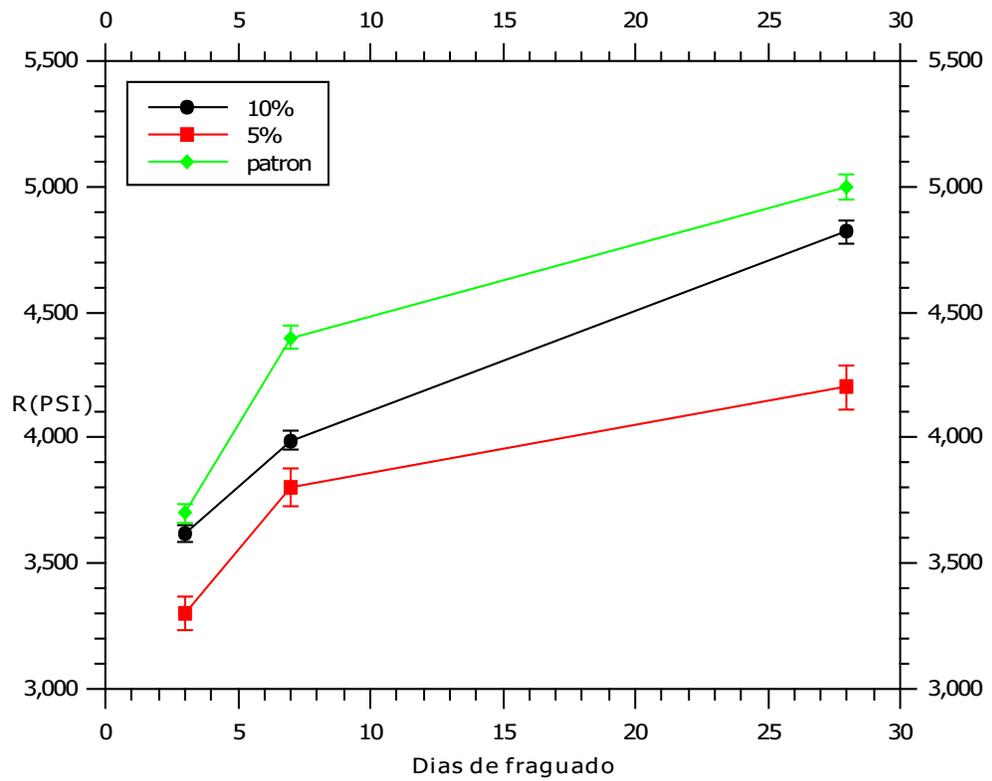
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Comparativa de resistencia a la compresión vrs. porcentajes de sustitución de metacaolín**



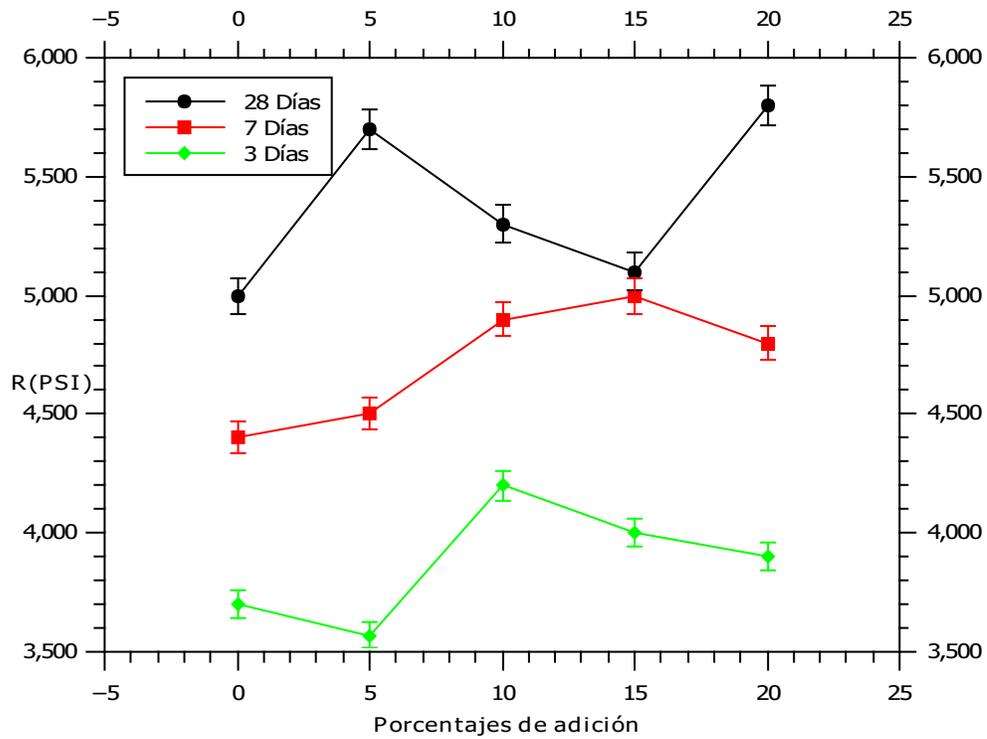
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Comparativa de resistencia a la compresión en sustitución de metacaolín vrs. días de fraguado**



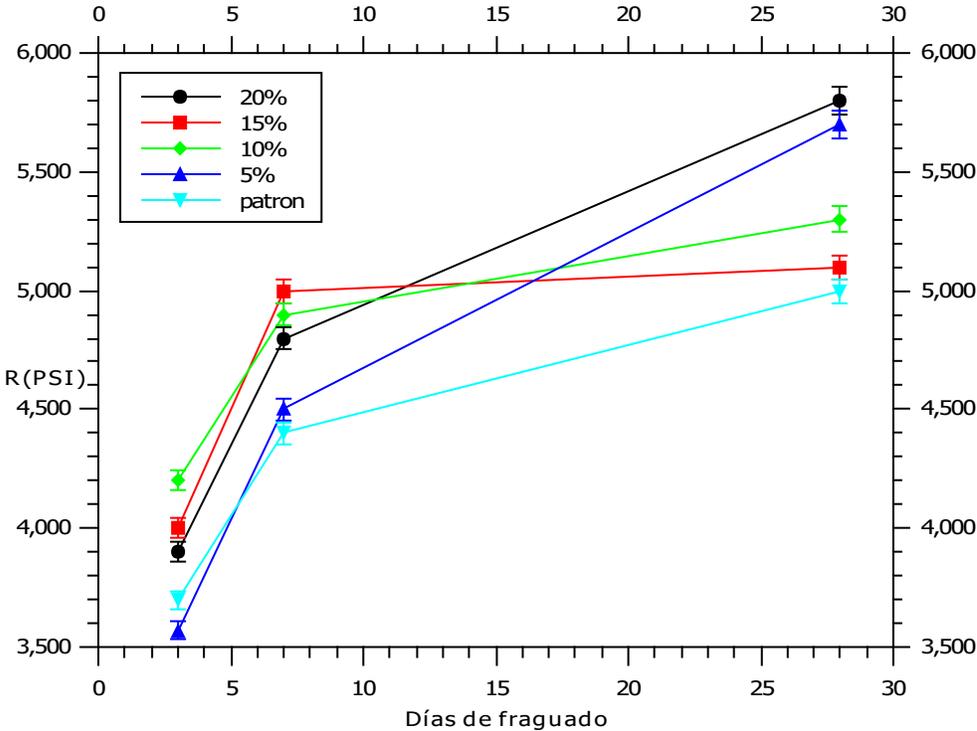
Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Comparativa de resistencia a la compresión vrs. porcentajes de adición de metacaolín**



Fuente: elaboración propia.

