



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN, TENSIÓN Y
DURABILIDAD, EN MORTEROS ELABORADOS CON GEOPOLIMEROS
SINTETIZADOS A PARTIR DE METACAOLIN**

**JULIAN DAVID BONILLA AGUDELO
SINDY PAOLA NIÑO SOTELO**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE ING. CIVIL
BOGOTA, D.C**

2017



**ESTUDIO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN, TENSIÓN Y
DURABILIDAD, EN MORTEROS ELABORADOS CON GEOPOLIMEROS
SINTETIZADOS A PARTIR DE METACAOLIN**

JULIAN DAVID BONILLA AGUDELO

SINDY PAOLA NIÑO SOTELO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil.**

**Ing. Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres
Asesor disciplinar**

**Lic. Roy Waldhiersen Morales Pérez
Asesor metodológico**

UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA

FACULTAD DE ING. CIVIL

BOGOTA, D.C

2017



*A Dios, quien siempre ha sido fiel
y me ha brindado todos los conocimientos,
recursos y experiencias aprendidas.*

*A mis padres Vicente y Blanca quienes
siempre han sido mi mayor ejemplo de vida,
mi mayor orgullo y han brindado
sus mejores años a forjarme con rectitud.*

*A mis hermanos Paula y Oscar
quienes me han apoyado en este
proceso de aprendizaje para siempre
aprender más y sacar provecho de
las oportunidades que Dios nos brinda.*

*A mi novia Laura, quien me ha brindado
su apoyo incondicional en los momentos
más difíciles, siempre me ha impulsado
a buscar y dar más de lo que tengo y
seguir mis sueños.*

Julián David Bonilla



Dedico este trabajo a mis padres José y Edilma, agradeciéndoles por darme todo de sí, su apoyo, su amor y su sabiduría para formarme como una persona íntegra y llena de valores.

A mi hermano por darme sus sonrisas, ocurrencias y permitirme darle mis mejores consejos y enseñanzas.

A toda mi familia Sotelo por darme las enseñanzas más grandes, por ser un apoyo constante, por ser mi orgullo y por ser mi alegría. Al abuelito que desde el cielo me da toda su sabiduría y protección.

A mi compañero de vida, quien siempre me ha apoyado en el camino de realización de este trabajo brindándome sus conocimientos, sus consejos, su apoyo incondicional y su infinita alegría.

Y a Dios por ser mi guía, mi tranquilidad y mi fortaleza.

Sindy Paola Niño Sotelo

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Arnold Gutiérrez quien desde el inicio del proyecto siempre nos brindó sus conocimientos buscando formar un interés por la innovación e investigación, siempre acompañado de la rectitud y disciplina que lo caracteriza, pero que indudablemente fueron los más valiosos para no desfallecer en este proceso.

Al licenciado Roy Morales quien siempre creyó en este proyecto y siempre nos recibió con una sonrisa, unas palabras de aliento y con su apoyo incondicional cuando las cosas no se veían tan claras.

Agradecemos a José Santos de KAOLINK S.A.S por su colaboración prestada con la materia prima para el desarrollo de esta investigación.

A los laboratoristas Oscar Camelo, José Luis Rozo y Martin Viatela, quienes nos brindaron su ayuda desinteresada para llevar a cabo las labores necesarias en este proyecto.

A Julio Cesar Botia laboratorista de hidráulica de la Universidad Nacional, quien nos permitió y nos brindó su colaboración cuando existieron inconvenientes en los laboratorios.

A la Universidad La Gran Colombia, y los ingenieros que impartieron los conocimientos necesarios para formarnos como ingenieros civiles.

TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN	12
2.GENERALIDADES.....	14
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
3.1 PREGUNTA PROBLEMA:.....	16
4. ANTECEDENTES.....	17
5. JUSTIFICACIÓN	20
6. OBJETIVOS	22
6.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
7. HIPÓTESIS.....	23
8. MARCO REFERENCIAL	24
8.1. MARCO CONCEPTUAL	24
8.1.1. Cemento	24
8.1.2. Puzolana.....	24
8.1.2.1 Puzolanas naturales.....	25
8.1.2.2 Puzolanas Artificiales	25
8.1.3 Metacaolin	25
8.1.4 Mortero	26
8.1.4.1 Mortero Hidráulico	26
8.1.4.2 Mortero Calcáreo.....	26
8.1.5. Propiedades del mortero.....	26
8.1.5.1. Manejabilidad	26
8.1.5.2. Retención de agua	27
8.1.5.3. Velocidad de endurecimiento	27
8.1.5.4. Retracción	27
8.1.5.5. Adherencia	27
8.1.5.6. Durabilidad	27
8.1.5.7. Resistencia.....	28
8.2. MARCO LEGAL.....	31
9. DISEÑO METODOLÓGICO	33
9.1. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	33

9.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	33
9.3. FASES DE INVESTIGACIÓN	34
10. RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
10.1. FASE 1 - DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA.....	37
10.1.1 Caracterización de la materia prima	37
10.1.1.1 Base cementante	37
10.1.1.2 Agregado.....	41
10.1.1.3. Soluciones químicas activantes	45
10.1.1.3.1. Hidróxido de Sodio	45
10.1.1.3.2. Silicato de Sodio	47
10.1.2. Determinación de variables de la matriz cementante	48
10.1.2.1. Determinación de variables de la matriz cementante con solución activante de NaOH:.....	49
10.1.2.2. Determinación de variables de matriz cementante con solución activante de Na ₂ SiO ₃ :.....	50
10.2. FASE 2 - ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, LA RESISTENCIA A TENSIÓN Y LA DURABILIDAD	51
10.2.1. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA	51
10.2.1.1. Activación con hidróxido de sodio	52
10.2.1.2. Activación con silicato de sodio.....	54
10.2.3. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE RESISTENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDAD A MEZCLA ÓPTIMA.....	56
10.2.3.1 Mortero activado con hidróxido de sodio.....	56
10.2.3.1.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica	57
10.2.3.1.2 Resultados de evaluación de durabilidad	61
10.2.3.2 Mortero activado con silicato de sodio	64
10.2.3.2.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica	64
10.2.3.2.2 Resultados de evaluación de durabilidad	69
10.2.3.3. Mortero convencional a base de Cemento Portland y agua.....	74
10.2.3.3.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica	75
10.2.3.4. Comparación de resultados de resistencia mecánica de muestras de mortero activadas alcalinamente y mortero convencional.....	78
10.2.3.4.1 Comparación resultados de resistencia mecánica a compresión	79
10.2.3.4.1 Comparación resultados de resistencia mecánica a tensión ..	80



