

**EVALUACIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE BASADO EN METACAOLÍN CON
ACTIVACIÓN ALCALINA**

**PAOLA ANDREA ZAMUDIO PEDRAZA
JUAN SEBASTIAN QUIROGA CRUZ**



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ
2018**

**EVALUACIÓN DE MATERIAL CEMENTANTE BASADO EN METACAOLIN CON
ACTIVACIÓN ALCALINA**

**PAOLA ANDREA ZAMUDIO PEDRAZA
JUAN SEBASTIAN QUIROGA CRUZ**

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingenieros Civiles**

**Director
BRAYAN GERARDO AREVALO MENDOZA
Ingeniero Civil**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2018**



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación:

ING. BRAYAN GERARDO AREVALO MENDOZA
Director de Proyecto

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

Bogotá 26 de Noviembre del 2018.

RESUMEN

En la actualidad, el concreto a base de Cemento Convencional (CC) es el material de construcción más utilizado por la industria, uno de los aspectos negativos de este material se origina durante su producción debido a la generación de dióxido de carbono (CO₂) que se libera a la atmósfera por la calcinación de la materia prima y el consumo de combustibles. Una de las alternativas para reemplazar el CC está representada por la síntesis de geopolímeros a base de aluminosilicatos minerales.

Los geopolímeros se consideran una solución a este problema por su bajo impacto ecológico y alto rendimiento relativo al consumo de materias primas, estos se obtienen a partir de la activación alcalina de minerales naturales, desechos o subproductos industriales para generar un producto con características que presenten ventajas a nivel ambiental y con propiedades similares y en algunos casos superiores frente a materiales convencionales.

Esta investigación presenta los resultados obtenidos en la evaluación mecánica de un nuevo material cementante a base de Metacaolín (MK) en el concreto y en el mortero, comparados con los resultados obtenidos en concretos y morteros convencionales a base de CC. Inicialmente se hizo un análisis de composición química tanto del MK como del CC y se determinaron los óxidos que debían ser agregados al MK para tener una composición química similar a la del CC.

Por medio de mezcla mecánica y mezcla con mortero se le agregaron los elementos faltantes al MK, posteriormente se realizó un ensayo de prueba a compresión en cilindros de concreto para determinar el tipo de mezcla que ofrecía una mejor resistencia a compresión en cilindros y se determinó la mejor mezcla para continuar con el desarrollo de la investigación.

Con el tipo de mezcla seleccionada se hicieron 15 muestras en el laboratorio, 3 vigas de concreto para evaluar resistencia a flexión según normatividad INV 415-13, 6 cilindros de concreto para evaluar resistencia a la compresión según normatividad INV 410-13 y 6 cubos de mortero para evaluar resistencia a compresión según normatividad NTC 220.

Se compararon los resultados con 15 muestras realizadas a base de CC y a partir de esto se determinó que la resistencia máxima alcanzada a compresión y a flexión por el nuevo material cementante a base de MK en concretos y morteros oscila entre el 23% y el 25% de la resistencia máxima alcanzada a compresión y a flexión en las muestras de concretos y morteros convencionales a base de CC, con el fin de poder concluir la investigación se hace un análisis de los resultados y se plantean algunas recomendaciones.

ABSTRACT.

Nowadays, concrete based on Conventional Cement (CC) is the construction material most used by industry, one of the negative aspects of this material originates during its production due to the generation of carbon dioxide (CO₂) that it is released into the atmosphere by the calcination of the raw material and the consumption of fuels. One of the alternatives to replace the CC is represented by the synthesis of geopolymers based on mineral aluminosilicates.

The geopolymers are considered a solution to this problem due to their low ecological impact and high performance relative to the consumption of raw materials, these are obtained from the alkaline activation of natural minerals, waste or industrial by-products to generate a product with characteristics that present advantages at environmental level and with similar properties and in some cases superior to conventional materials.

This research presents the results obtained in the mechanical evaluation of a new cementitious material based on Metakaolin (MK) in concrete and mortar, compared with the results obtained in concrete and conventional mortars based on CC. Initially, an analysis of the chemical composition of both the MK and the CC was made and the oxides were determined that should be added to the MK to have a chemical composition similar to that of the CC.

By means of mechanical mixing and mixing with mortar the missing elements were added to the MK, later a compression test was carried out on concrete cylinders to determine the type of mixture that offered a better resistance to compression in cylinders and the better mix to continue with the development of the research

With the type of mixture selected, 15 samples were made in the laboratory, 3 concrete beams to evaluate resistance to bending according to regulations INV 415-13, 6 concrete cylinders to evaluate resistance to compression according to regulations INV 410-13 and 6 cubes of mortar to evaluate resistance to compression according to NTC 220 regulations.

The results were compared with 15 samples made from CC and from this it was determined that the maximum resistance reached to compression and bending by the new cementitious material based on MK in concrete and mortars ranges between 23% and 25% of the maximum resistance reached to compression and bending in the samples of concrete and conventional mortars based on CC, in order to be able to conclude the investigation, an analysis of the results is made and some recommendations are made

CONTENIDO

CONTENIDO	7
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.	10
ÍNDICE DE ECUACIONES.	10
GLOSARIO	11
1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	14
2.1. Antecedentes.	14
2.2. Justificación.....	14
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	15
4. OBJETIVOS	16
4.1. Objetivo general	16
4.2. Objetivos específicos.....	16
5. ALCANCES Y LIMITACIONES	17
5.1. Alcances.	17
5.2. Limitaciones	17
6. MARCO TEORICO.....	18
6.1.1. Propiedades del MK	18
6.1.1.1. Propiedades físicas	18
6.1.1.2. Composición química.....	19
6.1.2. Producción.....	20
6.1.3. Reacción puzolánica.....	21
6.1.4. Porosidad	22
6.2. El cemento.....	23
6.2.1. Producción.....	23
6.2.2. Impacto ambiental asociado a la producción del cemento	25
7. MARCO LEGAL.....	27
7.1. INV E – 402-13.....	27
7.2. INV E – 410-13.....	27
7.3. INV E – 415-13.....	27
7.4. NTC 220.....	28

8.	ESTADO DEL ARTE.....	29
9.	METODOLOGIA	34
9.1.	Investigación preliminar.....	34
9.2.	Evaluación.....	34
9.3.	Análisis del nuevo material.....	34
10.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN	35
10.1.	Caracterización del agregado.	35
10.1.1.	Caracterización del agregado para especímenes de concreto.	35
10.2.	Caracterización del agregado para especímenes de mortero.	36
10.3.	Elaboración del material cementante.....	37
10.4.	Dosificación de la mezcla para especímenes de concreto.	38
10.5.	Dosificación de la mezcla para especímenes de mortero.	39
10.6.	Elaboración cilindros de concreto, ensayo previo.....	39
10.7.	Elaboración cilindros de concreto, ensayo final.....	41
10.8.	Elaboración de vigas de concreto.	43
10.9.	Elaboración de cubos de mortero.	44
11.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	46
11.1.	Elección de mezcla tipo mecánica o mezcla tipo mortero.	46
11.1.1.	Ensayo a compresión en cilindros de concreto de prueba	46
11.2.	Ensayo a compresión en cilindros de concreto.	48
11.3.	Ensayo a compresión en vigas de concreto.	52
11.4.	Ensayo a compresión en cubos de mortero.	55
11.5.	Análisis por la adición de CaO.....	58
12.	CONCLUSIONES.....	59
13.	RECOMENDACIONES.....	60
14.	BIBLIOGRAFÍA	61

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1 Fallas típicas en cilindros de concreto	27
Ilustración 2. Marco Metodológico.....	34
Ilustración 3 Curva granulométrica del agregado	36
Ilustración 4 Curva granulométrica de la arena de Guamo-Tolima.....	37
Ilustración 5 Mezcla tipo mortero	40
Ilustración 6 Mezcla tipo mecánica.	40
Ilustración 7 Elaboración cilindros de concreto de prueba	41
Ilustración 8 Cilindros de concreto con MK.....	42
Ilustración 9 Cilindros de concreto con MK A/C=0,75	43
Ilustración 10 Vigas en concreto con MK.....	44
Ilustración 11 Cubos en mortero con MK.....	45
Ilustración 12 Falla cilindro de concreto con MK de prueba 1	46
Ilustración 13 Falla cilindro de concreto con MK de prueba 2.....	47
Ilustración 14 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de prueba A/C=0,5 .	48
Ilustración 15 Falla en cilindros de concreto con MK A/C=0,5	48
Ilustración 16 Falla en cilindros de concreto con CC A/C=0,5	49
Ilustración 17 Falla en cilindros de concreto con MK A/C=0,75	50
Ilustración 18 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de concreto A/C=0,5	50
Ilustración 19 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de concreto	51
Ilustración 20 Tendencia de crecimiento de resistencia en cilindros de concreto	52
Ilustración 21 Falla en vigas de concreto con MK A/C=0,5.....	53
Ilustración 22 Comparativo resistencia a flexión en vigas de concreto A/C=0,5	54
Ilustración 23 Tendencia de crecimiento de resistencia en vigas de concreto	54
Ilustración 24 Falla en cubos de mortero con MK A/C=0,5	55
Ilustración 25 Falla en cubos de mortero con CC A/C=0,5	56
Ilustración 26 Comparativo resistencia a compresión en cubos de mortero A/C=0,5	57
Ilustración 27 Tendencia de crecimiento de resistencia en cubos de mortero.	57

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Propiedades físicas de las adiciones.....	19
Tabla 2 Propiedades químicas del MK	19
Tabla 3 Requisitos para el MK.....	20
Tabla 4. Composición del cemento.....	24
Tabla 5 Dosificaciones utilizadas.....	29
Tabla 6 Granulometría del agregado.....	35
Tabla 7 Granulometría arena de Guamo-Tolima	37
Tabla 8 Composición química	38
Tabla 9 Óxidos a ser agregados	38
Tabla 10 Diseño de mezcla del concreto A/C=0,5.....	38
Tabla 11 Diseño de mezcla del mortero A/C=0,5.....	39
Tabla 12 Dosificación para cilindros de concreto de prueba	39
Tabla 13 Dosificación cilindros de concreto, ensayo final A/C=0,5	41
Tabla 14 Dosificación cilindros de concreto A/C=0,75.....	42
Tabla 15 Dosificación para vigas de concreto A/C=0,5	43
Tabla 16 Dosificación para cubos de mortero A/C=0,5.....	44
Tabla 17 Resistencia a compresión en cilindros de concreto, ensayo de prueba A/C=0,5	47
Tabla 18 Resistencia a compresión en cilindros de concreto A/C=0,5.....	49
Tabla 19 Resistencia a compresión en cilindros de concreto.....	51
Tabla 20 Resistencia a flexión en vigas de concreto A/C=0,5.....	53
Tabla 21 Resistencia a compresión en cubos de mortero A/C=0,5	56

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 1 Tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión en cilindros de concreto.....	52
Ecuación 2 Tendencia de crecimiento de la resistencia a flexión en vigas de concreto.....	54
Ecuación 3 Tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión en cubos de mortero	57

GLOSARIO

En el desarrollo del proyecto se mencionan algunos términos fundamentales que se presentan a continuación para el entendimiento de la investigación.

Actividad puzolánica: capacidad del material para reaccionar con el hidróxido de calcio y formar compuestos hidráulicos similares a los que se generan durante la hidratación del Clinker del cemento.

Aluminosilicato: Es un mineral que contiene óxido de aluminio (Al_2O_3) y sílice (SiO_2). Son aluminosilicatos el feldespato, las cloritas, los minerales de la arcilla, algún tipo de puzolana.

Cemento: Es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua.

Concreto: Es un material compuesto empleado en construcción, formado esencialmente por un aglomerante al que se añade partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos.

Clinker: Se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C.

Curado del concreto: Tratamiento que se le da al cemento después de su colocación a fin de mantener húmedas sus superficies, lo cual impide la rápida evaporación del agua. Esta tarea retrasa la retracción del material y evita su agrietamiento por desecación rápida.

Geopolímero: es un término acuñado por Joseph Davidovits en la década de los años 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización. Sin embargo, estos compuestos ya habían sido desarrollados en la década de 1950 en la Unión Soviética con el nombre de Cementos de suelo (Soil cements en inglés). Los geopolímeros también son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos.

Material inorgánico: Es aquella que no está hecha de carbono y no son fabricadas por los seres vivos, sino por la naturaleza.

Material cementante: Es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados y conformar una masa. Sólida de resistencia y durabilidad adecuada.

Metacaolín (MK): Material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas a 550°C, produciéndose una transformación de su estructura cristalina.

Mezcla: Cosa que resulta de mezclar distintas materias o elementos.

Puzolanas: Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Convencional en el siglo XIX. Hoy en día el cemento puzolánico se considera un eco material. Las puzolanas tienen la capacidad de reaccionar con hidróxido de calcio y agua. La cuantificación de esta capacidad está comprendida dentro del término actividad puzolánica. La puzolana es un material similar, pero en este caso solo de origen volcánico.

Resistencia del material: capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin fallar o adquirir deformaciones permanentes.

1. INTRODUCCIÓN

La competencia global y la búsqueda de oportunidades dentro del mercado de la construcción, impulsan al desarrollo de nuevos materiales con tecnologías limpias que reduzcan los elevados costos de producción, el desgaste de los recursos naturales y las emisiones de CO₂.