Figura 51. Comparativa de resistencia a la compresión en adición vrs. días de fraguado



Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVIII. **Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para portero patrón**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
3 Días	3,00	11 100,00	3 700,00	4 900,00		
7 Días	3,00	13 290,00	4 430,00	349 900,00		
28 Días	3,00	14 990,00	4 996,67	18 033,33		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Pro.</i>	<i>F Cri</i>
Entre grupos	2535355,556	2	1267677,7778	10,2004	0,0117	5,1433
Dentro de los grupos	745666,667	6	124277,7778			
Total	3281022,222	8				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: con una F experimental mayor a la crítica y con probabilidad por debajo de 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación. Por lo que se afirma que existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado.

Tabla XXIX. **Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 5 % de adición de metacaolín**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
3 Días	3	10 700	3566,666667	21233,333		
7 Días	3	13 610	4536,666667	30633,333		
28 Días	3	17 190	5 730	203200		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Proba.</i>	<i>F Cri</i>
Entre grupos	7044955,5	2	3522477,78	41,430	0,000308	5,143
Dentro de los grupos	510133,33	6	85022,22			
Total	7555088,	8				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: con una F experimental mayor a la crítica y con probabilidad por debajo de 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación. Por lo que se afirma que existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado.

Tabla XXX. **Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 10 % de adición de metacaolín**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
3 Días	3	12 590	4196,666667	24133,3333		
7 Días	3	14 810	4936,666667	34633,3333		
28 Días	3	15 950	5316,666667	193633,3333		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>F Cri</i>
Entre grupos	1946400	2	973200	11,56735	0,0087342	5,143253
Dentro de los grupos	504800	6	84133,333			
Total	2451200	8				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: con una F experimental mayor a la crítica y con probabilidad por debajo de 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación. Por lo que se afirma que existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado.

Tabla XXXI. **Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 15 % de adición de metacaolín**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
3 Días	3	11 880	3960	63700		
7 Días	3	14 990	4996,666667	28933		
28 Días	3	15 370	5123,333333	974633		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Proba.</i>	<i>F Cri</i>
Entre grupos	2444066,667	2	1222033,333	3,4350	0,10132	5,14325
Dentro de los grupos	2134533,333	6	355755,5556			
Total	4578600	8				

Fuente: elaboración propia 2018.

Conclusión: con una F experimental menor a la crítica y con probabilidad por arriba de 0.05 se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis de investigación. Por lo que se afirma que no existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado.

Tabla XXXII. **Análisis de varianza de un factor para la variación de actividad puzolánica para 20 % de adición de metacaolín**

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
3 Días	3	11 600	3 866,666667	108033		
7 Días	3	14 640	4 880	199600		
28 Días	3	17 520	5 840	51300		
ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>F Cri</i>
Entre grupos	5842488,9	2	2921244,444	24,416	0,0013	5,1432
Dentro de los grupos	717866,7	6	119644,4444			
Total	6560355,6	8				

Fuente: elaboración propia.

Conclusión: con una F experimental mayor a la crítica y con probabilidad por debajo de 0.05 se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis de investigación. Por lo que se afirma que existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio constó de dos partes: la preparación y análisis de la materia prima: metacaolin procedente de caolín; y la segunda el diseño de morteros de cemento tipo 5800 con metacaolin utilizado como puzolana para posteriormente someterlos a pruebas fisicomecánicas como lo es el esfuerzo a compresión.

5.1. Respecto al análisis de materia prima

Como materia prima se trabajó con un tipo de arcilla llamada caolín, el caolín es un compuesto alumino-silicatos que tiene como fórmula $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ y se puede clasificar de dos tipos: de toba triturada e hidrotermal, antes de trabajarla se le realizó distintos análisis preliminares para comparar y determinar con estudios previos qué tipo de caolín es el que se posee.

El comportamiento del caolín, a lo largo de su deshidroxilación, se puede estudiar en función sus propiedades fisicoquímicas, en este caso, se evaluaron las variaciones en el peso, densidad y color en función de la temperatura de calentamiento las cuales se relacionan directamente con la pérdida de agua intermolecular y cambios en su estructura cristalina durante la reacción de deshidroxilación ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Calor} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}\uparrow$). Este fenómeno hace que, tanto la pérdida en peso y densidad del caolín a 750°C , varíen en comparación con la atmosférica, así como el cambio notorio en el color y en su composición química.

El primer estudio que se le realizó fue el porcentaje de pérdida en peso del caolín después de haberlo sometido a la calcinación a 750°C con 3 réplicas cada una con un tiempo de residencia de una hora, luego de retirar las muestras del horno de calcinación, se colocaron en una desecadora, dejando que estas alcanzaran la temperatura ambiente e inmediatamente se realizó la medición de peso residual de cada una de ellas. Después, se almacenó cada una de las muestras dentro de una bolsa de polietileno hermética, con el fin de conservarla sin absorción de humedad, para posteriormente medir su densidad y parámetros L*a*b* de color.

Las condiciones experimentales involucran la velocidad de calcinación para realizar la deshidroxidación, la atmósfera interna del horno, la cantidad de peso inicial de las muestras, la medición exacta y puntual del cambio de peso de las muestras, el tiempo de calcinación a la temperatura establecida, y la humedad contenida en las mismas. También incluye las propiedades del caolín que afectan a su calcinación, como la estructura cristalina, la densidad y su pureza o concentración en las muestras analizadas.

El resultado mostró una pérdida de peso promedio de 8.58 % que, según antecedentes el metacaolín, contiene una pérdida en peso en un rango de 8 %-10 %. A temperaturas mayores a 800°C el metacaolín se transforma en una fase con estructura espinela y sílice amorfa libre por lo cual reduce considerablemente sus propiedades puzolánicas por lo que se tuvo cuidado de que la temperatura se mantuviera estable.

El segundo estudio preliminar fue la medición de la densidad del caolín a temperatura ambiente y a 750°C, utilizando el método de LeChatelier especial con queroseno libre de agua que a diferencia del tradicional, éste tenía una mayor precisión en la medida del volumen mejorando indirectamente la

precisión en la densidad. Esto se logró uniendo la boca superior de una bureta con una precisión ± 0.05 ml y rango de 5ml con la parte inferior de balón de 25ml.

La norma ASTM C 188-95 indica que primero se introduce una cantidad definida de querosina y, luego, se añade el sólido, en este caso fue 1.0 gramo de caolín. Luego se dejó reposar por 20 minutos para realizar la lectura de la querosina. La diferencia de volumen con sólido y sin él es el volumen del caolín de 1 gramo dando una lectura de 2,216 g/ml y 2,861 g/ml respectivamente. Como se observa es notorio el cambio de densidad debido al tratamiento térmico de deshidroxilación que modifica su estructura cristalina.

Las medición de las coordenadas $L^*a^*b^*$ del color de cada una de las muestras obtenidas durante el experimento se realizó de acuerdo una variación en la norma UNE 80117. Consistió en prensar la pastilla, el cual se preparó con 0.5 g y que se realizó con una empastilladora ubicada en el laboratorio fisicoquímico de ciencias químicas y farmacia.