10.3 FASE 3 - ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA EL USO DEL MORTERO OBTENIDO	81
10.3.1. Ficha técnica de mortero a base de Metacaolín activado con hidróxido de sodio	81
10.3.2. Ficha técnica de mortero a base de Metacaolín activado con silicato de sodio	82
10.3.3. Análisis de aplicaciones del mortero obtenido en diferentes escenarios civiles y arquitectónicos	83
10.3.4. Presentación de costos de las mezclas obtenidas a base metacaolín y su comparación con muestras de mortero convencional.	83
11.CONCLUSIONES	86
12.RECOMENDACIONES.....	88
13.BIBLIOGRAFÍA	89

Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de trabajo de la Fase 1.....	35
Figura 2. Diagrama de trabajo de la Fase 2.....	36
Figura 3. Muestra de metacaolín.	37
Figura 4. Frasco de L'Chatlier.....	41
Figura 5. Muestra del agregado.	41
Figura 6. Materia prima, arena de río	42
Figura 7. Tamices utilizados en ensayo granulométrico.....	44
Figura 8. Densidad de agregado fino.....	45
Figura 9. Solución de Hidróxido de Sodio.....	45
Figura 10. Preparación de la solución alcalina.....	46
Figura 11. Solución de Silicato de Sodio.....	47
Figura 12. Preparación de la solución alcalina.....	48
Figura 13. Muestras de mortero a base de MK activado con hidróxido de sodio.....	56
Figura 14. Prueba de resistencia mecánica a compresión – NaOH.....	57
Figura 15. Prueba de resistencia mecánica a tensión – NaOH.....	58
Figura 16. Muestras sometidas a 85 °C activadas con NaOH.....	60
Figura 17. Muestras de mortero a base de MK activado con silicato de sodio.....	64
Figura 18. Prueba de resistencia mecánica a compresión - Na ₂ SiO ₃	65
Figura 19. Prueba de resistencia mecánica a tensión - Na ₂ SiO ₃	66
Figura 20. Muestras sometidas a 85 °C activadas con Na ₂ SiO ₃	68
Figura 21. Ensayo de mesa de flujo.....	72
Figura 22. Ensayo de absorción.....	73
Figura 23. Muestras de mortero convencional a base de Cemento Portland y agua.....	74
Figura 24. Prueba de resistencia mecánica a compresión – Mortero convencional.....	75
Figura 25. Probetas de resistencia mecánica a tensión – Mortero convencional.....	77

Lista de gráficas

Gráfica 1. Difractograma de amorfidad.....	39
Gráfica 2. Análisis cuantitativo por el Método de Rietveld – Fases cristalinas.....	40
Gráfica 3. Carga Vs. Relación NaOH / MK a 7 M, 9 M, 11 M.....	53
Gráfica 4. Esfuerzo Vs. Relación NaOH / MK a 7 M, 9 M, 11 M.....	53
Gráfica 5. Carga Vs. Relación Na ₂ SiO ₃ / MK a 5M – 11M.....	55
Gráfica 6. Esfuerzo Vs. Relación Na ₂ SiO ₃ / MK a 7 M, 9 M, 11 M.....	55
Gráfica 7. Resistencia mecánica a compresión – NaOH.....	58
Gráfica 8. Resistencia mecánica a tensión – NaOH.....	59
Gráfica 9. Influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión.....	61
Gráfica 10. Sortividad a muestras de mortero activadas con NaOH.....	63
Gráfica 11. Resistencia mecánica a compresión - Na ₂ SiO ₃	66
Gráfica 12. Resistencia mecánica a tensión - Na ₂ SiO ₃	67
Gráfica 13. Influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión...	69
Gráfica 14. Sortividad a muestras de mortero activadas con Na ₂ SiO ₃	71
Gráfica 15. Resistencia mecánica a compresión – Mortero convencional.....	76
Gráfica 16. Resistencia mecánica a tensión – Mortero convencional.....	78
Gráfica 17. Gráfico comparativo de resistencia mecánica a compresión.....	79
Gráfica 18. Gráfico comparativo de resistencia mecánica a tensión.....	80

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de los morteros según resistencia a la compresión a 28 días y según dosificación.....	29
Tabla 2. Usos de los morteros de cemento.....	30
Tabla 3. Reporte de fluorescencia de rayos X.....	38
Tabla 4. Granulometría realizada al agregado.....	43
Tabla 5. Gravedad específica del agregado (Gs).....	44
Tabla 6. Matriz de Hidróxido de Sodio con diferentes molaridades.....	46
Tabla 7. Matriz de Silicato de Sodio con diferentes molaridades.....	47
Tabla 8. Contenido de Mk, agregado y NaOH.....	49
Tabla 9. Contenido de Mk, agregado y Na ₂ SiO ₃	50
Tabla 10. Resultados carga y esfuerzo NaOH, mezcla óptima.....	52
Tabla 11. Resultados carga y esfuerzo Na ₂ SiO ₃ , mezcla óptima.....	54
Tabla 12. Resultados de resistencia mecánica a compresión – NaOH.....	57
Tabla 13. Resistencia mecánica a tensión – NaOH.....	59
Tabla 14. Influencia de la humedad en la resistencia a compresión – NaOH.....	60
Tabla 15. Sortividad en mezclas activadas con NaOH.....	62
Tabla 16. Resultados de resistencia mecánica a compresión – Na ₂ SiO ₃	65
Tabla 17. Resistencia mecánica a tensión - Na ₂ SiO ₃	67
Tabla 18. Influencia de la humedad en la resistencia a compresión – Na ₂ SiO ₃	68
Tabla 19. Sortividad en mezcla de activado con silicato de sodio.....	70
Tabla 20. Fluidéz de mezcla de mortero a base MK.....	72
Tabla 21. Absorción de mezcla de mortero a base MK.....	73
Tabla 22. Resultados de resistencia mecánica a compresión - Mortero convencional.....	76
Tabla 23. Prueba de resistencia mecánica a tensión (Mortero convencional).....	77
Tabla 24. Tabla comparativa de resistencia mecánica a compresión.....	79
Tabla 25. Tabla comparativa de resistencia mecánica a tensión.....	80
Tabla 26. Ficha técnica de mortero a base de MK activado con NaOH.....	81
Tabla 27. Ficha técnica de mortero a base de MK activado con Na ₂ SiO ₃	82
Tabla 28. Análisis de precios unitarios.....	84

1.INTRODUCCIÓN

En el mundo el cemento Portland es uno de los materiales más utilizados en la construcción y su producción mundial anualmente alcanza las dos mil quinientas millones de toneladas. Sin embargo, por cada kilogramo de cemento se emite aproximadamente un kilogramo de dióxido de carbono lo que lo convierte en la segunda fuente emisora de éste gas de efecto invernadero. A nivel nacional, producir cemento Portland origina casi un cinco por ciento de la contaminación por dióxido de carbono, esto reflejado en que a finales del 2015 el despacho en este mercado aumentó en un 8,6% llegando casi a las doce mil quinientas toneladas, incrementando un 9,3% respecto al año 2014.¹

Por tal razón, la búsqueda de materiales que sustituyan completa o parcialmente el uso de cemento Portland en mezclas de morteros, concretos y hormigones, ha tenido un auge en los últimos años, así por ejemplo, se ha buscado aprovechar residuos industriales que al utilizarse como agentes cementantes disminuyen la contaminación ambiental y evitan el uso de emisiones de CO₂ a la atmosfera en casi un 85% comparado con el cemento Portland.