Al orientar el análisis en los resultados del progreso científico-técnico de nuestro siglo y su costo ecológico, se busca satisfacer las necesidades actuales, minimizando los impactos ambientales para cubrir las necesidades sociales presentes sin comprometer los recursos de generaciones futuras. (Muñiz, y otros, 2011)

Actualmente el cemento es uno de los materiales más utilizados en construcción, este libera grandes cantidades de CO₂ al momento de su fabricación. En el año 2014 se produjeron cerca de 3500 millones de toneladas de cemento en el mundo, para producir tan solo una de esas toneladas las plantas utilizadas emiten entre 0.82 y 1 tonelada de CO₂ a la atmosfera; es decir que en ese año sólo la industria del cemento aportó entre 2800 y 3500 millones de toneladas de CO₂ a la atmosfera, lo que constituye entre el 5% y el 8% del total de las emisiones resultantes de actividades humanas. Sumado a esto, los 1450°C de temperatura requeridos durante largos periodos para producir cemento representan un consumo energético altísimo. (Universidad Nacional de Colombia, 2015)

Esta investigación busca reemplazar la utilización del CC en concretos y morteros convencionales para así minimizar el impacto negativo que generan las emisiones de CO₂ a la atmosfera y reducir costos de producción, para ello se evaluara mecánicamente en concretos y morteros un nuevo material cementante a base de materias primas naturales o desechos industriales, en este caso el MK, este es un aluminosilicato activado térmicamente que se produce al calcinar el caolín a temperaturas aproximadas entre los 550°C y los 600°C. (Teoriadelaconstruccion.net, 2012)

Inicialmente se modifica la estructura química del MK con la adición de algunos óxidos para obtener una estructura similar a la del CC. Se realizan dos tipos de mezcla, una mecánica y una tipo mortero, con estas dos mezclas se realizan especímenes de prueba y se hacen ensayos a compresión determinando así el mejor tipo de mezcla a utilizar, con la mezcla seleccionada se hacen cilindros y vigas los cuales después del tiempo de curado se llevan a los ensayos a compresión y flexión, con el fin de comparar los resultados obtenidos se realizan especímenes de concreto y mortero con CC.

2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

2.1. Antecedentes.

Los geopolímeros se obtienen a partir de la mezcla en óptimas proporciones de un mineral basado en SiO₂ y Al₂O₃ (precursor) con un agente químico (activador alcalino), el cual promueve una serie de reacciones que conducen a la formación de un producto con características cementantes. Uno de los precursores ampliamente utilizados en este tipo de tecnología son las arcillas caolínicas tratadas térmicamente, las cuales presentan una elevada reactividad como consecuencia de su naturaleza vítrea. (Inorganic Polymers in New Materials, 1991); (Thermal evolution of metakaolin geopolymers, 2006); (Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry, 2007). Los materiales cementantes fueron desarrollados a finales de los años 70 por Davidovits. Estos materiales se elaboran con materias primas naturales o desechos industriales de composición tipo silicoaluminato (Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales, 2013) Tienen propiedades comparables al cemento que van desde su resistencia hasta su durabilidad, esto sumado a la baja generación de CO₂ en su producción, hacen de ellos unos potenciales sustitutivos del mismo, siendo más amigables al medio ambiente.

El primer uso documentado del MK fue en 1962 cuando se usó como reemplazo parcial del cemento (20% y 30% de MK) en la represa de Jupia en Brasil para disminuir el calor de hidratación, mejorar la cohesión y reducir la expansión debido a la reacción álcali agregado. Es comercialmente disponible desde mediados de los noventa. (Use of Raw or Processed Natural Pozzolans, 2000)

2.2. Justificación

Actualmente la industria de la construcción busca materiales que sean amigables con el medio ambiente, debido a esto se han realizado varias investigaciones con distintos materiales que generen menos contaminación, la producción de estos materiales cementantes llega a generar alrededor de un 80% menos de CO₂ que el cemento convencional (Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales, 2013), los estudios también han arrojado buenos resultados de estos materiales en propiedades como baja permeabilidad, mayor resistencia a ciclos de hielo-deshielo, gran resistencia ante la acción de los ácidos, fácil adhesión a hormigones, acero, vidrio y cerámicas.

Por lo anterior se pretende evaluar el comportamiento mecánico en concretos y morteros de un nuevo material cementante a base de MK, que reemplace en su totalidad el CC. Se espera que satisfaga las necesidades de la industria de la construcción en cuanto a resistencia a la compresión y resistencia a la flexión del concreto y del mortero en un porcentaje similar o mejor que en concretos y morteros convencionales a base de CC y que además sea amigable con el medio ambiente.

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Se pretende evaluar un nuevo material cementante a base de MK en el concreto y en el mortero, que tenga características mecánicas similares a las del CC en concretos y morteros convencionales, capaz de satisfacer las necesidades actuales de la industria de la construcción en cuanto a resistencia a la compresión y resistencia a la flexión y que reduzca el impacto ecológico liberando menos cantidad de CO₂ en su producción.

¿Cómo generar un nuevo material cementante a base de MK, con un comportamiento mecánico similar o mejor en concretos y morteros comparado con el CC, con el fin de sustituir por completo el CC?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Evaluar la resistencia a compresión y a flexión de un nuevo material cementante basado en MK, en concretos y morteros.

4.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un nuevo material cementante a base de MK con una estructura química similar a la del CC.
- Realizar la caracterización del nuevo material cementante a base de MK a partir del estudio de su comportamiento mecánico.
- Evaluar el comportamiento a compresión y flexión del nuevo material cementante a base de MK comparado con el CC.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. Alcances.

El presente proyecto tiene como fin generar un material cementante a base de MK para así poder evaluar su comportamiento mecánico en cuanto a resistencia a flexión y resistencia a la compresión, para ello se realizarán ensayos especificados en la normatividad INVIAS y NTC, con el fin de poder comparar los resultados con muestras de CC.

Una vez concluida la investigación, se entregará el artículo que contiene los análisis previos, los objetivos y el proceso metodológico con que se desarrolló el proyecto con un respectivo análisis de los resultados obtenidos.

5.2. Limitaciones

5.2.1. El tiempo para el desarrollo de la investigación:

El tiempo estimado para llevar a cabo el proyecto es de 4 meses, esto limita los ensayos que se le pueden realizar a las muestras y la profundización del tema.

5.2.2. Disponibilidad de equipos necesarios para ensayos de laboratorio:

La universidad maneja horarios de práctica libre muy restringidos y no cuenta con los equipos necesarios para la ejecución de todos los ensayos lo que limita la realización de algunos de estos, además implica el uso de laboratorios externos, generando así un costo adicional.

5.2.3. Disponibilidad de materiales:

La mayoría de los materiales utilizados en el proyecto no son suministrados por la universidad esto implica un costo adicional asumido por los estudiantes y una dificultad a la hora de conseguirlos.

5.2.4. Recursos:

Debido a que la universidad no tiene los equipos y materiales suficientes para la investigación, el uso de recursos propios se vuelve una limitante en el desarrollo del proyecto.

6. MARCO TEORICO

6.1. Materiales cementantes.

Originalmente, el concreto se hacía usando una mezcla de sólo tres materiales: cemento, agregado y agua; casi invariablemente, el cemento era cemento Convencional. Más tarde, con objeto de mejorar las propiedades del concreto, tanto en el estado fresco como endurecido, muy pequeñas cantidades de productos químicos se agregaban en la mezcla. Estos aditivos químicos, con frecuencia llamados simplemente aditivos.

Con el tiempo, otros materiales, de naturaleza inorgánica, se introdujeron en la mezcla de concreto. Las razones originales para usar estos materiales fueron usualmente económicas: eran más baratos que el cemento Convencional, algunas veces porque eran un producto secundario o desperdicios de procesos industriales. Un impulso más para la incorporación de estos materiales “suplementarios” en la mezcla de concreto lo dio el aumento agudo en el costo de energía en la década de 1970 y recordamos que el costo de energía representa una proporción principal del costo de la producción de cemento.

Todavía un incentivo para el uso de algunos materiales “suplementarios” fue proporcionado por los intereses ecológicos acerca de los pozos a cielo abierto y canteras para materias primas requeridas para la producción de cemento Convencional por un lado, y por otro, acerca del medio de deshacerse de los materiales de desperdicio industrial tales como escoria de alto horno, ceniza volante, o humo de sílice. Además, la fabricación de cemento Convencional es ecológicamente dañina ya que la producción de una tonelada de cemento da por resultado casi una tonelada de bióxido de carbono que se arroja a la atmósfera. (UPTC, 2017)

6.1.1. Propiedades del MK

6.1.1.1. Propiedades físicas

Las partículas del MK son generalmente de 0.50 μm a 5 μm de diámetro en un orden de magnitud más pequeño que los granos de cemento y un orden de magnitud más grande que las partículas de humo de sílice como se muestra en la Tabla 1 Propiedades físicas de las adiciones. El MK es de color blanco, haciéndolo atractivo para aplicaciones arquitectónicas debido a la naturaleza controlada del proceso y a su consistencia en apariencia y forma. (Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete, 2002)

Tabla 1 Propiedades físicas de las adiciones

Material	Tamaño	Área	Forma de la partícula	Gravedad específica
	medio (μm)	superficial (m^2/g)		
Cemento portland	10-15	< 1	Angular, irregular	3.20
Ceniza Volante	10-15	1-2	Principalmente esférica	2.2-2.4
Humo de sílice	0.1-0.3	15-25	Esférica	2.2
Metacaolín	1-2	15	Laminar	2.4

Fuente: (Mindess, y otros, 2003)

6.1.1.2. Composición química

Los constituyentes principales del MK son SiO_2 y Al_2O_3 la composición química típica se muestra en la Tabla 2 Propiedades químicas del MK El MK debe cumplir con los requisitos de la norma ASTM C618 “Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete” clase N, dadas en la Tabla 3.

Tabla 2 Propiedades químicas del MK

Elemento y/o compuesto	Porcentaje por peso
SiO_2	51.52 %
Al_2O_3	40.18 %
Fe_2O_3	1.23 %
CaO	2.00 %
MgO	0.12 %
K_2O	0.53 %
SO_3	0.00 %
TiO_2	2.27 %
Na_2O	0.08 %
L.O.I	2.01%

Fuente: (Properties of Metakaolin, 1994)

Tabla 3 Requisitos para el MK

Ítem	Límite
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Mín. 85 %
Álcalis disponibles	Máx. 1.0%
Perdida por ignición	Máx. 3.0 %
Finura: Cantidad retenida cuando se lava sobre tamiz 45 μm	Máx. 1.0 %
Índice de actividad de la resistencia a los 7 días (% de control)	85%
Incremento de la retracción de fraguado en barras de mortero a 28 días	Máx. 0.03%

Fuente: (ASTMC)

6.1.2. Producción

El caolín es un filosilicato formado por capas alternadas de tetraedros de sílice (SiO_2) y octaedros de alúmina (Al_2O_3) unidas por grupos hidroxilo (OH^-). Esta estructura cristalina, eléctricamente neutra, conduce a pequeños tamaños de partícula y a una morfología laminar permitiendo a las partículas moverse fácilmente unas sobre otras. La caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) es el término mineralógico para el principal constituyente del caolín (40-70%). Otros materiales constituyentes del caolín son dickita, nacrita y halloysita acompañadas por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados (Siddique, 2007).

Bajo condiciones ambientales normales, el caolín es estable. Sin embargo, cuando se somete a temperaturas que oscilan entre 500 y 800 °C, su estructura cristalina se transforma y se rompen los enlaces de Van der Waals (OH^-) que unen los tetraedros de sílice, SiO_2 , y los octaedros de alúmina, Al_2O_3 . El resultado de esta deshidroxilación es el MK, una fase de transición altamente reactiva. El metacaolín es una puzolana amorfa, con propiedades hidráulicas latentes, apropiada para el uso como material cementante suplementario. (Justice, 2005).

La temperatura de calcinación juega un papel importante en la actividad del MK. Ambroise et al. estudiaron los efectos de la temperatura de calcinación sobre la resistencia a la compresión de morteros adicionados con MK. Los autores encontraron que la temperatura de 700°C fue la más óptima; Posteriormente reportaron que la calcinación por debajo de este valor condujo a un material con menor reactividad y con mayor caolinita residual. Sobre 850 °C, reportaron el comienzo de la recristalización y la disminución de la reactividad cuando el caolín comenzó a convertirse en materiales cerámicos inertes tales como espinela, sílice y mulita.

El proceso de calcinación es llevado a cabo en hornos rotatorios y toma algunas horas. El uso del proceso por lecho fluidizado puede reducir la calcinación a minutos, sin embargo, ambos métodos requieren moler los productos que se encuentran aglomerados. El método

del calentamiento súbito que consiste en elevar rápidamente la temperatura, frecuentemente a 1000 °C, seguido por un rápido enfriamiento, puede reducir el tiempo del proceso de minutos a décimas de segundo. Adicionalmente, no se requiere moler el material ya que este se suspende en gas.

Mientras la calcinación por termo difusión a bajas temperaturas es bastante efectiva para remover grupos hidroxilo, (Pozzolanic properties of flash-calcined kaolinite: A comparative study with soak-calcined products, 1995), mostró que la velocidad de calcinación influencia la reactividad puzolánica del MK. En su estudio, los caolines que fueron calcinados por calentamiento súbito tuvieron mayores capacidades para absorber agua y por lo tanto requirieron más agua para alcanzar una adecuada manejabilidad, sugiriendo que aquellos tenían mayor reactividad inicial que los caolines procesados mediante termodifusión. Adicionalmente, la resistencia en las probetas hechas con MK obtenido por calcinamiento súbito fue superior a las hechas con MK obtenido por termodifusión.

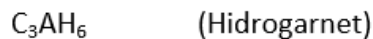
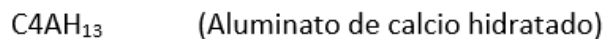
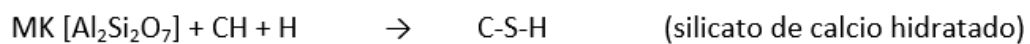
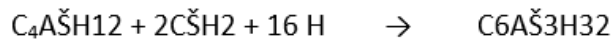
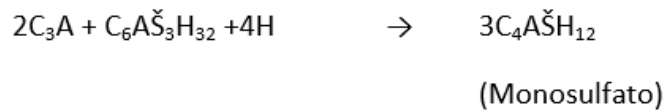
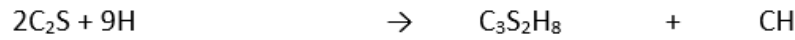
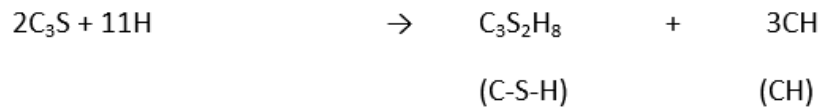
6.1.3. Reacción puzolánica

Independientemente de la reactividad del material cementante suplementario (MCS), si este es muy fino, generalmente impartirá beneficios sobre morteros y concretos. Las partículas pequeñas, que caben entre los granos de cemento, permiten un empaquetamiento más eficiente de la pasta, que a su vez reducen el sangrado, disminuyen el tamaño medio de los poros capilares y reducen la demanda de agua. Un mejor empaquetamiento de las partículas en la interface pasta/agregado resultará en una zona de transición más delgada con una microestructura más densa y homogénea. Adicionalmente, la acción conjunta de partículas más pequeñas con mayor área superficial incrementará la reactividad.