El ensayo comparativo de color se realizó en el laboratorio de control de calidad de Siegwerk, que consistió en colocar las muestras en un colorímetro para analizar en un fondo blanco, donde después de calibrar el equipo con las coordenadas del fondo, se coloca la muestra en el fondo para medir con el lector las coordenadas, el cual en su pantalla despliega las coordenadas $L^*a^*b^*$ de la muestra. El fin del análisis es comprobar si existe diferencia en el color de las muestras debido a la deshidroxilación en las mismas.

Como se observa en la tabla IX y en la Figura 24 que las coordenadas si coinciden con las de Roberto Lainfiesta(10), al observar la Figura 25 se observa que las coordenadas a^* y b^* tienen una variación significativa en comparación

con la Figura anterior, aumentando en el metacaolín sus coordenadas a^* y b^* y disminuyendo su coordenada L^* con respecto al caolín de origen, esta figura no coincide del todo con estudios previos, esto se debe ya que son de diferentes zonas geológicas que fueron extraídas las materias primas.

Las impurezas pudieron ser constatadas mediante el Método de Fluorescencia de rayos X. La fluorescencia de rayos X (FRX o XRF) es la técnica clave para la caracterización de la composición de los elementos de los materiales geológicos. La última generación de instrumentación de longitud de onda dispersiva de FRX emplea un área pequeña de análisis y una etapa de XY para realizar automáticamente varias mediciones de una muestra para producir un mapa de composición química.

El análisis de impurezas para el metacaolín se realizó en las instalaciones de cementos progreso en el laboratorio del CETEC, como se observa en la tabla X contiene un Dióxido sílice (SiO_2) con un 73.8 % y un Dióxido de aluminio de 12.65 %, los dos principales minerales de interés. Luego se observan las demás impurezas como óxidos de hierro (Fe_2O_3), óxidos de magnesio (MgO), óxidos de sodio (Na_2O), óxidos de potasio (K_2O) y óxidos de calcio (CaO), etc. No presenta contenido de óxido de magnesio, sustancia que reduce significativamente el efecto puzolánico ya que actúa como agente oxidante dentro de las mezclas.

El metacaolín empleado en las mezclas de concreto realizadas es de clasificación N según la Norma ASTM C-618-08^a como se puede observar en la tabla II, que son puzolanas naturales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias. Así mismo esta norma contiene valores mínimos requeridos para que sea considerado como puzolana en el que la sumatoria de los porcentajes de silicio, aluminio y hierro sea de 70 % como mínimo, el

metacaolin como se observa en la tabla X contiene una sumatoria de 87.25 % por lo que cumple satisfactoriamente con este parámetro. De igual modo, la pérdida por fuego no debe exceder el 6 % por lo que cumple ya que el del MK es de 2.26 %.

5.2. Respecto a sus propiedades fisicomecánicas

En esta etapa del estudio se contó con el metacaolin procesado y analizado, así como el cemento que es tipo 5800. La mayoría de los cementos traen puzolanas incorporadas, por lo que estos no garantizan resultados confiables al realizar una adición y sustitución con el material de interés. Por ello, se trabajó con este tipo de cemento 5800 ya que no contiene puzolanas. La arena que se utilizó se clasifica como estándar, y se debe de asegurar un carácter inocuo, es decir, que no existiera la posibilidad de reacción adversa con las partículas del cemento (según ASTM C-289-87).

Se debe evitar la segregación de arena estándar, pues las variaciones en la graduación granulométrica de la arena causan variaciones en la consistencia del mortero. Cuando se vacíen recipientes o sacos, debe tenerse el cuidado de evitar la formación de montículos de arena o cráteres de arena, bajo los taludes de los cuales las partículas más gruesas rodarán. Los recipientes deberían ser de tamaño suficiente para permitir estas precauciones. No deben usarse dispositivos para vaciar los recipientes por gravedad.

El mortero usado consiste en 1 parte de cemento y 2.75 partes de arena dosificados en masa. Los cementos portland o portland incorporador de aire son mezclados con relaciones especificadas de agua-cemento. El contenido de agua para otros cementos es suficiente para obtener una fluencia de 110 ± 5 en 25 golpes de la mesa de ensayo de flujo. Los cubos de ensayo 50 mm (2 pulg)

se compactan por apisonamiento en dos capas. Según la norma COGUANOR NTG 41003 H4. La cantidad de cemento para el diseño de 9 morteros es de 740g y como se observa las tablas XI-XVII se encuentran las dosificaciones de arena estándar, agua, MK, flow utilizado, así como la relación agua/cemento, un parámetro muy importante que determina la trabajabilidad de la mezcla.

Los moldes para especímenes cúbicos de 50 mm o 2 pulg deben ser ajustados herméticamente. Los moldes no deben tener más de tres compartimientos cúbicos y deben ser separables en no más de dos partes. Las partes de los moldes cuando están ensambladas deben ser sostenidas juntos en forma segura. Los moldes deben estar hechos de metal duro no atacado por el mortero de cemento. Los lados de los moldes deben ser suficientemente rígidos para evitar ensanchamiento.

Debe resaltarse que para el proceso previo de fraguado, el agua de composición se identifica como agua desmineralizada, debido al interés de mantener una concentración inicial constante en los especímenes de cemento consistente con los requerimientos en la norma ASTM C 109.

Cuando concluye el fraguado y se dispone a curar cada espécimen, este posee cierta humedad, que por razones obvias, se sabe que es una disolución sobre-saturada de los minerales de composición, la cual cubre las superficies expuestas. Por tanto, cuando la muestra entra en contacto con el medio de curado.

Como se observa en la figura 37, el mortero patrón tiene un comportamiento según lo esperado para el esfuerzo a compresión que aumenta respecto a sus días de fraguado, esto se debe a lo escrito en el marco teórico en el que los compuestos del cemento entran en contacto con el agua, lo que produce una

masa firme y dura. Los silicatos presentes en el cemento son los principales activos aglutinantes del mismo, siendo estos el silicato tricálcico (C_3S) y silicato bicálcico (C_2S), siendo el C_3S el que se hidrata y endurece rápidamente y es responsable del inicio del fraguado y la resistencia temprana, mientras el C_2S tiene una velocidad de hidratación menor, pero contribuye para el aumento de la resistencia después de los 7 días.

En su fase de hidratada, el C_3S es conocido como alita, mientras el C_2S tiene el nombre de velita. De las reacciones de estos dos compuestos se obtiene el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ o portlandita, con una estructura cristalina. Cuanto más compacta sea esta estructura tendrá mejores propiedades mecánicas.

En la figura 38 y 39 que corresponden a la adición del 5 % y 10 % respectivamente tienen un comportamiento similar al de patrón en su esfuerzo a compresión que va aumentando respecto a sus días de fraguado. En la figura 40 que corresponde al del 15 % se observa que el C_3S reacciona de manera completa y muy brusca hasta el periodo de 7 días. Por otra parte, está el aluminato tricálcico (C_3A), otro compuesto del cemento encargado de la liberación de calor de hidratación durante los primeros días y de contribuir también en un porcentaje mínimo en la resistencia a temprana edad. Luego, se observa que a los 28 días tiene un aumento no muy significativo en comparación con los días previos de ensayos. En la figura 41 correspondiente al 20 %, el C_3S y C_2S se comportan de manera similar al diseño patrón, al de 5 % y 10 % de adición.