Entre los residuos industriales que contienen características aglutinantes, estructura cristalina, reacción puzolánica o hidráulica y micro tamaño de partícula se encuentran los geopolímeros. Estos polímeros inorgánicos, están constituidos por aluminosilicatos activados alcalinamente que se obtienen por medio de una reacción geosintética.

Teniendo en cuenta lo anterior, en la presente investigación se empleó metacaolín, el cual es un material silico-aluminoso amorfo que se obtiene al calcinar una arcilla llamada caolín a temperaturas de 500-800 °C, el cual fue utilizado como sustitución total del cemento Portland en una mezcla de mortero, tras activación alcalina con solución química de hidróxido de sodio y silicato de sodio.

¹ GARCIA Lodeiro, A. PALOMO, A. FERNÁNDEZ JIMÉNEZ. "Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes." Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Spain

A los geopolímeros así sintetizados, les fueron analizados su comportamiento mecánico de resistencia a compresión y tensión, así como la durabilidad por medio de ensayos de sortividad y absorción de agua.

Finalmente, luego de realizado el análisis de las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero en análisis, se evaluó las posibilidades de uso en diferentes escenarios de aplicación y su comparación de costos frente a mezclas de mortero convencionales usando cemento Portland.

2.GENERALIDADES

El siguiente es un estudio de la resistencia mecánica a compresión, tensión y la durabilidad, en morteros elaborados con geopolimeros sintetizados a partir de metacaolín.

LINEA DE INVESTIGACIÓN: Estructuras

SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN: Materiales de construcción

SEMILLERO: UGCE - Estructuras

NOMBRE DEL INVESTIGADOR: Julian David Bonilla Agudelo

Sindy Paola Niño Sotelo

NOMBRE DE LOS ASESORES: I.C. Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres

Lic. Roy Waldhiersen Morales Pérez

LUGAR EN DONDE SE REALIZA EL PROYECTO

Facultad de Ingeniería civil, Universidad La Gran Colombia, Bogotá D.C.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El cemento Portland es uno de los materiales más ampliamente utilizados en el mundo, se utilizan alrededor de 2,500 millones de toneladas al año. En su producción por cada kilogramo de cemento Portland (CP) se emite aproximadamente un kilogramo de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera por descarbonatación de la materia prima (CaCO_3) y por el uso de energía que va ocurriendo en las diferentes etapas de proceso, desde el manejo, almacenamiento de los materiales, molienda, hasta las emisiones durante el enfriamiento del horno y la escoria. Esto demuestra que es un modelo de producción insostenible y con altos impactos en todos los ámbitos al medio de extracción y producción.²

La contribución que genera a la destrucción de la capa de ozono con gases como el dióxido de carbono provenientes de la producción de Clinker para el CP, ha sido tema de discusión en los últimos años, por lo que diversas investigaciones están siendo enfocadas a la búsqueda de un cemento que tenga características físicas, químicas y mecánicas ideales, teniendo en cuenta que sea de menor costo y que adicionalmente y como factor más importante sea un cemento amigable con el ambiente.

Ante la urgencia de encontrar un cemento con las características mencionadas, que ayude a disminuir las emisiones de gases de CO_2 y que atienda los requerimientos constructivos de estructuras modernas con excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad, es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos, como lo son los cementos alcalinos, los cuales se basan en la sustitución total del cemento por precursores minerales; estos a su vez, se clasifican en dos grandes grupos: los cementos de escoria activada alcalinamente y los geopolímeros.

Los geopolímeros se obtienen a partir de la activación alcalina de minerales naturales ricos en Silicio y Aluminio, desechos o subproductos industriales para generar un producto con características cerámicas que presentan ventajas a nivel ambiental y con propiedades similares y en algunos casos superiores frente a materiales tradicionales. Materiales puzolánicos como el humo de sílice (HS) y las cenizas volantes (CV) son componentes esenciales del *hormigón de altas prestaciones* (tipo de hormigón que reúne diversas cualidades que mejoran su

² GARCIA Lodeiro, A. PALOMO, A. FERNÁNDEZ JIMÉNEZ. "Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes." Instituto Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), Madrid, Spain

comportamiento en diferentes facetas con respecto a un hormigón tradicional). Cuando se emplean como aditivos minerales en el hormigón de altas prestaciones, pueden mejorar la resistencia y la durabilidad de dicho material. En los últimos años ha crecido el interés por el uso de metacaolín (MK) como adición mineral con este fin. Se han publicado monografías amplias sobre el uso del metacaolín como sustituto puzolánico parcial del cemento y, su efecto sobre las propiedades de morteros y hormigones. El metacaolín es un material silicoaluminoso que se obtiene mediante la calcinación a 650-800 °C de una arcilla llamada caolín. El metacaolín de alta reactividad, un mineral puzolánico sintético, reacciona de forma muy vigorosa con el hidróxido cálcico, lo que mejora de forma significativa las prestaciones del cemento. Esta sustancia ha demostrado ser una alternativa adecuada al humo de sílice en la formulación de hormigones de alta resistencia o de altas prestaciones. Se ha observado que el metacaolín de alta reactividad producía resultados mejores incluso que el humo de sílice y mejoraba las propiedades del hormigón a la vez que garantizaba una buena trabajabilidad.³

3.1 PREGUNTA PROBLEMA:

¿Cuál es el comportamiento de la resistencia mecánica a compresión, tensión y la durabilidad de morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir de metacaolín?