Otro factor importante a considerar cuando se usan MCS es la dilución. Cuando se usan como reemplazo del cemento, las adiciones experimentan el efecto de la remoción del cemento del sistema. De esta manera, a menos que el MSC comience a reaccionar de forma inmediata, suele haber una reducción en la tasa de evolución de calor y una ganancia de resistencia en proporción a la cantidad de cemento que se ha sustituido. El reemplazo del cemento por ceniza volante o por humo de sílice, este último en una menor proporción, solo muestra efectos benéficos hasta mucho después en el proceso de hidratación. Por otro lado, el MK debido a su reducido tamaño de partícula y su actividad hidráulica latente, puede superar el efecto de la dilución, contribuyendo al calor de hidratación y a la evolución de resistencia a edades más tempranas.

La presencia del MK tiene un efecto importante sobre la hidratación del cemento Convencional. Cuando no existen adiciones, aproximadamente un 20% a un 30% del volumen de la pasta resultante del proceso de hidratación es CH (Hidróxido de calcio). Sin embargo, cuando se introduce MK, este reacciona rápidamente con los compuestos

CH emergentes produciendo silicato de calcio hidratado (C-S-H) suplementario. Las reacciones de hidratación básicas son las siguientes:



6.1.4. Porosidad

En la mayoría de los casos, los morteros y concretos que contienen MCS puzolánico presentan valores de porosidad total igual o inferior a la del concreto sin adiciones. Sin embargo, no es la porosidad total, sino la distribución del tamaño de poro y la permeabilidad las que son críticas para el comportamiento y la durabilidad del concreto. La evolución de la porosidad depende de ciertas características de la MCS, como el tamaño de las partículas, la composición química, la mineralogía, y la pérdida por ignición. Debido a su finura y alta reactividad puzolánica, el MK tiene un gran potencial para disminuir la porosidad del concreto.

Frías y Cabrera [34] evaluaron la evolución de la porosidad capilar y de gel con el tiempo de hidratación a través de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP). Como poros capilares fueron clasificados los poros con tamaños del orden de 0.01 a 5.00 μm , mientras que se clasificaron como poros del gel aquellos con tamaños inferiores a 0,01 μm . Se prepararon cinco mezclas con relaciones a/c de 0.55 y se probaron nueve veces en el transcurso de un año. Para detener la hidratación, las muestras fueron sometidas a secado al horno a 1 bar y 50°C (para MIP) o a microondas (para DTA y TGA).

6.1.4.1. Durabilidad:

En cuanto al estudio del comportamiento del MK y su reacción al ataque por sulfatos y a la reacción álcali-sílice, se han desarrollado diversas investigaciones:

Marzouch y Langdon, establecen que al utilizar los materiales puzolánicos (humo de sílice, cenizas volantes, metacaolín, etc.) se produce una disminución significativa de la permeabilidad del concreto, la cual reduce la movilidad de los agentes agresivos a través de la matriz. La reducción de la permeabilidad se debe a la segunda formación de silicato de calcio hidratado, producto de la reacción puzolánica de la adición con el CH libre de la reacción de hidratación, el cual amarra químicamente los álcalis del cemento evitando su reacción. (Pore size distribution of MK paste, 1996).

6.1.4.2. Refinamiento de poros:

Khatib, Sabir y Wild analizaron el volumen y tamaño de poros en pastas de cemento Convencional adicionadas con MK (0.5, 10 y 15%) y encontraron que el tamaño de poros disminuyó con el incremento en el contenido de MK y en el tiempo de curado. Ellos afirman que esto ocurre gracias a un refinamiento de la estructura de los poros. Adicionalmente encontraron que el volumen de poros totales se incrementó. (Pore size distribution of MK paste, 1996).

6.1.4.3. Otros efectos:

La alta actividad puzolánica del MK permite la obtención de hormigones más densos que conllevan al decrecimiento de la permeabilidad de la matriz y al aumento de la protección de la corrosión del refuerzo; donde a su vez el riesgo a la corrosión se ve disminuido por la disminución de las concentraciones de álcali en la solución de poros. (Pore size distribution of MK paste, 1996).

6.2. El cemento

El cemento es un producto artificial, que se obtiene de la transformación de una materia prima, que puede estar compuesta de una mezcla de calizas, arcillas y otros minerales, o simplemente de calizas. Esta materia prima finamente molida y homogenizada, es llevada a altas temperaturas, a través de un horno (rotativo o vertical), de donde se obtiene un producto intermedio denominado clínker, del cual, al molerse finamente con alrededor de 5% en peso de yeso dihidrato, se obtiene el cemento. (Flores, 2004).

6.2.1. Producción.

Al menos el 90% del peso del cemento final, está conformado por el clínker, por lo que no es extraño, que la selección de las materias primas se base fundamentalmente en él. La gran mayoría de los cementos tienen en mayor o menor medida los mismos

componentes procedentes del clínker. Las diferencias en composición entre los distintos tipos de cementos son mínimas. (Geopolimeros sintetizados a partir de distitos materiales residuales, 2016).

Los componentes antes y después de añadir el yeso correspondiente se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición del cemento.

Componente	Composición (% en peso)	
	Clínker	Clínker + Yeso
Silicato tricálcico	40 - 60	50
Silicato bicálcico	20 - 30	24
Aluminato tricálcico	7 - 14.	11
Ferroaluminato tetracálcico	5 - 12.	8

Fuente: (Geopolimeros sintetizados a partir de distitos materiales residuales, 2016)

La producción consta de las siguientes etapas:

6.2.1.1. Extracción de materias primas.

La obtención de los silicatos es fundamental ya que estos representan entre un 60% y un 90% de la mezcla del clínker. Los silicatos de calcio antes mencionados no proceden de las materias primas directamente, si no que se obtienen a partir de la reacción de los óxidos de calcio en el horno rotatorio. Los óxidos de calcio son proporcionados por el carbonato, que procede de las materias primas, fundamentalmente de rocas calizas o margas. (Geopolimeros sintetizados a partir de distitos materiales residuales, 2016).

En la superficie de las canteras las rocas calizas son ricas en hierro, sílice y óxido de aluminio, mientras que las que se encuentran a mayor profundidad son más puras, teniendo mayor cantidad de carbonato de calcio y menos de los anteriores minerales. Aunque a priori pudiera parecer que solo interesa utilizar esta última, se mezclan las dos para conseguir diferentes tipos de cementos, aunque para el caso del CCO (cemento Convencional ordinario) sea mejor la segunda.

6.2.1.2. Preparación de las materias primas.

Tras la llegada de la materia prima procedente de la cantera, ésta pasa a ser triturada una primera vez con el fin de obtener partículas de 3,5 centímetros de radio aproximadamente. Además, se debe asegurar que se alimenta el horno con una mezcla homogénea. La mezcla se sigue moliendo a lo largo del proceso con el fin de obtener una mezcla lo más fina posible, especialmente al final, resultando una mezcla llamada crudo. (Geopolimeros sintetizados a partir de distitos materiales residuales, 2016).

6.2.1.3. Cocción en horno rotatorio.

Esta es la operación en la cual se transforman unas materias primas, que han sido previamente tratadas, en clínker. A una temperatura de 1500°C se producirán las diferentes reacciones necesarias para generar: Silicato tricálcico, Silicato bicálcico, Aluminato tricálcico y Ferroaluminato tetracálcico.

6.2.1.4. Tratamiento final.

Del horno rotatorio sale el principal componente del cemento Convencional, el clínker, que como se expuso anteriormente forma el 90% o más del peso del cemento. El clínker se pasa por unos enfriadores que bajan su temperatura hasta los 60°C, esto es fundamental que se haga rápido para asegurar su calidad. Después el clínker se mezcla y es molido junto con yeso (entre un 2% y un 8% del cemento final aproximadamente) en un molino de bolas, obteniéndose de esta manera la mezcla que conocemos con el nombre de cemento.

6.2.2. Impacto ambiental asociado a la producción del cemento

La producción convencional de cemento puede ocasionar algunos problemas ambientales:

- Enorme erosión del área de las canteras por la extracción continúa de la piedra caliza y otros materiales.
- Transporte inadecuado de materiales para su almacenamiento.
- Producción de gran cantidad de polvos provocados por el triturado de la piedra de la planta.
- Emisión de contaminantes al aire (monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas muy finas) dependiendo del tipo de combustible y proceso empleado durante la calcinación en el horno (combustión).
- El polvo de los residuos del horno forma el llamado Clinker, que puede contener metales pesados y otros contaminantes. Si el polvo del Clinker se desecha en las canteras donde se extrajo la piedra caliza o en un relleno sanitario puede contaminar los mantos de aguas subterráneas.

6.2.3. ¿Qué efectos producen las emisiones?

La exposición a monóxido de carbono afecta el sistema nervioso central y comparte los efectos de los óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas suspendidas, pues provocan la irritación de los tejidos del aparato respiratorio y agrava los síntomas de

personas con enfermedades pulmonares (asma, bronquitis crónica). Además, puede incrementar los padecimientos cardiacos, pulmonares y enfermedades respiratorias agudas.

6.2.4. Problemas ambientales.

- Se incrementa la cantidad y tipo de contaminantes suspendidos en el aire (monóxido de carbono, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y partículas muy finas) en comparación con el uso de carbón, petróleo o gas natural.
- Emite niveles más altos de plomo, cadmio, arsénico y mercurio, de un total de 19 metales pesados encontrados comúnmente en las emisiones a la atmosfera (como cromo hexavalente, plata, selenio, bario, berilio y antimonio).
- Durante la operación de la planta hay emisiones fugitivas de polvo y gases, además de los que se emiten por la chimenea.
- El polvo de los residuos del horno, el Clinker, en incluso el mismo cemento puede contener metales pesados además de PCI.

7. MARCO LEGAL

7.1. INV E – 402-13

Elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio para ensayos de compresión y flexión.

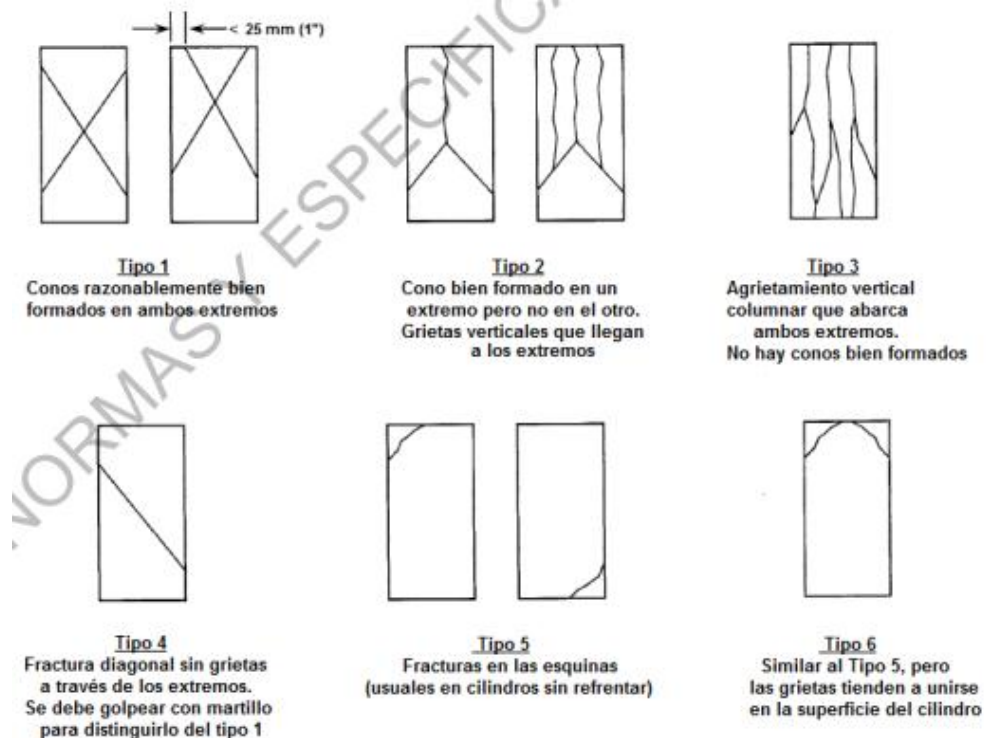
Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento para la elaboración y curado de muestras de concreto en el laboratorio bajo estricto control de materiales y condiciones de ensayo, usando concreto compactado por apisonado o vibración.

7.2. INV E – 410-13

Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.

Este método de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tanto cilindros moldeados como núcleos extraídos, y está limitado a concretos con una densidad superior a 800 kg/m^3 (50 lb/pe^3).

Ilustración 1 Fallas típicas en cilindros de concreto



Fuente: INV E 410-13

7.3. INV E – 415-13

Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple apoyada y cargada en el punto central.

Esta norma tiene por objeto establecer los procedimientos que deben seguirse en la determinación de la resistencia a la flexión de un pequeño espécimen de concreto por medio del uso de una viga simple cargada en el punto central.

7.4. NTC 220

Método normalizado de ensayo de resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico. ASTM C109/C109M-12 historical standard.

Esta norma tiene por objeto establecer el método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico utilizando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado.

NOTA: El método de ensayo de la norma ASTM C 349 suministra un método alternativo (no para ser usado para ensayo de aceptación).

8. ESTADO DEL ARTE

En términos generales, en los últimos tiempos se ha dado un gran avance en la investigación sobre todos los materiales que se pueden utilizar en la industria de la construcción para sustituir o ser adicionados al cemento y buscar un mayor beneficio a nivel ecológico, constructivo y de menor costo, a continuación, se referencian algunos trabajos de investigación sobre el MK en mezclas de concreto.

Trabajo de investigación especialización: Efecto de la adición de metacaolín en la resistencia a compresión y la permeabilidad de un concreto con diferente sistema de curado.