En la figura 42, 43 y 44 que corresponden al esfuerzo a compresión respecto a mortero patrón, 5 % y 10 % en sustitución a diferentes días de fraguado se observa que sus índices de eficiencia puzolánica disminuyen hasta

en un 16 % y 10 %, respectivamente. Es posible que el metacaolin, debido a su clasificación, tenga un retardo en alcanzar la resistencia de diseño de hasta 90 días o más, por lo que los resultados finales pueden ser discutibles, en especial para la mezcla 10 %, que tuvo un comportamiento similar a la mezcla de control, sin embargo, aunque a 28 días no superó la resistencia esperada, está muy próxima a esta. Para el caso del presente estudio se hace el análisis para edades tempranas o un concreto convencional.

El índice de actividad puzolánica se expresa como la relación entre la resistencia a la compresión del mortero adicionado o sustituido y la resistencia a la compresión de un mortero de referencia, es decir no adicionado. La norma ASTM C618 exige, para considerar un material como puzolánico, un índice resistente igual o superior al 75 % a 28 días. En la figura 45 que corresponde a los esfuerzos a compresión para los 4 diferentes diseños en 5 %, 10 %, 15 % y 20% en adición, se observa que a los 3 días todos tienen un aumento en sus índices superando el 100 % a excepción del 5 % que tiene un 96 % que presenta una reacción tardía del C_3S . El que presentó un mayor índice es la adición del 10 % llegando a un 113.5 %.

En la figura 46 que corresponde a los esfuerzos a compresión para los 4 diferentes diseños en 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en adición, se observa que a los 7 días todos tienen un aumento en sus índices superando el 100 %. El que presentó un mayor índice es la adición del 15 % llegando a un 113.6 %. con el C_3S y C_2S .

En la figura 47 que corresponde a los esfuerzos a compresión para los 4 diferentes diseños en 5 %, 10 %, 15 % y 20 % en adición, se observa que a los 28 días todos tienen un aumento en sus índices superando el 100% de igual forma. El que presento un mayor índice es la adición del 20 % llegando a un

116.0 % solo por arriba de un 2 % en la adición del 5 %. En este comportamiento la partícula esférica del metacaolín reacciona completamente con el C_3S y C_2S .

Las mezclas en las que se utilizó el metacaolín como adición tuvieron un desempeño mejor de lo esperado, elevando la resistencia del concreto, aumentándola hasta 500 psi sobre la mezcla de control. La mezcla del 10 % tuvo un aumento de 13.5 %, la del 15 % un aumento del 13.6 % y la del 20 % un aumento de 16 %, esto significa que es posible obtener mejores resistencias al utilizar metacaolín tipo N, lo cual, para fines estructurales, es beneficioso para un desencofrado rápido, debido a que el comportamiento a 3, 7 y 28 días respectivamente superó significativamente a la mezcla patrón.

Físicamente, la finura y la forma del metacaolín son las que definen su capacidad de reacción. Mientras más fina sea el metacaolín su reactividad es mayor. La morfología del metacaolín de carácter esférico le otorga una mejor trabajabilidad al concreto, al actuar como lubricante, lo que disminuye la demanda de agua sin dejar de ser trabajable. Esto aumenta considerablemente la resistencia.

CONCLUSIONES

1. El índice de eficiencia puzolánica para los diseños con adición de 10 % y 20 % de metacaolín obtenido a 750°C durante 1 hora de tratamiento, alcanzan un aumento significativo y positivo en sus propiedades fisicomecánicas.
2. Se eliminan los diseños por sustitución ya que disminuían la eficiencia mecánica por la baja trabajabilidad, aumento en la demanda de agua y presencia de fisuras.
3. La eficiencia puzolánica para las 4 variaciones por la adición de metacaolín respecto al peso del cemento en la edad de 3, 7 y 28 días permitieron un aumento alrededor de los 105,875 % \pm 2, 109,1 % \pm 2, 109,5 % \pm 2 respectivamente.
4. El uso de metacaolín por adición representa una opción comprobada para mejorar el desempeño del concreto a tempranas edades y en edades más allá de los 90 días, para su uso estructural.
5. La medición de las propiedades fisicomecánicas con relación al mortero patrón mejoraron más significativamente en los tratamientos de 10 % y 20 %, y el tratamiento con mayor cantidad de metacaolín adicionado alcanzó un valor mayor a los 28 días pero retrasado en su tiempo de fraguado a edades más tempranas.

6. El comportamiento del caolin en la pérdida en peso alcanzó un 8,58 %, que encaja según referencias bibliográficas en un rango de 8 %-10 %, así como la densidad que tuvo un aumento de 2,216g/ml y 2,861g/ml respectivamente.
7. Las medición de las coordenadas $L^*a^*b^*$ del color de cada una de las muestras obtenidas durante el experimento se realizó mediante un colorímetro reduciendo su coordenada L^* y aumentando las coordenadas a^* y b^* por el proceso de calcinación que sufre el metacaolin.
8. El metacaolin posee un contenido total entre SiO_2 , Al_2O_3 , FeO_3 de 87,25 % por lo que cumple satisfactoriamente con este parámetro arriba de los 70 % para ser considerado como puzolana según la norma ASTM C-618-08.
9. Existe diferencia significativa entre la actividad puzolánica en relación al tiempo de fraguado con un F experimental mayor a la crítica de 24,416 y 5,1432 respectivamente.

RECOMENDACIONES

1. Preparar el metacaolín en un horno de calcinación donde sea factible homogenizar y manipular el compuesto de buena manera.
2. Realizar un estudio de eficiencia puzolánica con diferencias de la mejora en base a 3 cementos con estructuras específicas.
3. Realizar un tratamiento térmico con una variación de temperatura distinta a 750°C y de tiempo de residencia adentro del horno y con ellos realizar morteros para poder determinar su resistencia mecánica a compresión.
4. Realizar diseños de mortero entre 5 % y 10 % de adición para observar el comportamiento de su índice de eficiencia puzolánica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACUÑA, Lorena. *Hormigones de Alta Resistencia utilizando metacaolín de producción paraguaya*. Universidad Nacional de Asunción, Paraguay. Facultad de Ingeniería, 2003. 500 p.
2. CANO, Iván. *Ceniza volante de carbón mineral para adición en mezclas de concreto*. Trabajo de graduación Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2006.180 p.
3. DIAZ, Olga, *La evolución de la industria del cemento*. Trabajo de graduación Ing. Civil, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2012. 235 p.
4. FAGIANI, William. *Diseño de una metodología experimental para el análisis del curado de mezclas de cemento portland UGC400*. Trabajo de graduación Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2004. 350 p.
5. LAINFIESTA LOPEZ, Rodrigo Alfonso. *Análisis mediante termogravimetría (640mm Hg) de dos caolines, para la obtención de metacolín por activación térmica*. Trabajo de graduación Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala.Facultad de Ingeniería, 2010.133 p.

6. RABELLO, Marco. *Estudio de la influencia del metacaolín como aditivo de alta eficiencia en concreto de cemento portland*. Departamento de construcción civil, Universidad de Sao Paulo.2003. 250 p.
7. RAFIK, Abbas. *Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón*. 3ª ed. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2010. 145 p. ISBN 978-958-8060-83.
8. TORRES, Jannteb. *Efecto del porcentaje de adición de metacacolin en las propiedades finales del concreto adicionado*. Universidad de Bogotá, Colombia, 2011. 360 p.