³ JUSTICE, J. M.; Kennison, L. H.; Mohr, B. J.; Beckwith, S. L.; McCormick, L. E.; Wiggins, B.; Zhang, K. Z. Z.; Kurtis, E.: "Comparison of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials". SP-228, ACI, Farmington Hills, Mich. (2005), pp. 213-236

4. ANTECEDENTES

Cuando el metacaolín (MK) es utilizado como adición al CP, mediante la hidratación del cemento con agua H_2O , el MK reacciona con el hidróxido de calcio libre $Ca(OH)_2$ formando silicato bicálcico (C_2S) secundario, que posteriormente forma un gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) tobermorita y el silicoaluminato bicálcico hidratado ($Ca_2Al_2SiO_7$) gehlenita, las cuales proveen las propiedades cementantes a la mezcla⁴. Mientras que cuando el MK es utilizado como reemplazo total del CP, es necesario realizar su activación alcalinamente, principalmente con mezclas alcalinas de molaridad alta, $Na(OH)$ para temperaturas menores a $30\text{ }^\circ\text{C}$, y SiO_2/Al_2O_3 con relación molar de 3.8 para mayores a $30\text{ }^\circ\text{C}$ ⁵. Y estos a su vez produciendo gel de silicoaluminato sódico (N-A-S-H), que posee una nano estructura tridimensional muy similar a la que poseen las zeolitas. Este gel es el principal responsable del buen comportamiento mecánico del material.⁶

En general se ha reportado que la adición de MK mejora las propiedades de morteros y concretos de CP puro, tales como la resistencia mecánica, impermeabilidad, durabilidad química, etc.⁷ Esto se atribuye al efecto de reductor de porosidad (efecto rellenador ó “filler effect”), que acelera las reacciones de hidratación del CP y a la reacción puzolánica. Se ha reportado que el uso de MK favorece el control de reacción expansiva sílice-álcali, una importante patología de concreto a nivel mundial.⁸

⁴ J. Moya. “Últimos avances sobre el tratamiento térmico del caolín: Formación o no de puzolanas artificiales”. Madrid: Memorias Congreso Puzolanas Naturales, Cenizas Volantes y Similares en la Construcción, Cemento y Hormigón, 1998, pp. 71-75.

⁵De Silva y Sagoe-Crentsil K.:”The effect of Al_2O_3 and SiO_2 on setting and hardening of $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$, geopolymer system”, J Aust Ceram Society. 2008. 41, pp 39-46.

⁶ M. Monzó, A. Fernández-Jiménez, M. Vicent, A. Palomo, A. Barba.:” Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado”. Sociedad Española de cerámica y vidrio. Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 47, pp 1, 35-43 (2008)

⁷ Jones T.R. Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete. Structure & Performance of cements, Ed. Bensted J and Barnes P, Spon Press; Chapter fifteen, 2001, pag. 372-390

⁸ J. Iván Escalante, A. Navarro, L.Y. Gómez. “Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza”. México, revista ALCONPAT Volumen 1, Número 2, Mayo-Agosto 2011, Páginas 156 - 169

Cuando se substituye el CP en morteros por metacaolín de baja pureza, la temperatura de calcinación de 750°C es adecuada, con un nivel de reemplazo del CP de alrededor del 30%. Morteros con 40%-50% de MK desarrollaron resistencia lentamente en los primeros 14 días, sin embargo a largo plazo igualaron las resistencias de los morteros de CP puro. La presencia de MK redujo la microporosidad de la matriz de reactivos, después de 14 días la resistencia del mortero se favorece por la reacción puzolánica. Siendo posible utilizar minerales de caolín de baja calidad para producir materiales de bajo costo e impacto ecológico.⁹

Cuando se evalúa el efecto de la sustitución parcial de cemento portland por metacaolín (MK) y ceniza de cascarilla de arroz (RHA) sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad de mezclas de concretos. Para ello, se utilizaron dos tipos de RHA, el primero obtenido mediante un tratamiento térmico de la cascarilla de arroz (TRHA) y el segundo a través de un proceso termoquímico (ChRHA). MK fue producido por tratamiento térmico a 700 ° C durante dos horas de un caolín Colombiano. Se evalúan la resistencia a la compresión y la durabilidad de los concretos; que incluye la absorción de agua, la penetración de iones cloruro, la carbonatación y la resistencia a los sulfatos. Como materiales de referencia se utilizaron un concreto sin adición y humo de sílice (SF). Los resultados en general indican un efecto positivo en las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones, lo que demuestra la viabilidad de la utilización en ingeniería de estas adiciones como materiales cementantes suplementarios, lo cual contribuye positivamente a la sostenibilidad del medio ambiente.¹⁰

De acuerdo a los resultados de muchas investigaciones es necesario dar un punto de partida para investigar acerca de una mezcla la cual este compuesta únicamente por MK, debido a que las presentes siempre utilizan este como una adición al CP, o como un reemplazo de una proporción de CP con el fin de mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad.

Sacando provecho de los resultados de las investigaciones mencionadas y otras con resultados de gran interés para la investigación, se inicia un punto de comparación teórico-práctico para dar comienzo a la búsqueda de una mezcla

⁹ Ibid, 8

¹⁰ A. Salas, J. Torres, R. Mejía de Gutiérrez, S. Delvasto. "Engineering properties of blended concrete with Colombian rice husk ash and metakaolin." Universidad del Valle, Colombia. Revista Ingeniería y Competitividad, Volumen 15, No. 2, p. 225 - 235 (2013)



cementante que reemplace al CP con MK en su totalidad con el fin de buscar un uso de acuerdo a sus propiedades mecánicas y de durabilidad, que plantee una opción diferente al CP en la elaboración de mezclas cementantes y productos derivados de dicho material.

5. JUSTIFICACIÓN

En el proceso de producción del cemento son utilizados una gran cantidad de recursos naturales no renovables, indispensables para determinar las características puzolánicas del cemento, debido a sus propiedades físico-químicas. La construcción se ha convertido en una de las industrias que más contamina el ambiente, pues con la obtención del Clinker, compuesto esencial en la producción del cemento, se liberan a la atmosfera toneladas de CO₂ contaminando y destruyendo de esta forma la capa de ozono.

El fuerte impacto ambiental que genera la fabricación de cemento y el elevado costo de dicho proceso, dan lugar a la búsqueda de materiales alternativos que lo sustituyan completamente. Como materiales alternativos se encuentran los polímeros inorgánicos que obtenidos a partir de la activación alcalina de un aluminosilicato, presentan ventajas al utilizarse como agente cementante aprovechando de esta manera residuos de la industria y disminuyendo la contaminación del medio ambiente.

Estos polímeros inorgánicos, también conocidos como geopolímeros, son materiales de gran interés en el campo de la construcción ya que además de su impacto favorable con el ambiente, pueden llegar a mejorar la trabajabilidad, las propiedades mecánicas y la durabilidad de mezclas comparadas con el cemento. Los geopolímeros presentan reactividad puzolánica, reactividad hidráulica latente o una combinación de ambas. Las puzolanas pueden ser naturales o de origen industrial. Por esta razón y analizando varios de estos materiales, el metacaolín es un material cementante que ni es un subproducto industrial ni existe de forma natural, sino que se obtiene mediante el tratamiento térmico del caolín, un mineral que existe en la naturaleza. Se fabrica específicamente para mezclas cementantes de composición variable.