Se evaluó el efecto de la adición de MK sobre la durabilidad y la resistencia a la compresión del concreto. Para valorar la durabilidad se llevaron a cabo ensayos de absorción capilar (sortividad), absorción superficial inicial (I.S.A.T) y absorción en masa. El primer tipo de curado, “No curado”, consistió en dejar las probetas al aire hasta la edad de ensayo, el segundo tipo de curado “Curado”, consistió en sumergir las probetas en agua hasta la edad de ensayo.

A continuación, se presentan las dosificaciones usadas en la Tabla 5.

Mezcla Testigo (100 % cemento – 0% MK).

Mezcla con reemplazo del 5% de cemento por MK.

Mezcla con reemplazo del 10 % de cemento MK.

Tabla 5 Dosificaciones utilizadas

Materiales	Mezcla 1 Testigo	Mezcla 2 5% MK	Mezcla 3 10% MK
Agregado grueso	1000 Kg/m ³	1000 Kg/m ³	1000 Kg/m ³
Agregado fino	700 Kg/m ³	700 Kg/m ³	700 Kg/m ³
Cemento	360 Kg/m ³	342 Kg/m ³	324 Kg/m ³
Agua	180 Kg/m ³	180 Kg/m ³	180 Kg/m ³
Metacaolín	-	18 Kg/m ³	36 Kg/m ³
Plastificante	-	0.90 Kg/m ³	0.90 Kg/m ³
A/C	0.50	0.50	0.50
Asentamiento (NTC 396)	3.81 cm	17.78 cm	2.54 cm
Densidad (ASTM C642)	2518 Kg/m ³	2522 Kg/m ³	2486 Kg/m ³

Fuente: (Noguera, 2011)

Conclusiones.

- El reemplazo del material cementante por MK para incrementar la resistencia a la compresión fue más efectivo en las probetas no curadas que en las curadas.
- El reemplazo del 10% del material cementante por MK produjo incrementos de la resistencia a la compresión, superiores a los producidos por el reemplazo del 5% en los dos ambientes de curado y en todas las edades de ensayo. Los incrementos oscilan entre 0.19 y 26.67% para el 10% MK y entre 1,06 y 7.21% para el 5% MK.

- El reemplazo del 10% incrementó significativamente la resistencia de las probetas no curadas, pero apenas produjo resistencias ligeramente superiores a las de las probetas testigo curadas.
- El reemplazo del 5% incrementó levemente la resistencia a la compresión de las probetas no curadas, pero produjo resistencias inferiores o similares a las de la testigo en las probetas curadas.
- A medida que se incrementó el porcentaje de MK en las mezclas, la diferencia entre la resistencia de las probetas curadas y no curadas disminuyó en todas las edades de ensayo. (Noguera, 2011).

Artículo: Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado

Para el estudio se prepararon concretos utilizando un Cemento Convencional Ordinario, en todas las mezclas se utilizó un total de 450kg de cementante, donde la proporción incorporada en el concreto fue del 10%, mientras que el MK se incorporó en valores hasta de un 30%, todas las muestras se sometieron a compactación manual mediante la técnica de apisonado; posteriormente, a vibración. Esto con el fin de garantizar una adecuada consolidación. Posterior al moldeo, las probetas de concreto se curaron en agua saturada.

Conclusiones

- El porcentaje de adición influye notoriamente en las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos adicionados con MK, pues se encontró que hasta el 20%, las propiedades mecánicas aumentan con el porcentaje de adición. Sin embargo, en proporciones mayores, esta propiedad se ve disminuida, y puede deberse a que queda material sin reaccionar, que actúa como un relleno dentro de la mezcla.
- El uso del MK aumenta ligeramente la resistencia a la compresión en concretos, en comparación con un patrón de referencia. Sin embargo, el desempeño frente a la durabilidad es muy superior. Por ejemplo, para el desempeño frente a cloruros como la carga total se reportó un mejoramiento de esta propiedad, con índices hasta del 80% inferior al patrón.
- Al comparar el MK con el HS, se encontró que la resistencia a la compresión del MK fue inferior en comparación a la de los concretos con HS, mientras que el desempeño frente a la absorción total y superficial, además de la permeabilidad a los cloruros, fue superior en el MK. Esto podría estar relacionado con la formación de la sal de Friedel, debido a la presencia de la alúmina reactiva del MK.

- Con base en lo anterior, se afirma que el MK producido a partir de materias primas colombianas constituye una puzolana de alta reactividad que puede llegar a competir en el mercado con el humo de sílice importado, con la ventaja de su color blanco. (Janneth Torres-Agreto, 2011).

Trabajo de grado: Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas.

Como precursor se empleó un metacaolín comercial Meta Max (MK) La relación líquido/sólido para todas las muestras fue de 0.4. Las soluciones activantes se agitaron a temperatura ambiente durante 24 h para asegurar la completa disolución.

La mezcla de los componentes se llevó a cabo mecánicamente durante 7 minutos. Cada uno de los sistemas geopoliméricos se curaron a 75°C durante 20 h con humedad relativa de ~90%. Posteriormente, las muestras se almacenaron en una cámara húmeda a temperatura ambiente hasta completar una edad de curado de 28 días.

Conclusión

Los resultados obtenidos revelan que la utilización de diferentes fuentes de sílice en la producción de activadores alcalinos tiene un efecto sobre el comportamiento de los sistemas geopoliméricos cuando se someten a temperaturas elevadas. Se identificó la presencia de kalsilita como producto intermedio en el sistema SK después del tratamiento térmico. La producción de leucita utilizando un geopolímero producido a partir de un MK activado con K⁺, exhibe grandes beneficios técnicos y económicos para su utilización en aplicaciones de alta tecnología. (Villaquirán Caicedo Mónica Alejandra, 2013).

Trabajo de grado: Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Convencional.

Se presenta una amplia revisión de los efectos de la adición de MK en la fabricación y utilización del CC, considerando el MK como un producto que tiene efectos puzolánicos. Para ello se define previamente el concepto de puzolanas y se explica su acción en la química, mineralogía y estructura del cemento. El MK 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 y 600°C; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina.

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 hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. Además, tiene como gran ventaja su color blanco que le permite

aplicaciones especiales e incluso ser utilizado en la producción de cemento blanco adicionado. En general el MK reacciona con el hidróxido de calcio libre $\text{Ca}(\text{OH})_2$ del proceso de hidratación del cemento para formar C2S secundario, el cual posteriormente forma el gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, y el silicoaluminato bicálcico hidratado (gehlenita), que contribuyen con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas. (Juan Camilo Restrepo Gutierrez, 2006)

Article: Properties and durability of metakaolin blended cements: mortar and concrete.

Este artículo explora el efecto del metacaolín, una puzolana, en el rendimiento del concreto. Se encontró resistencia a la tracción y a la compresión para los especímenes curados hasta 360 y 90 días, respectivamente. Los cambios se registraron en la resistencia a la compresión de las muestras expuestas a sal (cloruro y soluciones de cloruro de sulfato) y se midió la penetración del cloruro y la capacidad de unión. Los hallazgos se compararon con los resultados para el concreto preparado con cemento ordinario de Convencional (OPC) y moderado de hidratación (Tipo II). Se encontró que el MK tiene un efecto muy positivo en la resistencia del concreto de 28 días, debido a la mejora de la microestructura del cemento hidratado. Reemplazar el cemento con MK elevó efectivamente la resistencia del concreto al ataque del cloruro. El concreto que contiene MK demostró ser sustancialmente más duradero en un ambiente de cloruro de sulfato. (Rafik Abbas, 2010)

Research work: Geopolymer technology: the current state of the art

Se presenta una breve historia y revisión de la tecnología de geopolímeros con el objetivo de introducir la tecnología y las vastas categorías de materiales que pueden sintetizarse mediante la activación con álcali de aluminosilicatos. Las características químicas y estructurales fundamentales de los geopolímeros derivados de metacaolín, cenizas volantes y escoria se exploran en términos de los efectos de la selección de materias primas sobre las propiedades de los compuestos de geopolímeros. Se muestra que las materias primas y las condiciones de procesamiento son fundamentales para determinar el comportamiento de fraguado, la trabajabilidad y las propiedades químicas y físicas de los productos geopoliméricos. Se presentan las características estructurales y químicas que son comunes a todos los materiales geopoliméricos, así como aquellas que están determinadas por las interacciones específicas que ocurren en diferentes sistemas, proporcionando la capacidad de diseñar geopolímeros a medida para aplicaciones específicas en términos de requisitos técnicos y comerciales. (P. Duxson A. Fernández, 2006)

Research work: Geopolymer and Convencional cement concretes in simulated fire

El concreto de cemento Convencional de alta resistencia tiene un alto riesgo de desprendimiento de fuego. Se dice que el Geopolímero, una alternativa ecológica al cemento Convencional, posee propiedades superiores resistentes al fuego. Sin embargo, el comportamiento de desprendimiento del concreto geopolímero en fuego no se informa. En este trabajo, los concretos de geopolímero y cemento Convencional con resistencias

de 40 a 100 MPa estuvieron expuestos a aumentos rápidos de temperatura, simulando exposiciones al fuego. Se llevaron a cabo dos pruebas de fuego simuladas, a saber, la prueba de exposición al aumento rápido de la temperatura superficial y la prueba de fuego con curva estándar. En ambos tipos de prueba, no se descubrieron astillas en los hormigones geopolímeros, mientras que el hormigón de cemento Convencional que se exhibió desprendimiento. Esto puede atribuirse a diferentes estructuras de poro de los dos hormigones. La prueba de sorptividad encontró que el concreto geopolímero tenía una sorción significativamente mayor, por lo tanto, más poros conectados, que el concreto de cemento Convencional en comparación con el mismo nivel de resistencia. Por lo tanto, se sugiere que el vapor de agua puede escapar de la matriz de geopolímero más rápido que en el cemento de cemento Convencional, lo que resulta en una menor presión interna de poro. El documento concluye que, cuando se compara con el mismo nivel de resistencia, el concreto geopolímero posee una mayor resistencia al descascarillado en un incendio que el concreto de cemento Convencional debido a su mayor porosidad. (Zhu Pan, 2011)

Research work: Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag

Este artículo describe la investigación sobre el uso de escoria granulada de alto horno como relleno activo en la fabricación de geopolímeros. Durante este trabajo, se encontró que el tiempo de fragmentación del geopolímero se correlaciona bien con la temperatura, la concentración de hidróxido de potasio, metacaolinita y la adición de silicato de sodio. Las propiedades físicas y mecánicas del geopolímero también se correlacionaron bien con la concentración de solución alcalina y la cantidad de metacaolinita que se agrega. La mayor resistencia a la compresión lograda fue de 79 MPa. Para las pruebas de resistencia al fuego, un panel de geopolímero de 10 mm de espesor fue expuesto a una llama de 1100 ° C, con las temperaturas medidas en el lado inverso que alcanzaron menos de 350 ° C después de 35 min. Los productos se pueden fabricar con fines de construcción y tienen un gran potencial para aplicaciones de ingeniería. (T. W. Cheng, 2003)

9. METODOLOGIA

9.1. Investigación preliminar.

Se genera el nuevo material cementante teniendo en cuenta el plan de dosificaciones de los óxidos que deben ser agregado y el mejor tipo de mezcla para la unión de los mismos con las partículas de MK.

9.2. Evaluación.

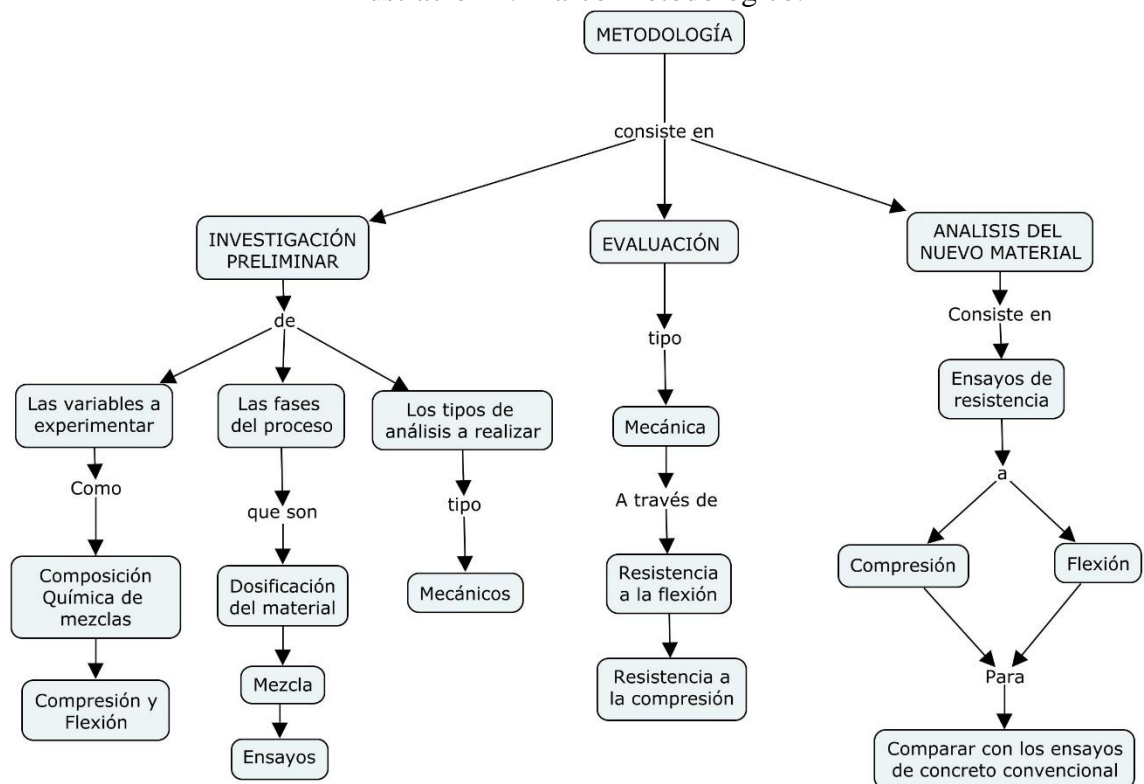
Con el fin de evaluar el nuevo material cementante se hacen ensayos de resistencia a la compresión y ensayos de resistencia a la flexión en muestras de concreto y mortero, según normatividad INVIAS y NTC.