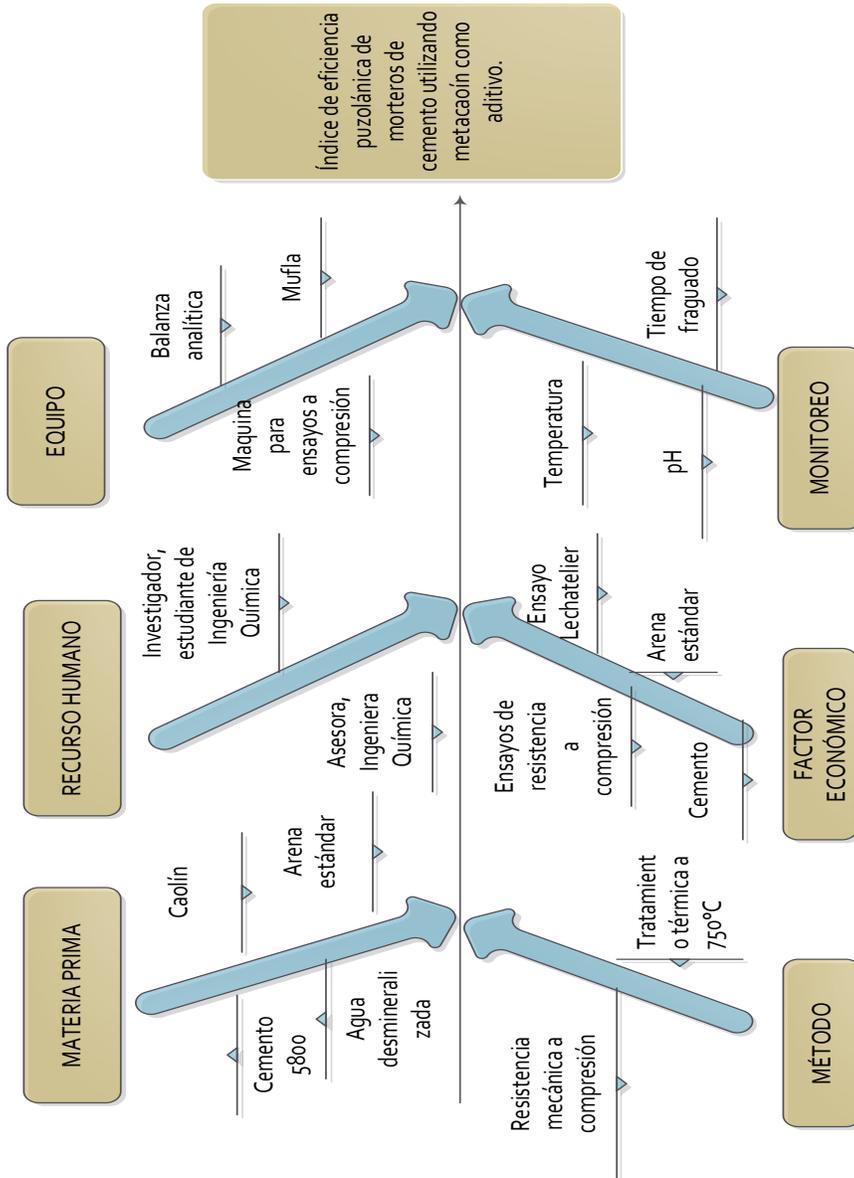
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Paso 1 Carera	Paso 2 Área	Paso 3 Tema Genérico	Paso 4 Tema Específico	Paso 5 Especificación	Paso 6 Problema	Paso 7 Hipótesis	Paso 8 Tema a resolver
Licenciatura en Ingeniería Química	<p>Química</p> <p>Área de Especialización</p> <p>Operaciones Unitarias</p> <p>Ciencias básicas y complementarias</p>	<p>Química 4</p> <p>Análisis Cuantitativo</p> <p>Procesos Químicos Industriales</p> <p>Operaciones Unitarias Complementarias (IQ6)</p> <p>Estadística 1</p> <p>Ciencia de los Materiales</p>	<p>Estado Sólido</p> <p>Gravimetría</p> <p>Calcinación</p> <p>Manejo de sólidos</p> <p>Estadística Descriptiva</p> <p>Técnicas de Muestreo</p> <p>Prueba de Hipótesis</p> <p>Caracterización del Sistema cristalino</p>	<p>Estructura Cristalina</p> <p>Medición de peso para evaluar propiedades</p> <p>Conocer el comportamiento y aplicación de una calcinación</p> <p>Granulometría</p> <p>Análisis de datos</p> <p>Distribuciones muestrales de una población</p> <p>Probar variación entre dos métodos en una misma población</p> <p>Tipos de materiales</p>	<p>El metacacolin se puede obtener por una activación térmica mediante un análisis de termogravimetría. Surge la necesidad de evaluar el índice de actividad de los morteros, dependiendo del porcentaje de metacacolin utilizado.</p>	<p>Es posible caracterizar el índice de eficiencia puzolánica para el cemento con el propósito de observar si existen variaciones en su tendencia en función del tiempo de fraguado.</p>	<p>EVALUACION DEL INDICE DE EFICIENCIA PUZOLANICA DE MORTEROS DE CEMENTO 5800 CON BASE A LA NORMA COGUANOR NTG 41003 IH /ASTM C 109) UTILIZANDO COMO ADITIVO METACACOLIN, OBTENIDO DE CACOLIN A NIVEL DE LABORATORIO.</p>

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Muestra de cálculo

1. Variación de masa de la muestra de yeso grado reactivo posterior a la calcinación

$$\Delta m = mc + mm - mca \quad (\text{Ecuación No. 1})$$

$$mr = mm - \Delta m \quad (\text{Ecuación No. 2})$$

Donde:

Δm : variación de masa [g]

mc : masa del crisol [g]

mm : masa de muestra [g]

mca : masa calcinación [g]

mr : masa residual [g]

Ejemplo: se utilizaron 70g de muestra de metacaolin para calcinar a una temperatura de 750°C en una mufla, con una tara del crisol de 106,0g. Luego de la calcinación se obtuvo una masa de 170g. Con los siguientes datos, se determinó la variación de masa que sufre el yeso luego de la calcinación.

$$\Delta m = 106 + 70 - 170 = 6,0g$$

$$mr = 70 - 6,0 = 64,0g$$

Los resultados se encuentran en la tabla VII.

Continuación apéndice 3.

2. Densidad método ASTM C188-95 para determinar la densidad del yeso grado reactivo posterior a la calcinación

$$\rho = \frac{mm}{V_f - V_i} \quad (\text{Ecuación No. 3})$$

Donde:

ρ : densidad [$\frac{g}{mL}$]

mm : masa de muestra [g]

V_i : volumen inicial de solvente [mL]

V_f : volumen final de solvente [mL]

Ejemplo: se posee 1g de muestra de metacaolin a 750°C la cual se le desea medir la densidad por medio del método ASTM C 188-95, a través de un balón de Le Chatelier y queroseno como fluido inmiscible. El volumen inicial del queroseno sin añadir la muestra de yeso es 25mL, luego de añadir la muestra de yeso se observa un volumen de 25,349mL. Con los siguientes datos, se determinó la densidad del metacaolin a 750°C y de igual forma del caolín a temperatura ambiente.

$$\rho = \frac{1}{25,349 - 25} = 2,86g/mL$$

Los resultados de estas densidades se encuentran en la tabla VIII.

Continuación apéndice 3.