El metacaolín (MK) es un material silico-aluminoso amorfo que se obtiene al calcinar una arcilla llamada caolín a temperaturas de (500-800°C)¹¹. Debido a las amplias investigaciones realizadas en las que se resalta su composición, cualidades y características químicas y reactividad; las cuales lo clasifican como una puzolana artificial óptima para el reemplazo o adición del cemento en la

¹¹ SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J.: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", Cement and Concrete Composites, vol. 23 (2001), pp. 441-454.

producción de morteros y concretos, que debido a su contribución en las propiedades mecánicas y de durabilidad tiene menor porosidad que el cemento¹².

Davidovits (2011) presenta mezclas de geopolímeros basados en MK con $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 3.5-4$ y $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2 = 0.25-0.28$ como molar general (Liew et al., 2011) (De activador + precursor). Mohsen y Mostafa (2010), que usaron caolín calcinado, midieron las resistencias a la compresión de 20MPa a temperatura ambiente (curado durante 3 días) y alrededor de 28MPa a 75 ° C (curado durante 1 día) cuando se usa NaOH solamente mientras que para silicato sódico la resistencia para el equivalente Las condiciones de curado fue de hasta 60 y 70MPa.

Para comprobar el uso adecuado del metacaolín en mezclas para morteros es necesario realizar pruebas que permitan identificar y comparar con valores que son patrón de mezclas a base de cemento Portland; evaluando de esta forma las propiedades mecánicas y la durabilidad.

Debido a lo anterior en este trabajo se indaga en torno a una mezcla cementante que reemplace al cemento Portland con metacaolín en su totalidad, con el fin de buscar un uso de acuerdo a sus propiedades mecánicas y de durabilidad planteando una opción diferente en la elaboración de mezclas cementantes y productos derivados de dicho material.

¹² MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R; DELVASTO, S y TALERO, R. "Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones". Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. *Materiales de Construcción*, 50(259) (2000): pp 5-12.

6. OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento de la resistencia mecánica a la compresión, la tensión y la permeabilidad de morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir del metacaolín

6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener experimentalmente la matriz de mezclas óptimas para la elaboración de morteros por medio de sustancias activantes de Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio.
2. Analizar el comportamiento de la resistencia a compresión y tensión de morteros elaborados con geopolímeros a edades de 7, 14 y 28 días.
3. Analizar el comportamiento de permeabilidad mediante el ensayo de sortividad a determinados intervalos de tiempo.
4. Evaluar el posible uso del mortero obtenido en diferentes escenarios de aplicación teniendo en cuenta sus propiedades en estado fresco y endurecido, especificaciones y condiciones.

7. HIPÓTESIS

Por investigaciones analizadas previamente donde los resultados en general indican un efecto positivo en las propiedades mecánicas y durabilidad de morteros con adición de metacaolín, no como reemplazo total del porcentaje de cemento en la mezcla, indican la viabilidad de usarlo como material cementante suplementario.

La adición de metacaolín al mortero hasta el 20% aumenta ligeramente la resistencia a la compresión en comparación con una mezcla de referencia, y mejora en gran medida su rendimiento en durabilidad. Los resultados obtenidos sugieren que los materiales puzolánicos se pueden utilizar para sustituir el cemento Portland, a fin de producir hormigones de alto rendimiento sin alteración de las propiedades mecánicas del hormigón.

Por tal razón en esta investigación al reemplazar en un cien por ciento el cemento Portland por metacaolín, aumentando la concentración del activante alcalino y tomando una relación de material cementante-arena de 1:3 y sometiendo la muestra a altas temperaturas, aumentará proporcionalmente la resistencia a compresión y tensión del mortero, que además por la microestructura conformada su permeabilidad será mejor comparada con mezclas a base de cemento Portland.

8. MARCO REFERENCIAL

8.1. MARCO CONCEPTUAL

El cemento como mezcla de uso universal posee ciertos elementos y características que lo hacen singular frente a una gran variedad de materiales presentes en la naturaleza y entre los elaborados a través de procedimientos industriales simples o complejos. Por ello se describirán detallada y conceptualmente los principales elementos de la investigación.

8.1.1. Cemento

Según el instituto español del cemento IECA el cemento: “Es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.”¹³ Adicionalmente a la definición mencionada también existen cementos que no utilizan el agua para formar una mezcla conglomerante endurecida, sino materiales alcalinos que le proveen propiedades similares a la mezcla.

8.1.2. Puzolana

Es un material compuesto principalmente por Sílice y Aluminio, que al ser combinado térmicamente con cal y mezclados con una solución que inicie el proceso químico de hidratación brindando propiedades cementantes a un material conglomerante.¹⁴ Las puzolanas son clasificadas de acuerdo a su origen, forma, composición química y mineralógica. Estas son divididas en puzolanas naturales y puzolanas artificiales.

¹³ INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES. Componentes y propiedades del cemento. (En Línea). España. [citado 24 de Oct., 2015] Disponible en: https://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179

¹⁴ SALAZAR JARAMILLO A. ¿Qué es una puzolana? ECOINGENIERIA S.A.S. (En Línea). Colombia. 2015. [citado 24 de Oct., 2015] Disponible en: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

8.1.2.1 Puzolanas naturales

Estas puzolanas son clasificadas dependiendo de su origen, siendo mineral a las que provienen de cenizas volcánicas con reactividad, y puzolanas orgánicas con alto contenido de sílice y de estructura imperfecta o amorfa, los cuales dan propiedades cementantes al material conglomerante.¹⁵

8.1.2.2 Puzolanas Artificiales

Estas puzolanas son subproductos de procesos térmicos e industriales de materiales con alto contenido de silicato, a estos productos también son añadidos los desechos entre ellos principalmente la ceniza volante, el humo de sílice, entre otros.¹⁶

8.1.3 Metacaolin

El Metacaolin es un material silico-aluminoso amorfo que se obtiene al calcinar una arcilla llamada caolín a temperaturas de (500-800) °C¹⁷. La calcinación de caolín le proporciona al metacaolin propiedades puzolanicas. El metacaolin puede reaccionar con cemento. Cuando el caolín se lleva a temperaturas de 900°C o superiores es modificado y pierde sus propiedades cementantes, llamado Mullita o Porcelanita.¹⁸ Gracias a las amplias investigaciones realizadas en las cuales son resaltadas su composición, cualidades y características debido a su composición química y reactividad las cuales lo clasifican como una puzolana artificial óptima para el reemplazo o adición del cemento en la producción de morteros y

¹⁵ ALVAREZ MANTILLA H. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Trabajo de Grado. Geólogo. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica: 2010. p34.

¹⁶ IBID. P35-36

¹⁷ SABIR, B. B.; WILD, S.; BAJ, J.: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", Cement and Concrete Composites, vol. 23 (2001), p. 441-454.