9.3. Análisis del nuevo material

Para llegar a la conclusión de la investigación se comparan los resultados obtenidos en las muestras del nuevo material cementante con los especímenes del CC.

A continuación, se presenta la metodología detallada en La Ilustración 2.

Ilustración 2. Marco Metodologico.



Fuente: Autores.

10. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

10.1. Caracterización del agregado.

10.1.1. Caracterización del agregado para especímenes de concreto.

Con el fin de conocer la distribución de las partículas del agregado, se realizó la granulometría con la normatividad INVIAS.

Para el agregado de los especímenes de concreto se realizó un proceso de tamizado luego de ser lavado y secado el material a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. El proceso de tamizado se realizó con los tamices: 1", 3/4", 1/2", 3/8", N 4, N 8, N 16, N 30, N 40, N 50, N 80, N 100 y N 200, los resultados del proceso de tamizado se muestran en la Tabla 6.

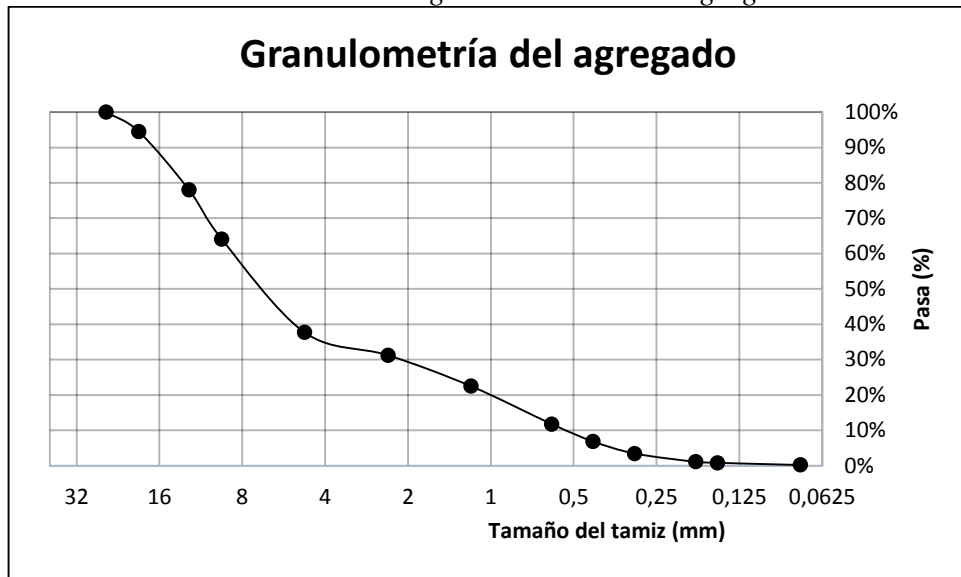
Tabla 6 Granulometría del agregado

Granulometría del agregado					
Tamiz	Peso Retenido (g)	(%) Retenido	Peso que pasa (g)	(%) Que pasa	(%) Retenido acumulado
1"	0,00	0,00%	4647,49	100,00%	0,00%
3/4"	257,03	5,53%	4390,46	94,47%	5,53%
1/2"	763,69	16,43%	3626,77	78,04%	21,96%
3/8"	648,69	13,96%	2978,08	64,08%	35,92%
# 4	1225,93	26,38%	1752,15	37,70%	62,30%
# 8	300,43	6,46%	1451,72	31,24%	68,76%
# 16	406,27	8,74%	1045,45	22,49%	77,51%
# 30	499,09	10,74%	546,36	11,76%	88,24%
# 40	226,98	4,88%	319,38	6,87%	93,13%
# 50	159,04	3,42%	160,34	3,45%	96,55%
# 80	108,95	2,34%	51,39	1,11%	98,89%
# 100	13,31	0,29%	38,08	0,82%	99,18%
# 200	28,81	0,62%	9,27	0,20%	99,80%
Fondo	9,27	0,20%	0,00	0,00%	100,00%
TOTAL	4647,49				

Fuente: Autores.

El análisis de la granulometría de los agregados de especímenes de concreto se muestra en la Ilustración 3, con el tamaño del tamiz en milímetros (mm) vs el porcentaje de material que pasa.

Ilustración 3 Curva granulométrica del agregado



Fuente: Autores.

Para la elaboración de los especímenes de concreto se utilizó agregado y arena, por lo anterior es pertinente mencionar el rango de tamices que comprende a cada uno.

De la Tabla 6, podemos determinar que el 62,3% del material es agregado, ya que es el porcentaje que pasa por el tamiz N°1 y se retiene en el tamiz N°4 y que el 37,7% del material son arenas ya que es el porcentaje que pasa por el tamiz N°8 y retiene en el fondo.

10.2. Caracterización del agregado para especímenes de mortero.

La arena de guamo es el agregado seleccionado para la elaboración de los especímenes de mortero.

Para conocer la distribución de las partículas se siguió la normatividad del Instituto Nacional de vías, para este caso la norma I.N.V.E 213-07 en donde se realiza un proceso de tamizado luego de ser lavado y secado el material a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Se realizó el proceso de tamizado con los tamices N°8, 16,30, 50,100, 200 y fondo para conocer los pesos retenidos. (JOHANNA CAROLINA RUIZ ACERO, 2015).

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de tamizado.

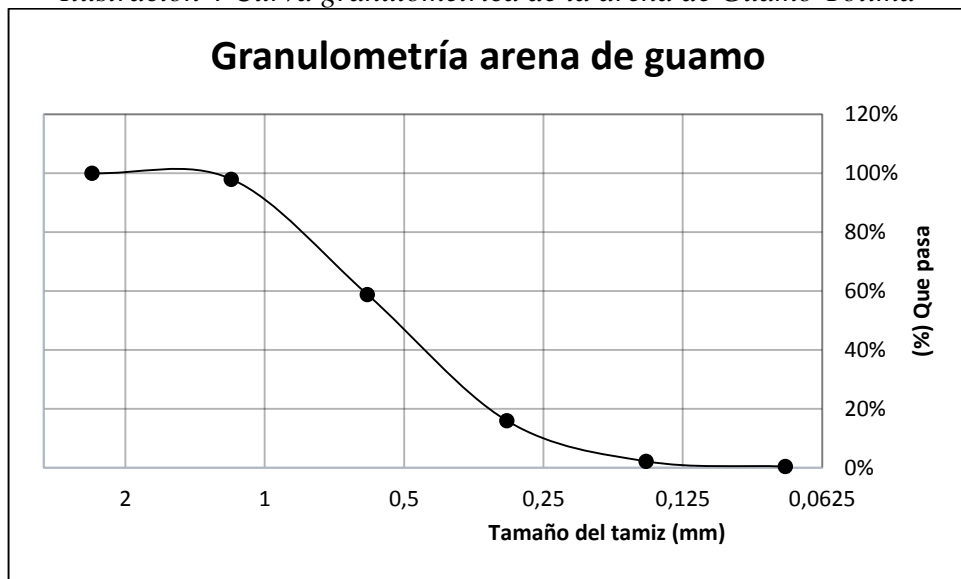
Tabla 7 Granulometría arena de Guamo-Tolima

Peso retenido y porcentaje que pasa para la arena de Guamo-Tolima				
Tamiz	Peso Retenido (g)	(%) Retenido	(%) Retenido acumulado	(%) Que pasa
# 8	0,00	0,00	0,00	100,00%
# 16	10,30	2,06	2,06	97,94%
# 30	195,70	39,14	41,20	58,80%
# 50	214,10	42,82	84,02	15,98%
# 100	69,00	13,80	97,82	2,18%
# 200	8,90	1,78	99,60	0,40%
Fondo	1,00	0,20	99,80	0,20%
TOTAL	499			

Fuente: (JOHANNA CAROLINA RUIZ ACERO, 2015)

El análisis de la granulometría del agregado de especímenes de mortero se muestra en la Ilustración 4, con el tamaño del tamiz en milímetros (mm) vs el porcentaje de material que pasa.

Ilustración 4 Curva granulométrica de la arena de Guamo-Tolima



Fuente: (JOHANNA CAROLINA RUIZ ACERO, 2015).

10.3. Elaboración del material cementante.

Se comparan las composiciones químicas del MK y del CC obtenidas en la investigación como se muestra en la Tabla 8 y se determina el déficit de óxidos en el nuevo material cementante.

Tabla 8 Composición química

OXIDOS		MK (%)	CC (%)
Óxido de Silicio	SiO ₂	66,52	20,00
Óxido de Hierro (III)	Fe ₂ O ₃	21,00	2,52
Óxido de Sodio	Na ₂ O	0,01	0,21
Óxido de Titanio	TiO ₂	1,04	0,22
Óxido de Fosforo (III)	P ₂ O ₅	0,03	0,21
Óxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	22,20	4,33
Óxido de Potasio	K ₂ O	0,01	0,82
Óxido de Magnesio	MgO	0,81	1,41
Óxido de Calcio	CaO	0,01	64,53
OTROS	OTROS	6,12	5,92

Fuente: Autores

Con los datos anteriores se hizo un análisis para una muestra de MK y se determinó la cantidad de cada óxido a ser agregados por cada 100g de MK, como se muestra en la Tabla 9, la adición de estos óxidos al MK se hace por dos tipos de mezcla, mezcla tipo mecánica y mezcla tipo mortero. Para determinar la mejor mezcla que une los óxidos con las partículas del MK se hace un ensayo DRX y un ensayo de resistencia a la compresión, los resultados y el análisis de estos ensayos se encuentran en la sección 11.1.

Tabla 9 Óxidos a ser agregados

Óxidos para 100g de MK	(g)
Na ₂ O	0,58
P ₂ O ₅	0,56
K ₂ O	2,40
MgO	3,55
CaO	194,55

Fuente: Autores

10.4. Dosificación de la mezcla para especímenes de concreto.

Teniendo en cuenta las propiedades físicas de los materiales, se realiza el diseño de mezcla a ser utilizado para la elaboración de los especímenes de concreto tanto de CC como de MK. Para la elaboración de los especímenes con MK, se reemplaza el 100% del CC por el nuevo material cementante. En la Tabla 10 se muestran las cantidades utilizadas para 1 metro cubico de concreto utilizando una relación Agua/Cementante (A/C) de 0,5.

Tabla 10 Diseño de mezcla del concreto A/C=0,5

Diseño de mezcla del concreto para 1m ³			
CC o MK (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (Lt)
341,88	683,76	1367,52	170,94

Fuente: Autores.

10.5. Dosificación de la mezcla para especímenes de mortero.

Teniendo en cuenta que el agregado para morteros es arena de guamo, se realiza el diseño de mezcla para especímenes de mortero tanto de CC como de MK. Para la elaboración de los especímenes con MK, se reemplaza el 100% del CC por el nuevo material cementante. En la Tabla 11 se muestran las cantidades utilizadas para 1 metro cubico de mortero.

Tabla 11 Diseño de mezcla del mortero A/C=0,5

Diseño de mezcla del mortero para 1m³			
CC o MK (Kg)	Arena de Guamo (Kg)	Agua (Lt)	
521,42	1444	265,04	

Fuente: Autores.

10.6. Elaboración cilindros de concreto, ensayo previo.

Para determinar el mejor tipo de mezcla que une los óxidos con las partículas del MK ofreciendo una resistencia a compresión mayor, se hizo un ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto según normatividad INVIAS. Para la elaboración de los especímenes se utilizó un molde en PVC de altura 10cm, diámetro 5cm para un volumen de 196,35cm³ de concreto, teniendo la dosificación para 1m cubico de concreto se hace una relación de volúmenes y se calculan las cantidades para el molde en PVC, estas cantidades son mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12 Dosificación para cilindros de concreto de prueba

Dosificación para cilindros de concreto de prueba A/C=0,5			
MK (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (Lt)
0,07	0,13	0,27	0,04

Fuente: Autores.

Se elaboraron dos cilindros de concreto con MK con la adición de los óxidos, para la elaboración de los cilindros el MK se mezcla previamente con los óxidos con ambos tipos de mezclado. El mezclado mecánico une los óxidos con las partículas del MK, pero no los combina, esto permite que al entrar al contacto con el agua se genere una mayor cantidad de reacciones químicas que en la mezcla con mortero. En la mezcla tipo mortero se busca macerar el material para unir los óxidos con las partículas del MK, esto permite una mayor homogeneidad en el material. A continuación, se muestran dos ilustraciones del proceso de mezclado de los óxidos con el MK.

Ilustración 5 Mezcla tipo mortero



Fuente: Autores

Ilustración 6 Mezcla tipo mecánica.



Fuente: Autores.

Teniendo listo el material cementante se elaboran ambos cilindros según normatividad INVIAS como muestra la Ilustración 7, estos cilindros se realizan con el fin de comparar los resultados y determinar la mejor mezcla con la que se realizaran los demás ensayos. Los cilindros son desencofrados al segundo día de su elaboración y son fallados a los siete días de curado.

Ilustración 7 Elaboración cilindros de concreto de prueba



Fuente: Autores.

Este ensayo busca determinar la resistencia a la compresión de los especímenes cilíndricos de concreto y comparar los resultados para determinar la mezcla con la que se realizaran los demás ensayos. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. Los cilindros fueron curados a temperatura ambiente y a los siete días de curado fueron fallados en una maquina universal.

10.7. Elaboración cilindros de concreto, ensayo final.

Con el fin de determinar el comportamiento mecánico del nuevo material cementante y compararlo con el CC en especímenes de concreto, se realiza un ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto según normatividad INV E 410-13. El ensayo se realiza tanto para especímenes con CC como para especímenes con el nuevo material cementante, con el fin de comparar las resistencias a compresión y a flexión. Para la elaboración de los especímenes se utilizó un molde metálico de altura 20cm, diámetro 10cm para un volumen de 1570,80cm³ de concreto, teniendo la dosificación para 1m³ cubico de concreto se hace una relación de volúmenes y se calculan las cantidades para el molde metálico, estas cantidades son mostradas en la Tabla 13.

Tabla 13 Dosificación cilindros de concreto, ensayo final A/C=0,5

Dosificación para cilindros de concreto, ensayo final			
CC o MK (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (Lt)
0,54	1,07	2,15	0,27

Fuente: Autores.