3. Estequiometría para la determinación del esfuerzo a compresión

Mortero patrón con 0 % de aditivo de metacaolín

1.1. Cubo 1

- Fecha de hechura: 30/10/2017
- Fecha de ruptura: 2/11/2017
- Edad en días: 3
- Peso: 286,9g.
- L1: 5,12cm
- L2: 5,08cm
- Carga (lb): 14 900
- Área:

$$L1 * L2 = 5,12 * 5,08 = 26,0096 \text{ cm}^2$$

- Esfuerzo (kg/cm^2)

$$\frac{\text{carga}(lb)}{2,2042 * \text{Area}(\text{cm}^2)} = \frac{14\ 900}{2,2042 * 26,0096} = 259,85 \text{ kg/cm}^2$$

- Esfuerzo (Mpa)

$$\frac{\text{carga}(\text{kg/cm}^2)}{10,2} = \frac{259,85}{10,2} = 25,50$$

- Esfuerzo (PSI)

$$\text{Esfuerzo (Mpa)} * 145,038 = 25,50 * 145,038 = 3700$$

Los resultados de los esfuerzos a compresión se encuentran a partir del apéndice 4.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. Diseños de motero patrón a 3 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
P1	30/10/17	2/11/17	286,9	5,12	5,08	14 900	26,01	259,85	25,50	3 700
P2	30/10/17	2/11/17	285,6	5,10	5,09	14 600	25,96	255,11	25,00	3 630
P3	30/10/17	2/11/17	286,5	5,09	5,10	15 200	25,96	265,60	26,00	3 770

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Diseños de motero patrón a 7 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
P4	30/10/17	6/11/17	293,2	5,10	5,06	15 000	25,81	263,60	25,90	3 760
P5	30/10/17	6/11/17	294,1	5,06	5,19	18 900	26,26	326,47	32,00	4 650
P6	30/10/17	6/11/17	296,3	5,50	5,07	19 900	26,36	342,40	33,60	4 880

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. Diseños de motero patrón a 28 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
P7	30/10/17	27/11/17	288,8	5,10	5,08	20 600	25,91	360,70	35,50	5 150
P8	30/10/17	27/11/17	287,8	5,07	5,10	19 800	25,86	347,36	34,00	4 940
P9	30/10/17	27/11/17	287,9	5,07	5,10	19 500	25,86	342,10	33,50	4 900

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. Diseños de motero con 5 % de sustitución de metacaolín a 3 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	05/06/18	08/06/18	268,0	5,00	5,05	13 000	25,25	233,58	22,9	3 320
2	05/06/18	08/06/18	283,5	5,10	5,08	12 900	25,91	225,87	22,1	3 210
3	05/06/18	08/06/18	282,0	5,10	5,04	13 800	25,70	243,61	23,8	3 460

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. Diseños de motero con 5 % de sustitución de metacaolín a 7 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	05/06/18	12/06/18	281,0	5,07	5,07	16 400	25,71	289,4	28,37	4 110
5	05/06/18	12/06/18	261,0	5,00	5,04	11 900	25,45	212,3	20,80	3 020
6	05/06/18	12/06/18	281,5	5,10	5,04	16 800	25,71	296,5	29,10	4 220

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Diseños de motero con 5 % de sustitución de metacaolín a 28 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
7	05/06/18	3/07/18	285,5	5,03	5,10	16 600	25,65	293,60	28,8	4 180
8	05/06/18	3/07/18	269,5	5,10	5,13	15 900	26,16	275,70	27,1	3 930
9	05/06/18	3/07/18	285,5	5,09	5,09	18 400	25,91	322,18	31,6	4 580

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. Diseños de motero con 10 % de sustitución de metacaolín a 3 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	30/10/17	2/11/17	286,6	5,13	5,09	15 000	26,12	260,60	25,50	3 700
2	30/10/17	2/11/17	285,7	5,13	5,08	14 300	26,06	249,00	24,40	3 500
3	30/10/17	2/11/17	284,4	5,10	5,09	14 700	25,96	256,86	25,20	3 660

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. Diseños de motero con 10 % de sustitución de metacaolín a 7 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	30/10/17	6/11/17	288,9	5,20	5,00	16 100	26,00	280,80	27,50	3 990
5	30/10/17	6/11/17	290,8	5,17	5,10	15 800	26,37	271,80	26,70	3 880
6	30/10/17	6/11/17	289,5	5,10	5,10	16 500	26,01	287,70	28,20	4 100

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. Diseños de motero con 10 % de sustitución de metacaolín a 28 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
7	30/10/17	27/11/17	281,4	5,11	5,07	18 500	25,91	323,93	31,76	4 610
8	30/10/17	27/11/17	284,8	5,10	5,08	19 700	25,91	344,94	33,82	4 910
9	30/10/17	27/11/17	283,3	5,09	5,07	19 700	25,81	346,28	33,95	4 930

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. Diseños de motero con 5 % de adición de metacaolín a 3 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	4/06/18	7/06/18	287,5	5,14	5,09	13 800	26,16	239,32	23,46	3 400
2	4/06/18	7/06/18	290,0	5,20	5,14	15 200	26,73	257,98	25,29	3 670
3	4/06/18	7/06/18	288,5	5,13	5,10	14 700	26,16	254,90	24,99	3 630

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. Diseños de motero con 5 % de adición de metacaolín a 7 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	4/06/18	11/06/18	290,5	5,10	5,10	19 000	26,01	331,40	32,49	4 710
5	4/06/18	11/06/18	289,0	5,13	5,04	18 200	25,85	319,40	31,31	4 540
6	4/06/18	11/06/18	290,0	5,10	5,10	17 600	26,01	306,98	30,09	4 360

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. Diseños de motero con 5 % de adición de metacaolín a 28 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
7	4/06/18	2/07/18	291,0	5,05	5,10	21 800	25,76	383,9	37,60	5 450
8	4/06/18	2/07/18	290,5	5,10	5,06	25 000	25,82	439,4	43,10	6 250
9	4/06/18	2/07/18	290,8	5,10	5,09	22 100	25,96	386,2	37,87	5 490

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 15. Diseños de motero con 10 % de adición de metacaolín
a 3 días de fraguado**

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	4/06/18	7/06/18	293,0	5,10	5,09	16 700	25,96	291,85	28,61	4 150
2	4/06/18	7/06/18	290,0	5,10	5,07	17 500	25,86	307,01	30,10	4 370
3	4/06/18	7/06/18	292,0	5,08	5,12	16 400	26,01	286,06	28,05	4 070

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 16. Diseños de motero con 10 % de adición de metacaolín
a 7 días de fraguado**

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	4/06/18	11/06/18	290,0	5,07	5,10	19 000	25,86	333,33	32,68	4 740
5	4/06/18	11/06/18	291,5	5,07	5,10	20 500	25,86	359,65	35,26	5 110
6	4/06/18	11/06/18	292,0	5,10	5,10	20 000	26,01	348,85	34,21	4 960

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. Diseños de motero con 10 % de adición de metacaolín a 28 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
7	4/06/18	2/07/18	298,2	5,10	5,10	19 800	26,01	345,4	33,90	4 920
8	4/06/18	2/07/18	294,6	5,10	5,14	23 500	26,21	406,8	39,90	5 790
9	4/06/18	2/07/18	299,3	5,10	5,17	21 400	26,38	368,1	36,10	5 240

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. Diseños de motero con 15 % de adición de metacaolín a 3 días de fraguado

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	5/06/18	8/06/18	292,5	5,10	5,13	14 900	26,16	258,4	25,3	3 670
2	5/06/18	8/06/18	294,5	5,10	5,12	16 500	26,11	286,7	28,1	4 080
3	5/06/18	8/06/18	289,0	5,10	5,08	16 600	25,91	290,7	28,5	4 130