¹⁸ BEZARD D. general description of metakaolin (En Línea). Austria. [citado 24 de Oct., 2015] Disponible en: <http://www.metakaolin.info/general-description.html>

concretos, debido a su contribución en las propiedades mecánicas y de durabilidad tenido menor porosidad que el cemento¹⁹.

8.1.4 Mortero

Mezcla plástica de una material aglutinante de propiedades puzolanicas con un material de relleno de carácter árido como las arenas, y una sustancia que active la propiedad aglutinante y le genere una propiedad cementante a la mezcla con propiedades físicas, y mecánicas capaces de resistir carga. Es utilizado para pegar elementos no estructurales y en detalles de acabado en la construcción²⁰. Existen varios tipos de mortero dependiendo de sus componentes:

8.1.4.1 Mortero Hidráulico

Este mortero es elaborado a partir de cemento hidráulico, siendo el cemento portland el más utilizado en la actualidad. Estos endurecen de acuerdo a la hidratación del cemento, este mortero desarrolla grandes resistencias de acuerdo a su dosificación, es el más utilizado en la actualidad debido a la gran facilidad en su elaboración, trabajabilidad, y resistencia a edades tempranas.

8.1.4.2 Mortero Calcáreo

Este tipo de mortero tiene como principal material aglutinante la cal, este tipo de mortero desarrollo largo tiempo en el endurecimiento y principalmente es usado con fines estéticos, debido a que es más práctico utilizar el Mortero Hidráulico.²¹

8.1.5. Propiedades del mortero

8.1.5.1. Manejabilidad

Es la medida que tiene la mezcla de mortero de fácil manipulación, se relaciona con la consistencia en cuanto si es blanda o seca. Depende además de la proporción de arena y cemento, de la forma, textura y módulo

¹⁹ MEJIA de GUTIERREZ R.; DELVASTO S; TALERO.R. "Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones". Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Materiales de Construcción, 50(259) (2000): p 5-12.

²⁰ SANCHEZ DE GUZMAN D. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 1996, p 303

²¹ IBID. p303-304

de finura de la arena. Para la medida de la manejabilidad del mortero se usa el ensayo de fluidez descrito en la norma NTC No. 111.

8.1.5.2. Retención de agua

Es la capacidad del mortero de mantener su plasticidad en el momento en que queda en la superficie sobre la que se va a colocar. Para la mejora de la retención de agua del mortero se puede agregar cal, o aumentar el contenido de finos en la arena, o emplear aditivos plastificantes o incorporadores de aire. Esta propiedad influye en la velocidad de endurecimiento de la mezcla y en la resistencia final, pues si no retiene agua no permite la hidratación del cemento.

8.1.5.3. Velocidad de endurecimiento

El tiempo de fraguado final e inicial del mortero se encuentra entre el rango de 2 y 24 horas, dependiendo de la composición de la mezcla y las condiciones ambientales de clima y humedad.

8.1.5.4. Retracción

La retracción como propiedad del mortero en estado endurecido se refiere a la retracción que tiene la pasta de cemento, esta aumenta cuando el mortero presenta alto contenido de cemento. Para mejorar la retracción y además evitar agrietamiento es conveniente utilizar arena con grano de textura rugosa y tener en cuenta el clima, ya que el agua tiende a evaporarse más rápidamente produciendo tensiones internas en el mortero que ocasionan grietas visibles.

8.1.5.5. Adherencia

Igualmente en estado endurecido, es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tensiones tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura; la capacidad de respuesta monolíticamente con las piezas que une ante sollicitaciones de carga.

8.1.5.6. Durabilidad

Esta propiedad del mortero en su estado endurecido, se define como la resistencia que presenta ante agentes externos como:

- ✓ Baja temperatura
- ✓ Penetración de agua
- ✓ Desgaste por abrasión

- ✓ Desgaste por agentes corrosivos

8.1.5.7. Resistencia

Propiedad mecánica del mortero en estado endurecido donde se evalúa la respuesta que tiene al ser sometido a diferentes requerimientos de carga, como:

- ✓ La compresión
- ✓ La flexión
- ✓ La tracción

Si la mezcla de mortero va a ser utilizada como pega, debe proporcionar una unión resistente. Si la mezcla va a ser utilizada para soportar cargas altas y sucesos como la mampostería estructural, debe poseer alta resistencia a la compresión. Cuando se diseñan mezclas de mortero de alta resistencia hay que tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y permeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento, y para un mismo contenido de cemento en cierto volumen ya determinado de mortero, el más resistente y quizás el más impermeable; será el que presente mayor densidad.

La granulometría que presenta la arena en la mezcla del mortero, tiene influencia en la resistencia, ya que la cantidad de finos hacen que un mortero sea más denso y un mortero con mayor cantidad de gruesos hará que la mezcla sea menos densa.

El contenido de agua, también es un factor influyente en la resistencia de la mezcla puesto que morteros con bajo contenido de agua (secos) dan mayor resistencia que los morteros con alto contenido de agua (húmedos), ya que pueden ser más densamente compactados.

Además de esto, la clasificación de los morteros se realiza en cada país de acuerdo a propiedades específicas de resistencia a la compresión. La norma ASTM-270 clasifica y acepta 5 tipos de mortero en orden decreciente de resistencia, a continuación se resume la clasificación²²:

²² Ibid, p116

Tabla 3. Clasificación de los morteros según resistencia a la compresión a 28 días y según dosificación.

TIPO DE MORTERO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			CEMENTO PORTLAND	CAL	AGREGADO FINO SUELTO
	(Mpa)	(Kg/cm ²)	(PSI)			
M	17,2	175	2500	1 1	0,25	Entre 2,25 y 3 veces la suma de cemento y cal utilizado.
S	12,4	126	1800	0,5 1	0,25 a 5,50	
N	5,2	53	750	- 1	0,50 a 1,25	
O	2,4	25	350	- 1	1,25 a 2,50	
K	0,5	5	75	1	2,50 a 4,00	

Fuente: SANCHEZ DE GUZMAN D, Tecnología del concreto y del mortero.

Por otro lado, si el mortero tiene alto contenido de cemento y es muy resistente, pero con alta retracción en el secado (muy susceptible de agrietarse) sólo se usan en obras de ingeniería que exijan altas resistencias como muros de contención y cimientos.

En Colombia el uso de mortero es ampliamente difundido, y se dosifica de acuerdo a la proporción en peso de cemento y arena.²³ En la siguiente tabla se referencian las diferentes proporciones de mortero usados en Colombia.

²³ Ibid, p118

Tabla 4. Usos de los morteros de cemento

MORTERO	USOS
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones. Rellenos
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos
1:5	Pañetes exteriores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:6 y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones

Fuente: SANCHEZ DE GUZMAN D, Tecnología del concreto y del mortero.