Con la dosificación para los cilindros finales se elaboran 3 especímenes con MK como se muestra en la Ilustración 8 y 3 especímenes con CC, los cilindros se elaboran según normatividad INVIAS. Se busca determinar la resistencia a la compresión de los

especímenes de concreto con ambos materiales, para comparar los resultados y así poder evaluar el comportamiento mecánico del nuevo material cementante. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. Los cilindros son fallados a los 7, 14 y 28 días de curado, los cilindros de concreto con MK fueron curados a temperatura ambiente.

Ilustración 8 Cilindros de concreto con MK



Fuente: Autores

Al observar los cilindros de concreto con MK elaborados con una relación $A/C=0,5$ se evidencio una porosidad por falta de agua en la mezcla y se hizo un ensayo de prueba aumentando la relación A/C de 0,5 a 0,75 y se obtuvo una nueva dosificación como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14 Dosificación cilindros de concreto $A/C=0,75$

Dosificación para cilindros de concreto			
CC o MK (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (Lt)
0,50	1,07	2,15	0,38

Fuente: Autores.

Con esta nueva dosificación se elaboran 3 especímenes con MK según normatividad INV E 410-13 como se muestra en la Ilustración 9. Se busca determinar la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto con la nueva dosificación, adicionalmente se hace la comparación de los resultados respecto a las 2 dosificaciones para determinar el comportamiento al aumentar la relación A/C . El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. Los cilindros son fallados a los 7, 14 y 28 días de curado, los cilindros de concreto con MK fueron curados a temperatura ambiente.

Ilustración 9 Cilindros de concreto con MK A/C=0,75



Fuente: Autores.

10.8. Elaboración de vigas de concreto.

Este ensayo se determina la resistencia a flexión del concreto, empleando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central. Este ensayo se usa para determinar el módulo de rotura de especímenes preparados y curados de acuerdo a las normas INV E 415-13. La resistencia determinada puede variar si existen diferencias en el tamaño del espécimen, la preparación, la condición de humedad o el curado.

Para la elaboración de los especímenes se utilizó un molde metálico de altura 15cm, ancho 15cm y largo 52cm para un volumen de 11700cm³ cúbicos de concreto, teniendo la dosificación para 1m³ cubico de concreto se hace una relación de volúmenes y se calculan las cantidades para el molde metálico de la viga, estas cantidades son mostradas en la Tabla 15.

Tabla 15 Dosificación para vigas de concreto A/C=0,5

Dosificación para vigas de concreto			
CC o MK (Kg)	Grava gruesa (Kg)	Grava fina (Kg)	Agua (Lt)
4,00	8,00	16,00	2,00

Fuente: Autores.

Con la dosificación para las vigas se elaboran 3 especímenes con MK como se muestra en la Ilustración 10 y 3 especímenes con CC, las vigas se elaboran según normatividad INVIAS. Se busca determinar la resistencia a flexión de los especímenes de concreto con ambos materiales, para comparar los resultados y así poder evaluar el comportamiento mecánico del nuevo material cementante. El ensayo consiste en determinar la resistencia a flexión empleando una viga simplemente apoyada y cargada en el punto central, hasta que se presente la falla. Las vigas son falladas a los 7, 14 y 28 días de curado, las vigas de concreto de MK fueron curadas a temperatura ambiente.

Ilustración 10 Vigas en concreto con MK



Fuente: Autores.

10.9. Elaboración de cubos de mortero.

Con el fin de determinar el comportamiento mecánico del nuevo material cementante y compararlo con el CC en especímenes de mortero, se realiza un ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero según normatividad NTC-220. El ensayo se realiza tanto para especímenes con CC como para especímenes con el nuevo material cementante, con el fin de comparar las resistencias. Para la elaboración de los especímenes se utilizó un molde en madera para cubos de 50mm de ancho, 50mm de alto y 50mm de largo para un volumen de 125000mm³ cúbicos de mortero, teniendo la dosificación para 1m³ cubico de mortero se hace una relación de volúmenes y se calculan las cantidades para el molde de madera, estas cantidades son mostradas en la Tabla 16.

Tabla 16 Dosificación para cubos de mortero A/C=0,5

Dosificación para cubos de mortero		
CC o MK (Kg)	Arena de Guamo (Kg)	Agua (Lt)
0,20	0,54	0,10

Fuente: Autores.

Con la dosificación para los morteros se elaboran 6 especímenes con MK como se muestra en la Ilustración 11 y 6 especímenes con CC, los cubos se elaboran según normatividad NTC. Se busca determinar la resistencia a compresión de los especímenes de mortero con ambos materiales, para comparar los resultados y así poder evaluar el comportamiento mecánico del nuevo material cementante. El ensayo consiste en determinar la resistencia a compresión de los cubos a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. Los cubos son fallados a los 7, 14 y 28 días de curado, en

cuanto a los cubos de mortero con MK, 3 de estos fueron curados a temperatura ambiente y los otros 3 fueron llevados al horno a una temperatura de 200°C durante 4 horas.

Ilustración 11 Cubos en mortero con MK



Fuente: Autores.

11. RESULTADOS Y ANALISIS.

11.1. Elección de mezcla tipo mecánica o mezcla tipo mortero.

Como se mencionó anteriormente, para la elección del mejor tipo de mezcla que une los óxidos con las partículas del MK, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en cilindros de prueba, los resultados de los ensayos y su respectivo análisis son mostrados a continuación.

11.1.1. Ensayo a compresión en cilindros de concreto de prueba

En este ensayo se hicieron 2 especímenes de concreto con MK más la adición de los óxidos faltantes según el tipo de mezcla, estos especímenes son fallados a los 7 días de curado como se evidencia en la Ilustración 12 y la Ilustración 13.

Ilustración 12 Falla cilindro de concreto con MK de prueba 1



Fuente: Autores.

Según la Ilustración 1 en donde podemos observar los tipos de fallas posibles que se pueden presentar al momento de llevar a la falla un cilindro de concreto a compresión, observamos en la Ilustración 12 que el cilindro de prueba 1, con la adición de los óxidos al MK con mezcla tipo mortero, presenta una falla Tipo 3, agrietamiento vertical columnar que abarca ambos extremos y no hay conos bien formados, los resultados de la carga máxima que resiste a compresión este cilindro se muestran en la Tabla 17.

Ilustración 13 Falla cilindro de concreto con MK de prueba 2



Fuente: Autores.

Igual que en el caso anterior, en la Ilustración 1 podemos observar los tipos de fallas posibles que se pueden presentar al momento de llevar a la falla un cilindro de concreto a compresión, observamos en la Ilustración 13 que el cilindro de prueba 2, con la adición de los óxidos al MK con mezcla tipo mecánica, presenta una falla Tipo 5, fracturas en las esquinas (usuales en cilindros sin refrentar), los resultados de la carga máxima que resiste a compresión este cilindro se muestran en la Tabla 17.

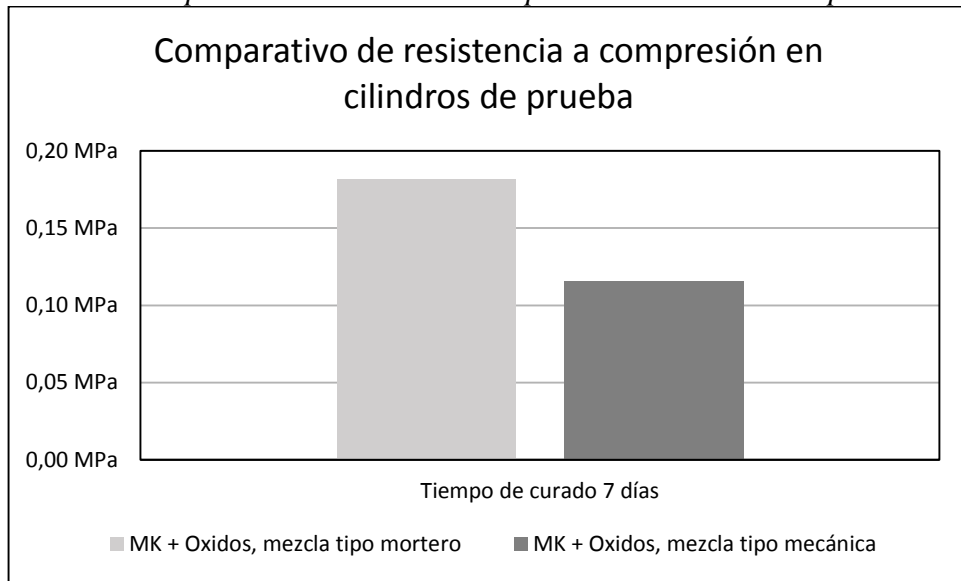
Tabla 17 Resistencia a compresión en cilindros de concreto, ensayo de prueba A/C=0,5

Cilindros de concreto a compresión según la mezcla		
Tipo de Mezcla	Carga Soportada	Resistencia
Adición de los óxidos al MK con mezcla tipo mortero	0,356 kN	0,181 MPa
Adición de los óxidos al MK con mezcla tipo mecánica	0,227 kN	0,116 MPa

Fuente: Autores.

En la Ilustración 14, se puede observar que los mejores resultados en cuanto a resistencia a la compresión son los obtenidos al unir los óxidos con las partículas del MK con la mezcla tipo mortero, esto se debe a que con esta mezcla se evidencia una mayor homogeneidad en el material, lo que hace que se generen correctamente las reacciones químicas que intervienen en el proceso de curado y por ende gane mayor resistencia. Por lo anterior la mezcla tipo mortero es la utilizada para continuar con el desarrollo de la investigación.

Ilustración 14 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de prueba A/C=0,5



Fuente: Autores.

11.2. Ensayo a compresión en cilindros de concreto.

Habiendo determinado la mejor mezcla que une los óxidos con las partículas del MK, se elaboran cilindros con el nuevo material cementante y cilindros convencionales con CC según normatividad INV E 410-13, estos especímenes son fallados a compresión a los 7 días, 14 días y 28 días de curado, la falla general presentada en los cilindros de concreto con MK se muestra en la Ilustración 15 y en los cilindros de concreto con CC se muestra en la

Ilustración 15 Falla en cilindros de concreto con MK A/C=0,5



Fuente: Autores.

Revisando la Ilustración 1 podemos observar los tipos de fallas posibles que se pueden presentar al momento de llevar a la falla un cilindro de concreto a compresión, observamos en la Ilustración 15 que los cilindros de concreto con MK, presenta una falla Tipo 3, agrietamiento vertical columnar que abarca ambos extremos y no hay conos bien formados. Los resultados de la carga máxima que resisten a compresión estos cilindros se muestran en la Tabla 18

Ilustración 16 Falla en cilindros de concreto con CC A/C=0,5



Fuente: Autores.

Nuevamente en la Ilustración 1 podemos observar los tipos de fallas posibles que se pueden presentar al momento de llevar a la falla un cilindro de concreto a compresión, observamos en la Ilustración 16 que los cilindros de concreto con CC, presenta una falla Tipo 3, agrietamiento vertical columnar que abarca ambos extremos y no hay conos bien formados. Los resultados de la carga máxima que resisten a compresión estos cilindros se muestran en la Tabla 18

Tabla 18 Resistencia a compresión en cilindros de concreto A/C=0,5

Resistencia a compresión en cilindros de concreto			
Tiempo de curado	7 días	14 días	28 días
Resistencia en especímenes con CC	13,36 MPa	17,81 MPa	25,46 MPa
Resistencia en especímenes con MK	3,32 MPa	4,42 MPa	6,39 MPa

Fuente: Autores.

Comparando los resultados obtenidos en el ensayo como se muestra en la Ilustración 18, los cilindros de concreto con el nuevo material cementante tienen una resistencia máxima a la compresión muy baja en comparación a la resistencia máxima que alcanzan los

cilindros de concreto con CC, esta resistencia oscila aproximadamente del 24% al 25%. Debido a este resultado y al observar que los cilindros quedaron porosos por la relación A/C utilizada, se realiza otro ensayo cambiando la relación A/C de 0,5 a 0,75 para los cilindros con MK, la falla general presentada en estos cilindros se muestra en la Ilustración 17.

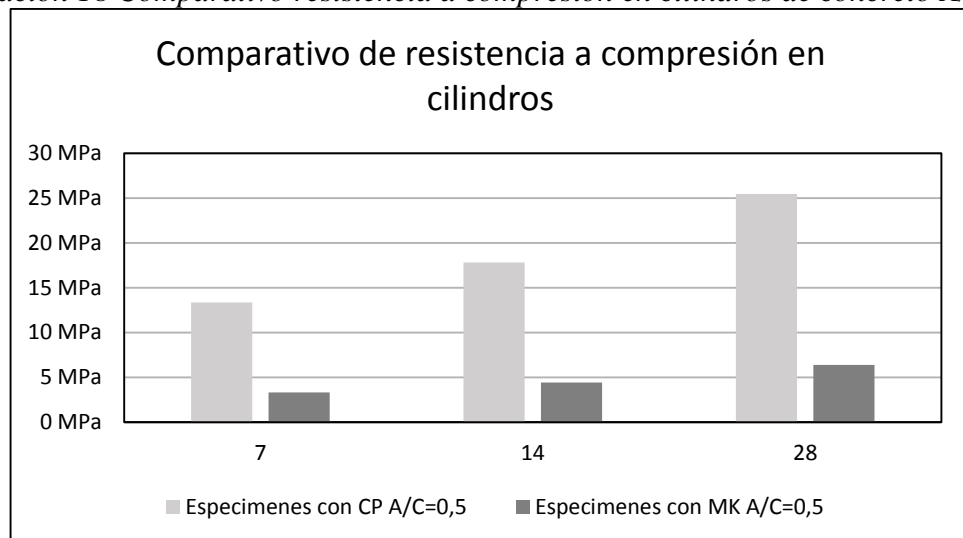
Ilustración 17 Falla en cilindros de concreto con MK A/C=0,75



Fuente: Autores.

Según la Ilustración 1 en donde podemos observar los tipos de fallas posibles que se pueden presentar al momento de llevar a la falla un cilindro de concreto a compresión, observamos en la Ilustración 17 que los cilindros de concreto con MK , presenta una falla Tipo 1, conos razonablemente bien formados en ambos extremos. Los resultados de la carga máxima que resisten a compresión estos cilindros se muestran en la Tabla 19.