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 19. Diseños de motero con 15 % de adición de metacaolín
a 7 días de fraguado**

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	5/06/18	12/06/18	289,0	5,10	5,08	19 600	25,91	343,2	33,60	4 870
5	5/06/18	12/06/18	296,5	5,11	5,15	20 100	26,31	346,6	33,98	4 930
6	5/06/18	12/06/18	297,0	5,10	5,11	21 000	26,06	365,6	35,80	5 190

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 20. Diseños de motero con 15 % de adición de metacaolín
a 28 días de fraguado**

Cub o	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
7	5/06/18	03/07/18	297,5	5,14	5,13	18 900	26,37	325,2	31,90	4 630
8	5/06/18	03/07/18	290,0	5,08	5,09	18 000	25,86	315,8	30,90	4 480
9	5/06/18	03/07/18	297,0	5,14	5,13	25 600	26,37	440,4	43,18	6 260

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 21. Diseños de motero con 20 % de adición de metacaolín
a 3 días de fraguado**

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
1	5/06/18	08/06/18	290,5	5,12	5,09	14 400	26,06	250,69	24,58	3 570
2	5/06/18	08/06/18	278,0	5,11	5,11	15 400	26,11	267,59	26,23	3 810
3	5/06/18	08/06/18	290,5	5,09	5,08	16 900	25,86	296,49	29,07	4 220

Fuente: elaboración propia.

**Apéndice 22. Diseños de motero con 20 % de adición de metacaolín
a 7 días de fraguado**

Cubo	Fecha de hechura	Fecha Ruptura	Peso (g)	L1 (cm)	L2 (cm)	Carga (kg)	Area (cm ²)	Esfuerzo kg/cm ²	Esfuerzo Mpa	Esfuerzo PSI
4	5/06/18	12/06/18	291,0	5,20	5,11	21 000	25,91	367,7	36,10	5 240
5	5/06/18	12/06/18	292,0	5,11	5,13	17 800	26,27	307,4	30,20	4 380
6	5/06/18	12/06/18	282,0	5,09	5,09	20 100	25,81	353,3	34,60	5 020

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Curación de crisoles de porcelana con agua regia 300ml (ácido nítrico concentrado con ácido clorhídrico concentrado 1:3) para remover metales pesados**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Mufla Fisher Scientific capacidad 1 000°C para calcinación de caolín en la obtención de metacaolín**



. Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), USAC.

Apéndice 25. **Acomodo de unidades experimentales de crisoles de caolín que consiste en 70 g. por crisol para un total de 10 en mufla Fisher Scientific**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), USAC.

Apéndice 26. **Balanza analítica Radwag WPS 750 para la medición de masas del caolín y metacaolín**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), USAC.

Apéndice 27. **Calcinación de muestras de metacaolin en mufla Fisher Scientific a 750°C**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), USAC.

Apéndice 28. **Desecadores que se utilizaron para mantener limpio y deshidratado el metacaolín posterior al tratamiento de calcinación por medio del vacío y un desecante como gel sílice durante 1 hora**



Fuente: elaboración propia con datos obtenidos del Laboratorio de Investigación de Extractos Vegetales (LIEXVE), USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de velocidades de endurecimiento para los diseños de portero patrón

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

 **USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala**

No. 15086

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE FRAGUADO DEL CEMENTO HIDRÁULICO USANDO LA AGUJA DE VICAT
NORMA NTG 41003 h10 (ASTM C-191)
INFORME SACM - 436/18
HOJA 1/1**

O.T. No. 37963

INTERESADO: José Rodrigo Ramos Lemus, Carnet: 2012 13218

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Evaluación del índice de eficiencia puzolánica de morteros de cemento UGC 4000 con base en la norma COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C 109) utilizando como aditivo metacaolín, obtenido de caolín hidrotermal a nivel de laboratorio"

DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.

EMISIÓN DE INFORME: 10 de agosto de 2018

RESULTADOS		
PATRÓN	Tiempo de fraguado inicial vicat (A) (min)	123,30
	Tiempo de fraguado final vicat (A) (min)	230,00
20 % DE ADICIÓN	Tiempo de fraguado inicial vicat (A) (min)	163,30
	Tiempo de fraguado final vicat (A) (min)	270,00

Observaciones:

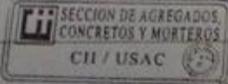
- Cemento utilizado: Cemento UGC, proporcionado por el interesado.
- Temperatura ambiente 23,10 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio.
- Para el ensayo de la muestra Patrón se utilizó 650 g de cemento y 165 ml de agua desmineralizada, y para la muestra 20% de adición se utilizó 650 g de cemento, 130 g de metacaolín y 220 ml de agua desmineralizada.

El presente informe representa únicamente las muestras identificadas en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

ATENTAMENTE,

Ing. Delma Yanet Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Vo.Bo.
Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
Director de CI/USAC

 **SECCION DE AGREGADOS,
CONCRETOS Y MORTEROS
CI / USAC**

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Baltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 2. Informe de ensayos a comprensión para los diseños de 10 % y 15 % de adición con metacaolín


CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA


USAC
 TRICENTENARIA
1697-2017

INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS
NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109)
INFORME SACM - 434/18
 HOJA 2/2

No. 15077

O.T. No. 37826

ADICIÓN 10%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/pulg ²
1	04/06/2018	3	25,959	18 700	28,60	4 150
2	04/06/2018	3	25,857	17 900	30,10	4 370
3	04/06/2018	3	26,010	16 400	28,00	4 060
4	04/06/2018	7	25,857	19 000	32,70	4 740
5	04/06/2018	7	25,857	20 500	35,30	5 120
6	04/06/2018	7	26,010	20 000	34,20	4 960
7	04/06/2018	28	26,010	19 800	33,90	4 920
8	04/06/2018	28	26,214	23 500	39,90	5 790
9	04/06/2018	28	26,367	21 400	36,10	5 240

ADICIÓN 15%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/pulg ²
1	05/06/2018	3	26,163	14 900	25,30	3 670
2	05/06/2018	3	26,112	16 500	28,10	4 060
3	05/06/2018	3	25,908	16 600	28,50	4 140
4	05/06/2018	7	25,908	19 600	33,60	4 880
5	05/06/2018	7	26,317	20 100	34,00	4 930
6	05/06/2018	7	26,061	21 000	35,80	5 190
7	05/06/2018	28	26,368	18 900	31,90	4 630
8	05/06/2018	28	25,857	18 000	31,00	4 500
9	05/06/2018	28	26,368	25 600	43,20	6 270

OBSERVACIONES:

a) Diseño de mezcla de mortero, bajo condiciones de laboratorio.

b) Temperatura ambiente:

- 30/10/2017: 19,00 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio
- 04/06/2018: 22,00 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio
- 06/06/2018: 22,80 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio

c) Flujo de la mezcla:

- PATRON: 110 % - ADICIÓN 10%: 108 %
- ADICIÓN 5%: 108 % - ADICIÓN 15%: 105 %

d) Proporción del mortero:

- PATRON: 1 : 2,75 : 0,485 - ADICIÓN 10%: 1 : 2,75 : 0,485 : 0,10
- ADICIÓN 5%: 1 : 2,75 : 0,478 : 0,05 - ADICIÓN 15%: 1 : 2,75 : 0,478 : 0,15

e) Se utilizó Cemento UGC.

f) Muestras ensayadas en máquina de compresión MHELE Testing Machine Division con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

ATENTAMENTE,

Inga. Diana Yajaj Mejicanos, Jol
 Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros

Ing. Pablo Christian De León Rodríguez,
 Directora I. CIMUSAC

FACULTAD DE INGENIERIA - USAC
 Edificio Emilio Ballarín, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9131, Planta 2418-8000 Ext. 86253 y 86252
 Página web: <http://i3.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 3. Informe de ensayos a compresión para los diseños de mortero patron y 5 % de adición con metacaolín



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS
NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109)
INFORME SACM - 434/18
HOJA 1/2

No. 15076

Q.T. No. 37825

INTERESADO: José Rodrigo Ramos Lemus, Carnet: 2012 13218

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Evaluación del índice de eficiencia puzolánica de morteros de cemento UGC 4000 con base en la norma COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C 109) utilizando como aditivo metacaolín, obtenido de caolín hidrotérmal a nivel de laboratorio"

DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.