Los morteros 1:1 a 1:3 son morteros de gran resistencia y deben hacerse con arena limpia.

Los morteros de 1:4 a 1:6 se deben hacer con arena limpia o semilavada.

Para los morteros 1:7 a 1:9 se puede usar arena sucia, pues estos morteros tienen poca resistencia

8.2. MARCO LEGAL

<p>Norma NTC 30 “Cemento Portland. Clasificación Y Nomenclatura”</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Esta norma determina y clasifica los tipos de cemento portland que se venden actualmente en el mercado de acuerdo a sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.
<p>Norma NTC 31 “Cemento. Definiciones”</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Esta norma hace una definición del cemento y de los componentes y propiedades existentes en él, así como los diferentes tipo de cementos que existen y han sido evaluadas y utilizadas.
<p>Norma NTC 111 “Método para Determinar la Fluidez de Morteros de Cemento Hidráulico”</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Determinación de la Consistencia del mortero mediante el método de mesa de flujo en cementos hidráulicos.
<p>Norma NTC 112 “Mezcla Mecánica De Pastas De Cemento Hidráulico Y Morteros De Consistencia Plástica “</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Establece el procedimiento para la elaboración de la mezcla para una pasta o mortero elaborada con concreto hidráulico. ➤ Determinar la proporción de Agua, Cemento y Arena a utilizar para la elaboración de un mortero de una determinada consistencia. ➤ Determinar el procedimiento de elaboración de los cubos de mortero para poder realizar el ensayo de la norma NTC 220.
<p>Norma NTC 220 “Determinación De La Resistencia De Morteros De Cemento Hidráulico Usando Cubos De 50 Mm o 50,8 mm De Lado”</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Establece la metodología a seguir para la determinación de la resistencia a la compresión en cubos de mortero dependiendo del tamaño elegido. ➤ Determinar cómo debe ser realizado el ensayo y la manera en la cual debe ser comprendido y analizado el ensayo para identificar y clasificar el mortero dependiendo de los resultados mostrados.
<p>Norma NTC 100 “Sistema Internacional de Unidades”</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Esta norma establece el sistema de un a utilizar en el proyecto de investigación, esto con el fin de dar concordancia con lo planteado por las normas.

<p>ASTM C 1585- 04 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by HydraulicCement Concretes” (Método Para Medir La Tasa De Absorción De Agua En Concreto De Cemento Hidráulico)</p>	<p>➤ Esta norma mide la resistencia del concreto a la penetración de agua por absorción capilar</p> <p>(Estos son los referentes, pues la normativa para estos cementos se encuentra en construcción y solo se cuenta con el rilem)</p>
--	---

9. DISEÑO METODOLÓGICO

9.1. ENFOQUE METODOLÓGICO

La investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que por medio de eventos descriptivos se obtiene información de los parámetros a analizar; utilizando la recolección y el análisis de datos que respondan a las necesidades de la investigación probando las hipótesis establecidas previamente por medio de mediciones numéricas, conteos, resultados de laboratorio, que permitan establecer patrones de comportamiento de algunas de las prestaciones mecánicas y de durabilidad en morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir del metacaolín.

9.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo del proyecto de investigación se usa el método experimental que se basa en la aplicación de técnicas controladas sobre un objeto de estudio para explicar su funcionamiento y predecir su comportamiento. El estudio se desarrollará por medio del análisis del comportamiento de morteros elaborados con geopolímeros sintetizados con metacaolín, observando sus propiedades mecánicas y durabilidad realizando estudios preliminares que permitan caracterizar y encontrar las mezclas más óptimas para luego por medio de sondeos evaluar las propiedades ya dichas analizando detalladamente su comportamiento frente a los diferentes ensayos que se deben realizar y evaluar la hipótesis planteada de usar geopolímeros sintetizados con metacaolín en morteros.

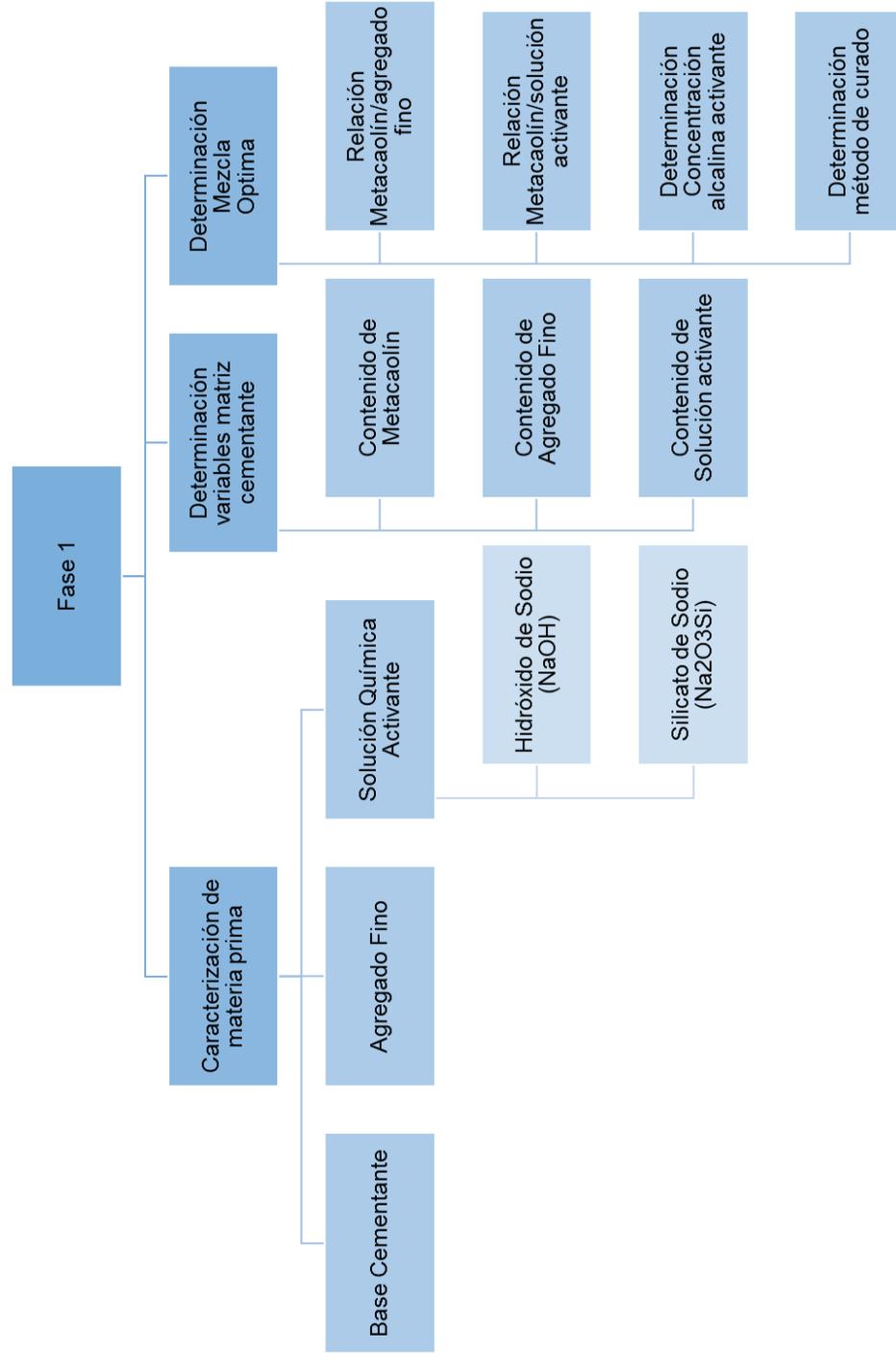
En la investigación se encuentra como variable independiente el material principal de análisis que es el geopolímero sintetizado con metacaolín, donde su variación en cuanto a cantidades y tipos serán las determinantes de las variables dependientes establecidas como la resistencia a compresión, tensión y durabilidad evaluadas en las mezclas más óptimas, donde el análisis de los resultados del estudio de las propiedades mecánicas y durabilidad a las probetas elaboradas como morteros determinaran la respuesta a la hipótesis establecida.