Ilustración 18 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de concreto A/C=0,5



Fuente: Autores.

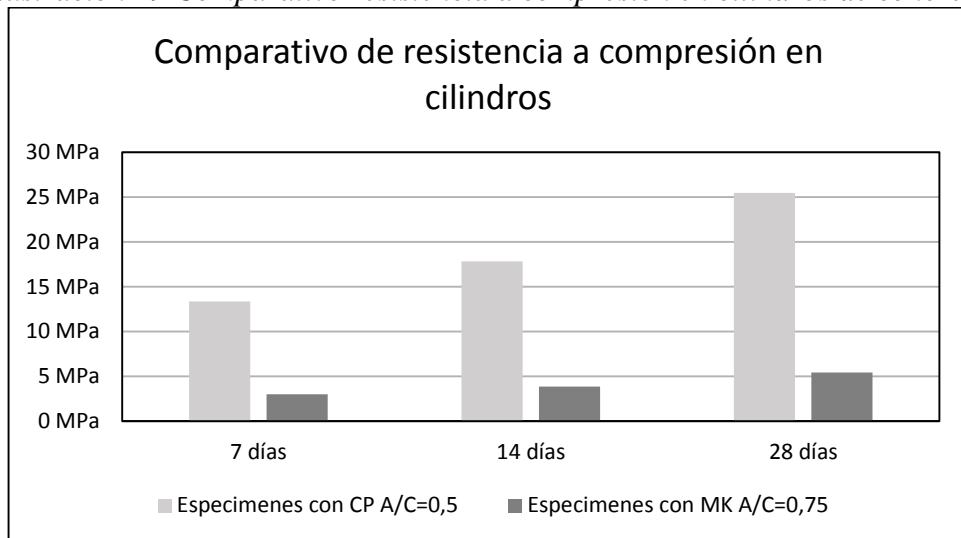
Tabla 19 Resistencia a compresión en cilindros de concreto.

Resistencia a compresión en cilindros de concreto, ensayo final			
Tiempo de curado	7 días	14 días	28 días
Resistencia en especímenes con CC, A/C=0,5	13,36 MPa	17,81 MPa	25,46 MPa
Resistencia en especímenes con MK, A/C=0,75	2,97 MPa	3,83 MPa	5,42 MPa

Fuente: Autores.

Al comparar los resultados de los ensayos a compresión obtenidos en la Ilustración 18 con los obtenidos en la Ilustración 19, podemos concluir que se logra una mayor resistencia a la compresión en los cilindros con una relación A/C de 0,5 que en los cilindros con una relación A/C de 0,75. Esto se debe a que al agregarle más agua a la muestra para disminuir la relación de vacíos, esta afecta su comportamiento mecánico, reduciendo la resistencia a compresión del concreto.

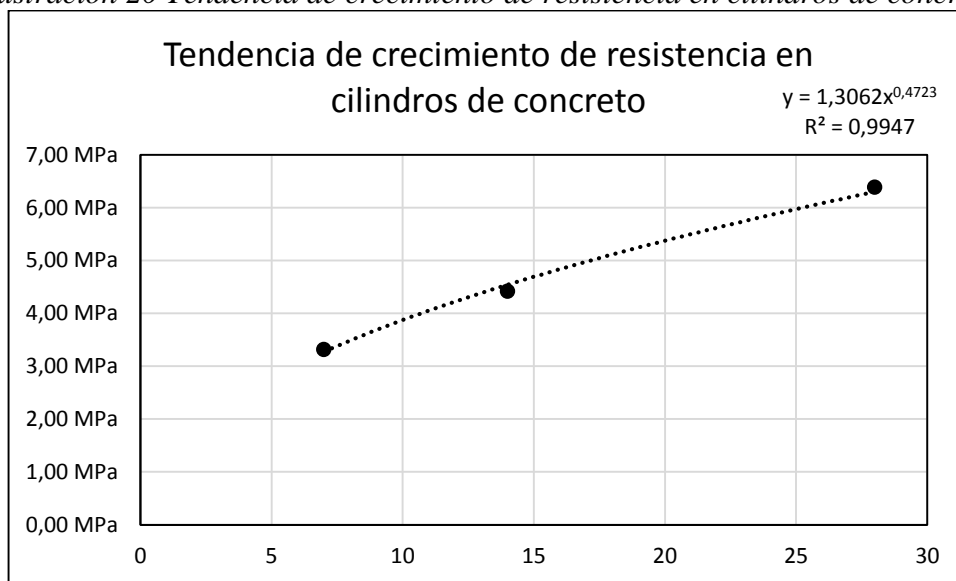
Ilustración 19 Comparativo resistencia a compresión en cilindros de concreto



Fuente: Autores.

Graficamos los resultados obtenidos en la Tabla 18, en especímenes de MK con una relación A/C=0.5, como se muestra en la Ilustración 20, para calcular la tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión vs el tiempo de curado. De la Ecuación 1 podemos determinar el tiempo de curado necesario para alcanzar una resistencia máxima igual a la obtenida en los especímenes de concreto con CC.

Ilustración 20 Tendencia de crecimiento de resistencia en cilindros de concreto



Fuente: Autores.

Ecuación 1 Tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión en cilindros de concreto.

$$y = 1,3062x^{0,4723}$$

Fuente: Autores

Donde:

Y= Resistencia a la compresión en MPa.

X= Tiempo de curado en días.

Aplicando la Ecuación 1, se calcula que el tiempo de curado estimado para llegar a una resistencia a la compresión de 25,46 MPa en cilindros de concreto de MK con una relación A/C=0,5 es de 539 días.

11.3. Ensayo a flexión en vigas de concreto.

Seguido del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros de concreto, se realiza un ensayo de resistencia a la flexión en vigas de concreto con el nuevo material cementante y vigas de concreto convencionales con CC según normatividad INV E 415-13, estos especímenes son fallados a flexión a los 7 días, 14 días y 28 días de curado, en la Ilustración 21 se muestra la falla típica de una viga de concreto con MK.

Ilustración 21 Falla en vigas de concreto con MK A/C=0,5



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la superficie de falla y la carga soportada, se calcula el módulo de rotura para cada una de las vigas según normatividad INV E 415-13. Los resultados son mostrados en la Tabla 20.

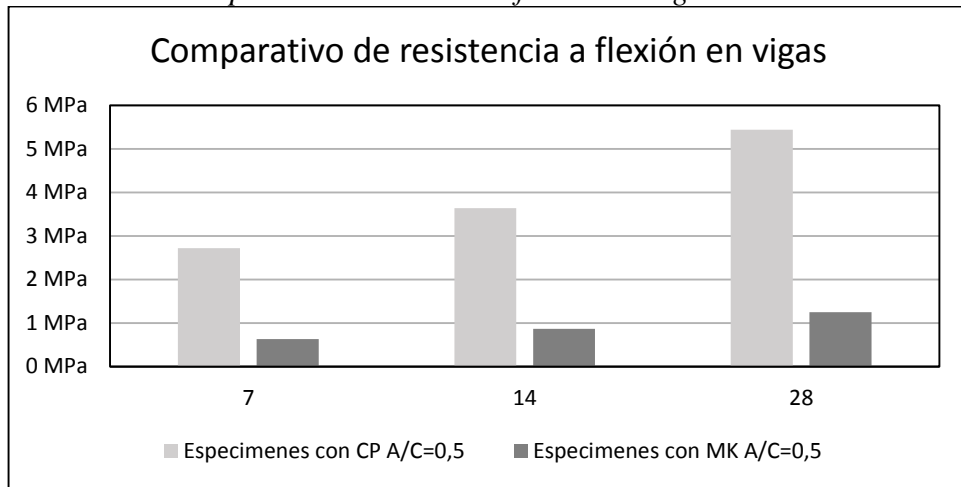
Tabla 20 Resistencia a flexión en vigas de concreto A/C=0,5

Resistencia a flexión en vigas de concreto			
Tiempo de Fraguado	7 días	14 días	28 días
Módulo de rotura en especímenes con CC, A/C=0,5	2,72 MPa	3,64 MPa	5,44 MPa
Módulo de rotura en especímenes con MK, A/C=0,5	0,63 MPa	0,87 MPa	1,25 MPa

Fuente: Autores.

Comparando los resultados obtenidos como se muestra en la Ilustración 22, podemos concluir que las vigas de concreto con el nuevo material cementante, tienen una resistencia máxima a la flexión muy baja en comparación a las vigas de concreto con CC, esta resistencia oscila aproximadamente del 23% al 24%, si comparamos estos resultados con los obtenidos en cilindros de concreto, vemos que el comportamiento mecánico de las muestras es similar.

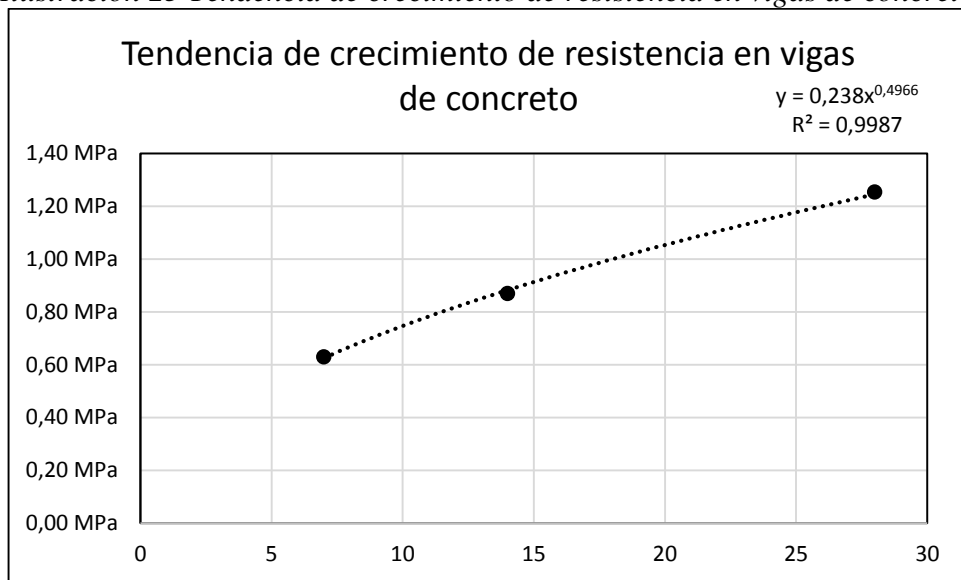
Ilustración 22 Comparativo resistencia a flexión en vigas de concreto A/C=0,5



Fuente: Autores.

Para determinar la tendencia de crecimiento de la resistencia a flexión vs el tiempo de curado, graficamos los resultados obtenidos en la Tabla 20, en especímenes de MK con una relación A/C=0.5, como se muestra en la Ilustración 23, de esta ilustración podemos determinar la Ecuación 2 con la cual determinamos el tiempo de curado necesario para alcanzar una resistencia máxima igual a la obtenida en los especímenes de concreto con CC.

Ilustración 23 Tendencia de crecimiento de resistencia en vigas de concreto



Fuente: Autores.

Ecuación 2 Tendencia de crecimiento de la resistencia a flexión en vigas de concreto.

$$y = 0,238x^{0,4966}$$

Fuente: Autores.

Donde:

Y= Resistencia a la flexión en MPa.

X= Tiempo de curado en días.

De la Ecuación 2, se calcula que el tiempo de curado estimado para llegar a una resistencia a la flexión de 5,44 MPa en vigas de concreto de MK con una relación A/C=0,5 es de 549 días.

11.4. Ensayo a compresión en cubos de mortero.

Por último, se realiza un ensayo de resistencia a la compresión en cubos de mortero con el nuevo material cementante y cubos de mortero convencionales con CC según normatividad NTC-220, estos especímenes son fallados a compresión a los 7 días, 14 días y 28 días de curado, en la Ilustración 24 se muestra la falla típica de los cubos de mortero con MK y en la (I) se muestra la falla típica para los cubos de mortero con CC:

Ilustración 24 Falla en cubos de mortero con MK A/C=0,5



Fuente: Autores.

Ilustración 25 Falla en cubos de mortero con CC A/C=0,5



Fuente: Autores.

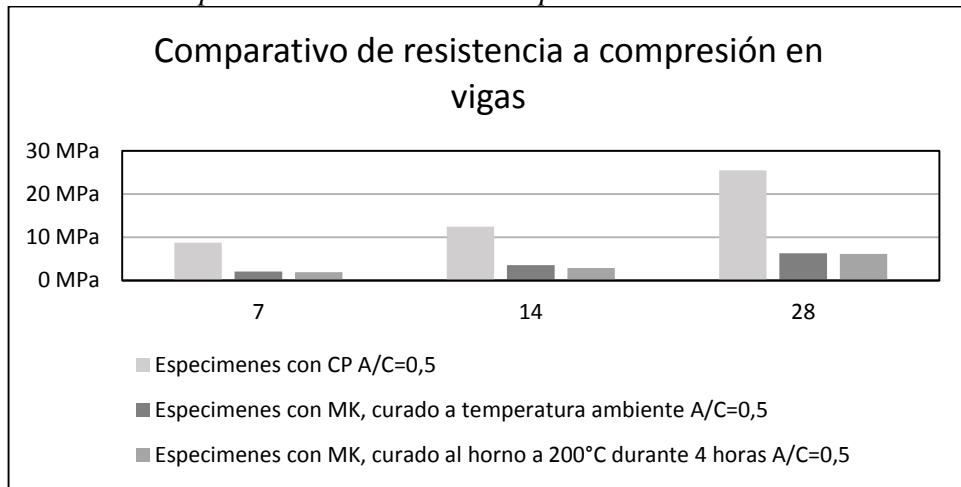
Tabla 21 Resistencia a compresión en cubos de mortero A/C=0,5

Resistencia a compresión en cubos de mortero			
Tiempo de Fraguado	7 días	14 días	28 días
Resistencia CC	8,80 MPa	12,48 MPa	25,48 MPa
Resistencia MK Temperatura ambiente	2,10 MPa	3,60 MPa	6,34 MPa
Resistencia MK 200°C durante 4 horas	1,97 MPa	2,88 MPa	6,15 MPa

Fuente: Autores.