EMISIÓN DE INFORME 10 de agosto de 2018

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

PATRON

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
P1	30/10/2017	3	26,010	14 900	25,50	3 700
P2	30/10/2017	3	25,959	14 600	25,00	3 630
P3	30/10/2017	3	25,959	15 200	26,00	3 770
P4	30/10/2017	7	25,806	15 000	25,90	3 760
P5	30/10/2017	7	26,261	18 900	32,00	4 640
P6	30/10/2017	7	26,364	19 900	33,60	4 880
P7	30/10/2017	28	25,908	20 600	35,40	5 140
P8	30/10/2017	28	25,857	19 800	34,00	4 930
P9	30/10/2017	28	25,857	19 500	33,50	4 860

ADICIÓN 5%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
1	04/06/2018	3	26,163	13 800	23,50	3 410
2	04/06/2018	3	26,728	15 200	25,30	3 670
3	04/06/2018	3	26,163	14 700	25,00	3 630
4	04/06/2018	7	26,010	19 000	32,50	4 720
5	04/06/2018	7	25,855	18 200	31,30	4 540
6	04/06/2018	7	26,010	17 600	30,10	4 370
7	04/06/2018	28	25,755	21 800	37,60	5 460
8	04/06/2018	28	25,805	25 000	43,10	6 250
9	04/06/2018	28	25,959	22 100	37,90	5 500

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltránena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121, Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 4. Informe de ensayos a compresión para los diseños de 20 % de adición de metacaolín y 5 % de sustitución con metacaolín



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS
NORMA NTG 41003 h4 (ASTM C-109)
INFORME SÁCM - 435/18
HOJA 1/2

No. 15078

O.T. No. 38526

INTERESADO: José Rodrigo Ramos Lemus, Carnet: 2012 13218

PROYECTO: Trabajo de Graduación "Evaluación del índice de eficiencia puzolánica de morteros de cemento UGC 4000 con base en la norma COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C 109) utilizando como aditivo metacaolín, obtenido de caolín hidrotermal a nivel de laboratorio".

DIRECCIÓN: Ciudad de Guatemala.

EMISIÓN DE INFORME 10 de agosto de 2018

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ADICIÓN 20%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg²
1	05/06/2018	3	26,061	14 400	24,60	3 570
2	05/06/2018	3	26,112	15 400	26,20	3 800
3	05/06/2018	3	25,857	16 900	29,10	4 220
4	05/06/2018	7	25,908	21 000	36,10	5 240
5	05/06/2018	7	26,265	17 800	30,10	4 370
6	05/06/2018	7	25,805	20 100	34,60	5 020
7	05/06/2018	28	26,572	23 500	39,30	5 700
8	05/06/2018	28	26,214	24 700	41,90	6 080
9	05/06/2018	28	25,908	22 600	38,80	5 630

SUSTITUCIÓN 5%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg²
1	05/06/2018	3	25,250	13 000	22,90	3 320
2	05/06/2018	3	25,908	12 900	22,10	3 210
3	05/06/2018	3	25,704	13 800	23,90	3 470
4	05/06/2018	7	25,705	16 400	28,40	4 120
5	05/06/2018	7	25,200	11 900	21,00	3 050
6	05/06/2018	7	25,704	16 800	29,10	4 220
7	05/06/2018	28	25,653	16 600	26,80	4 180
8	05/06/2018	28	26,163	15 900	27,00	3 920
9	05/06/2018	28	25,908	18 400	31,60	4 590

El presente informe representa únicamente la muestra identificada en el mismo.
Se prohíbe la reproducción parcial o total sin autorización.

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrán, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9118 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 88253 y 88252
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

Anexo 5. Informe de ensayo a compresión para el diseño de 10 % de sustitución de metacaolín

CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

 **USAC**
TRICENTENARIO
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME DE ENSAYO A COMPRESIÓN DE MORTEROS
NORMA NTG 41003 H4 (ASTM C-109)
INFORME SACM - 435/18
HOJA 2/2

No. 15079

O.T. No. 38526

SUSTITUCIÓN 10%

No. CUBO	FECHA DE ELABORACIÓN	EDAD en días	Área cm ²	Carga lb	RESISTENCIA Mpa	RESISTENCIA lb/plg ²
1	30/10/2017	3	26,112	15 000	25,60	3 720
2	30/10/2017	3	26,060	14 300	24,40	3 540
3	30/10/2017	3	25,959	14 700	25,20	3 660
4	30/10/2017	7	26,000	16 100	27,50	3 990
5	30/10/2017	7	26,367	15 800	26,70	3 870
6	30/10/2017	7	26,010	16 500	28,20	4 090
7	30/10/2017	28	25,908	18 500	31,80	4 610
8	30/10/2017	28	25,908	19 700	33,80	4 900
9	30/10/2017	28	25,806	19 700	34,00	4 930

OBSERVACIONES:

a) Diseño de mezcla de mortero, bajo condiciones de laboratorio.

b) Temperatura ambiente:
- 05/05/2018: 22,80 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio
- 30/10/2017: 19,00 °C y humedad relativa 65 % del laboratorio.

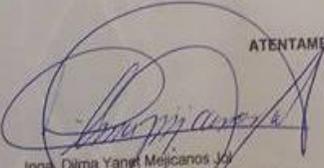
c) Flujo de la mezcla:
- ADICIÓN 20%: 105 % - SUSTITUCIÓN 10%: 112 %
- SUSTITUCIÓN 5%: 106 %

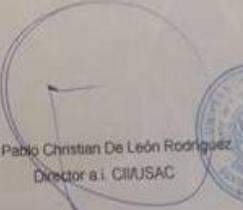
d) Proporción del mortero:
- ADICIÓN 20%: 1 : 2,75 : 0,505 : 0,20 - SUSTITUCIÓN 10%: 1 : 3,06 : 0,57 : 0,11
- SUSTITUCIÓN 5%: 1 : 2,90 : 0,493 : 0,05

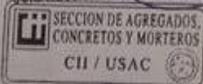
e) Se utilizó Cemento UGC.

f) Muestras ensayadas en máquina de compresión RIEHLE Testing Machine División con capacidad de 300 000 libras, dial utilizado para lectura de carga: 60 000 libras.

ATENTAMENTE,


Inga Dilma Yanet Mejicanos Jaj
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros


Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
Director a.i. CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltramea, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121, Planta 2418-8090 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería / USAC.