Comparando los resultados en la Ilustración 26, podemos concluir que la muestra de mortero con MK que estuvo a temperatura ambiente en su proceso de curado, presenta mejor resistencia a la compresión que la muestra de mortero que fue llevada al horno, esto sucede porque a altas temperaturas se modifica la estructura química del material ocasionando pérdidas en las resistencias mecánicas del mismo. En comparación a la muestra de mortero con CC podemos concluir que se comporta de manera similar a los cilindros y vigas de concreto, con una resistencia que oscila entre el 22% y el 24% de la resistencia máxima alcanzada por las muestras de mortero con CC.

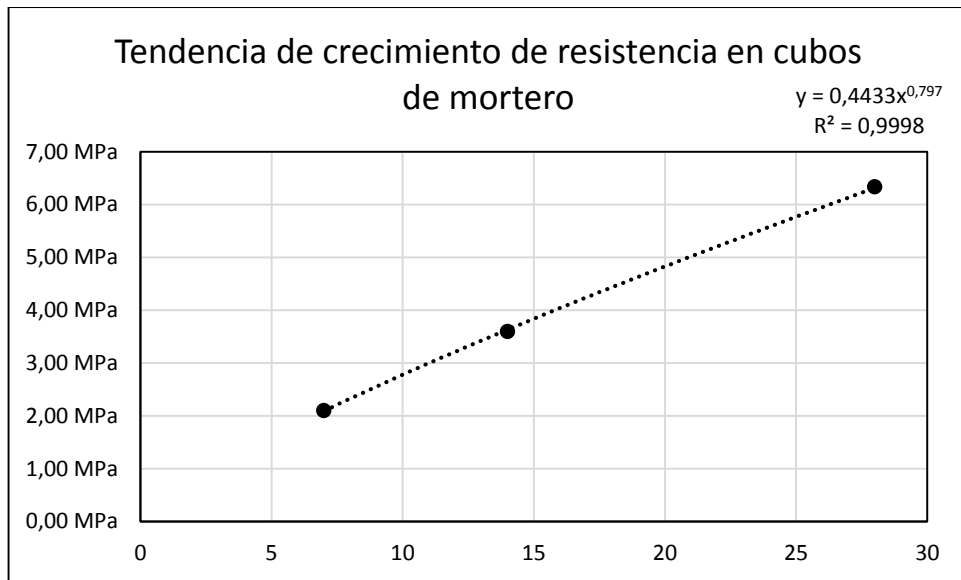
Ilustración 26 Comparativo resistencia a compresión en cubos de mortero A/C=0,5



Fuente: Autores.

Graficamos los resultados obtenidos en la Tabla 21, en especímenes de MK curados a temperatura ambiente con una relación A/C=0.5, como se muestra en la Ilustración 27, para calcular la tendencia de crecimiento de la resistencia a flexión vs el tiempo de curado. De la Ecuación 3 podemos determinar el tiempo de curado necesario para alcanzar una resistencia máxima igual a la obtenida en los especímenes de mortero con CC.

Ilustración 27 Tendencia de crecimiento de resistencia en cubos de mortero.



Fuente: Autores.

Ecuación 3 Tendencia de crecimiento de la resistencia a compresión en cubos de mortero

$$y = 0,4433x^{0,797}$$

Fuente: Autores.

Donde:

Y= Resistencia a la compresión en MPa.

X= Tiempo de curado en días.

Aplicando la Ecuación 3, se calcula que el tiempo de curado estimado para llegar a una resistencia a la flexión de 25.48 MPa en cubos de mortero de MK con una relación A/C=0,5 es de 162 días.

11.5. Análisis por la adición de CaO.

La diferencia de resistencia en relación a los ensayos realizados con el CC y el MK, es bastante significativa, químicamente uno de los factores que contribuyen a esta variación es la cal en sus diferentes formas como cal + óxido de silicio y cal + óxido de aluminio, pues dichos óxidos aportan características a la mezcla, pero también disminuyen otros factores.

Por un lado, la cal más oxido de silicio contribuye a la liberación de calor durante las primeras etapas de hidratación, en contraposición a ello, reduce la resistencia del material. Por otro lado, la cal más oxido de silicio, contribuye a una rápida hidratación, así como endurecimiento, mejorando las condiciones de resistencia temprana. En general, no contribuyen mucho a la resistencia del material, especialmente con el MK, en donde se evidencia una resistencia mucho menor para los ensayos, tanto en cilindros y vigas de concreto como en cubos de mortero.

Desde un punto de vista mecánico, el comportamiento del concreto con MK en relación al comportamiento del concreto con CC disminuye entre un 70% a un 80%, puesto que al agregar cal se forman cristales que ocasionan que la resistencia del concreto baje. Sin embargo, esta podría brindar mayores resistencias si se transforman los óxidos primarios que la componen en secundarios, haciéndolos reaccionar con materiales puzolánicos o escoria, como lo explica. P.C. Aïtcin (Convencional cement)

El asentamiento, el tiempo de fraguado y la porosidad del concreto, son unos de los factores determinantes en los ensayos de resistencia realizados. Al determinar que la resistencia en los concretos y morteros con MK es menor que la resistencia en los concretos y morteros con CC, podemos determinar que esto se debe precisamente a la relación A/C de las muestras, a los espacios de aire presentes al momento de realizar las fallas mecánicas y a la edad del concreto con el nuevo material cementante

Ahora al analizar la manejabilidad de la mezcla, esta es mayor cuando la cantidad de agua es mayor, sin embargo, al ser mayor, la resistencia del concreto y del mortero con MK se reduce. Esto se puede evidenciar en las pruebas realizadas pues la cantidad de agua varía en algunos de los ensayos con las relaciones A/C=0,5 y A/C=0,75, en donde la resistencia fue mayor para la relación A/C=0,5.

12. CONCLUSIONES.

Ya que el MK tiene una partícula más fina que el cemento, esto le proporciona una mayor capacidad de hidratación, por esta razón se observa porosidad en los especímenes de concreto realizados a partir del nuevo material cementante comparados con los especímenes de concreto del CC, dada esta característica, los concretos con MK requieren más agua, lo que cambiaría el diseño de mezcla e influiría en periodos de fraguado más prolongados que los ya parametrizados para el concreto con CC.

La caracterización del nuevo material cementante se realiza a partir de los resultados de su comportamiento mecánico, evaluando la resistencia a compresión en cilindros de concreto y cubos de mortero y la resistencia a flexión en vigas de concreto. En general, los especímenes de concreto y mortero con MK obtuvieron valores de resistencia a la flexión y a la compresión entre el 23% y el 25% de los resultados obtenidos con los especímenes de concreto y mortero de CC, a pesar de tener la misma ecuación química, esto se debe a las propiedades que desarrolla cada material (MK y CC) al ser mezclado con agua, se generan reacciones completamente diferentes llevándonos a estos resultados.

El silicato bicálcico es un componente que está presente en el MK en una menor proporción que en el CC, este componente tiene la cualidad de transferir calor y velocidad en el tiempo de hidratación que es lo que produce endurecimiento en el concreto, dada esta característica se puede concluir que al aumentar este compuesto en la mezcla se mejoran las propiedades de endurecimiento, pero como consecuencia se generan bajas resistencias en el concreto con MK a una edad temprana.

Basados en el estudio del comportamiento del concreto con mezcla de conglomerantes de cemento blanco y metacaolín realizado en la Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, podemos concluir que el MK es un material cementante suplementario y el comportamiento reactivo que genera su composición química puede ser utilizado para mejorar hasta un 20% las resistencia del concreto, siempre y cuando sea utilizado en una proporción con el cemento ya que al reemplazarlo en el 100% la mezcla tiene un comportamiento químico diferente y reacciona de manera negativa respecto a las propiedades mecánicas del concreto.

13. RECOMENDACIONES.

- Inicialmente se recomienda hacer un ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) para comparar las estructuras químicas del MK y del CC y determinar si en el nuevo material cementante están presentes todos los óxidos necesarios para que se presenten las reacciones químicas adecuadas en el proceso de curado del concreto y del mortero.
- También se recomienda hacer la caracterización completa del nuevo material cementante después de la adición de los óxidos, debido a que al agregarle la cantidad propuesta de óxidos se alteran las características naturales del material lo que hace que cambien sus propiedades físicas y claramente químicas.
- Debido a la densidad del nuevo material cementante, se recomienda realizar un análisis para la posible utilización de un aditivo que disminuya la carencia de agua presente en los concretos y morteros.
- Al obtener bajas resistencias en los concretos y morteros con MK y debido al comportamiento químico de este nuevo material, se recomienda realizar concretos con la adición de MK en un porcentaje inferior al 50% del CC, con el fin de mantener las propiedades químicas, físicas y mecánicas del concreto convencional.
- Para obtener mejores resultados se recomienda llevar a cabo un proceso industrializado controlado para cada proceso en el desarrollo de los nuevos concretos y morteros, además que sea acorde con la disponibilidad de los equipos de laboratorio.
- Por último se recomienda tener una mayor cantidad de especímenes de prueba para tener una menor dispersión en los resultados.

14. BIBLIOGRAFÍA

- Análisis comparativo de Caolines de Diferentes fuentes para la producción de metacaolín.* **Torres Janneth, de Gutierrez Ruby, Vizcayno Carmina. 2011.** 2011, Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, págs. 35-43.
- ASTMC. Especificación estándar para Ceniza volante de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en hormigón.*
- Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado.* **Janneth Torres Agredo, Ruby Mejía de Gutiérrez, Silvio Delvasto Arjona. 2011.** Bogotá : s.n., 2011.
- Effects of metakaolin and silica fume on properties of concrete.* **Ding, Jian-Tong y Li, Zongjin. 2002.** 2002, ACI Materials Journal, págs. 393-398.
- Flores, Jose. 2004.** Composición química del cemento. *Scribd.* [En línea] 2004. <https://es.scribd.com/document/148896675/24863679-Composicion-Quimica-Del-Cemento>.
- Geopolimeros sintetizados a partir de distitos materiales residuales.* **Villamor, Álvaro. 2016.** 2016.
- Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry.* **Komnistsas, Kostas y Zaharaki, Dimitra. 2007.** 2007, Minerals Engineering, págs. 1261-1277.
- In-operando hard X-ray photoelectron spectroscopy study on the resistive switching physics of HfO₂-based RRAM.* **Kot, Malgorzata. 2014.** 2014.
- Inorganic Polymers in New Materials.* **Davidovits, J. 1991.** 1991, Journal of Thermal Analysis, págs. 1633-1656.
- Janneth Torres-Agredo, Ruby Mejía-de-Gutiérrez, Silvio Delvasto-Arjona. 2011.** *Efecto del porcentaje de adición de metacaolín en las propiedades finales del concreto adicionado.* Bogotá : s.n., 2011.
- JOHANNA CAROLINA RUIZ ACERO, JOHN FREDY BERMUDEZ CUERVO. 2015.** *ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA LÍNEA DE INESTABILIDAD BAJO CONDICIONES.* Bogotá : s.n., 2015.
- Juan Camilo Restrepo Gutierrez, Oscar Jaime Restrepo Baena, Jorge Ivan Tobon. 2006.** *Efectos de la adición del metacaolín en cemento Convencional.* Medellín : s.n., 2006.
- Justice, Joy. 2005.** Evaluation of metakaolins for use as supplementary cementitious materials. 1 de Abirl de 2005, págs. 1-149.
- Mindess, Young y Darwin. 2003.** *Concrete.* Illinois : Pearson, 2003.
- Muñiz, María, Gasca, José y Manzano, Alejandro. 2011.** 2011, Ciencia y Desarrollo.

Noguera, Carolina Castañeda. 2011. *Efectos de la adición de metacaolín en la resistencia a la compresión y la permeabilidad de un concreto con diferente sistema de curado.* Bogotá : s.n., 2011.

P. Duxson A. Fernández, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, J. S. J. Van Deventer. 2006. *Geopolymer technology: the current state of the art.* 2006.

Pore size distribution of MK paste. **Khatib, J.M y Wild, S. 1996.** 1996, Cement And Concrete Research.

Pozzolanic properties of flash.calcined kaolinite: A comparative study with soak-cacined products. **Salvador, S. 1995.** 1995, Cement and Concrete Research, págs. 102-112.

Properties of Metakaolin. **Ambroise, Jean, Maximilien, Sandrine y Pera, Jean. 1994.** 1994, Blended Cements.

Propiedades y durabilidad del cemento con adición de metacaolín: mortero y hormigón. **Rafik Abbas, Salah A. Abo El Enein, El Sayed Ezzat. 2010.** Alexandria : s.n., 2010.

Siddique, Rafat. 2007. *Waste Materials and By-Products in Concrete.* s.l. : Springer, 2007. Vol. 1, ISBN-10: 354074293X.

Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de aluminosilicatos minerales. **Claudia Ivette Villa García, 2013. 2013.** 2013, Centro de investigación en Materiales avanzados.

T. W. Cheng, J. P. Chiu. 2003. *Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag.* Taiwan : s.n., 2003.

Teoriadelaconstruccion.net. 2012. 2012.

Thermal evolution of metakaolin geopolymers. **Duxson, Peter, Lukey, Grant y van Deventer, Jannie. 2006.** 2006, Journal of Non Crystalline Solids.

Universidad de Educación a Distancia. www.uned.es. *Universidad de Educación a Distancia.* [En línea] [Citado el: 25 de Octubre de 2018.] https://www2.uned.es/cristamine/cristal/drx_intr.htm.

Universidad Nacional de Colombia. 2015. 2015.

UPTC. 2017. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. [En línea] 01 de Julio de 2017. http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia5.

Use of Raw or Processed Natural Pozzolans. **ACI Committee 232. 2000.** 2000. págs. 1-24.

Villaquirán Caicedo Mónica Alejandra, Rodríguez Erich David, Mejía De Gutiérrez Ruby. 2013. *Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas.* Cali : s.n., 2013.

Zhu Pan, Jay G. Sanjayan, B. Vijay Rangan. 2011. *Geopolymer and Conventional cement concretes in simulated fire*. 2011.

15. ANEXOS.

Se anexan los formatos de laboratorio en donde se evidencian los resultados de los ensayos realizados a cada muestra.

Formatos de laboratorio de muestras en cilindros de concreto

Formatos de laboratorio de muestras en vigas de concreto

Formatos de laboratorio de muestras en cubos de mortero