9.3. FASES DE INVESTIGACIÓN

El proyecto de investigación se desarrolla mediante tres fases estructuradas con el propósito de llegar al objetivo planteado anteriormente, donde:

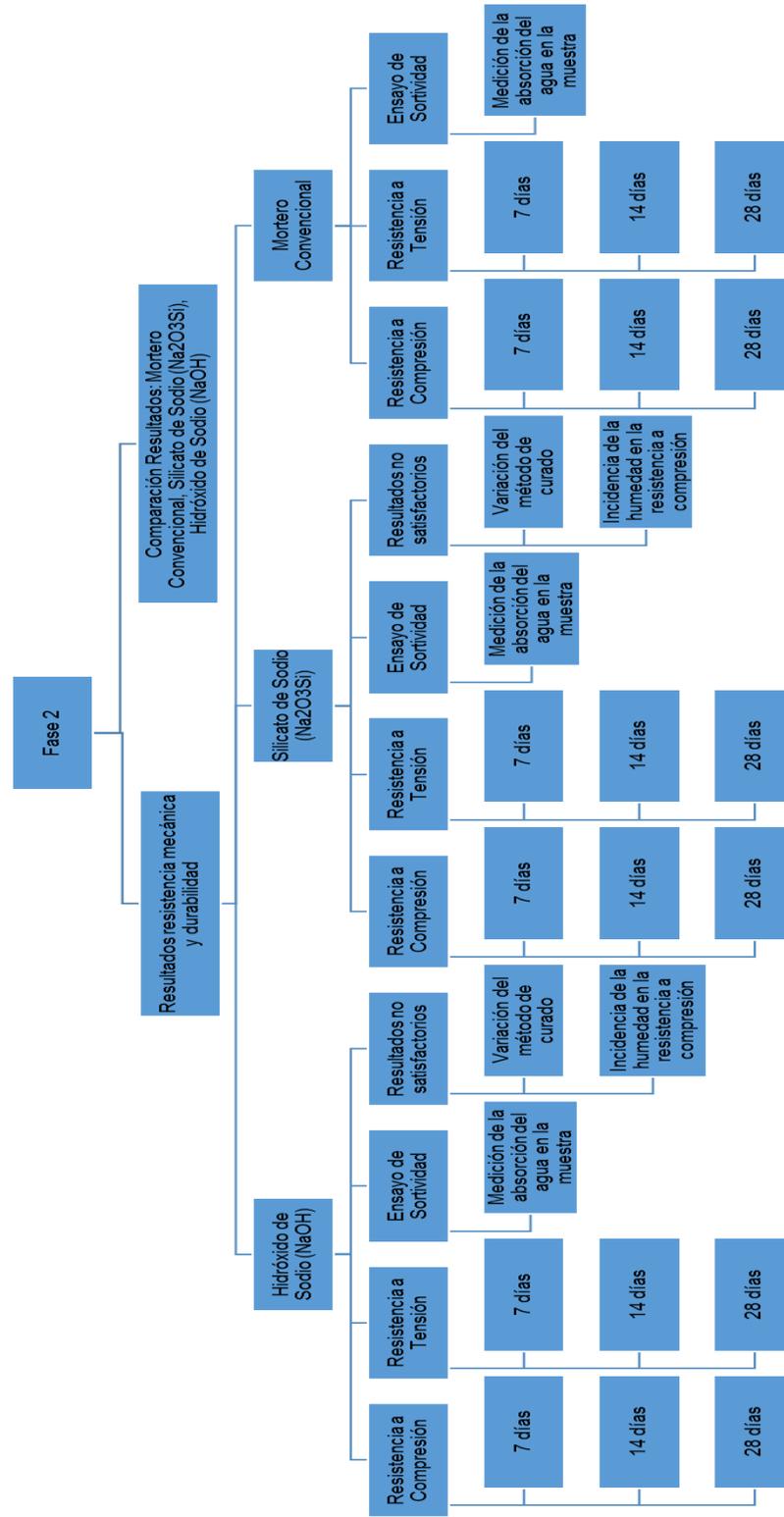
FASE 1	
DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA	
No.	ACTIVIDADES
1	Recopilación de antecedentes de investigaciones realizadas al material (metacaolín) sustrayendo de ellas el propósito de la investigación, el procedimiento realizado, los resultados obtenidos y las recomendaciones realizadas.
2	Consulta de las propiedades, prestaciones y servicios del material en mezclas de morteros.
3	Caracterización del metacaolín observando su ficha técnica, análisis químico, análisis físico, resultados de fluorescencia de rayos x y análisis de fases cristalinas y amorfidad.
4	Caracterización del agregado por medio de ensayos propios de caracterización de materiales para morteros.
5	Elaboración de matrices de reactivos y metacaolín para las diferentes mezclas.
6	Elaboración de diseños de mezclas con cantidades y condiciones.
7	Elaboración de probetas con mezclas establecidas como ideales para el análisis.
FASE 2	
ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, LA RESISTENCIA A TENSIÓN Y LA DURABILIDAD	
No.	ACTIVIDADES
1	Ejecución de ensayos en laboratorio que permitan evaluar las propiedades mecánicas de las probetas de morteros realizadas.
2	Ejecución de ensayos que permitan evaluar la condición de durabilidad en las probetas de morteros realizadas.
3	Procesamiento de resultados y posterior análisis de los ensayos de laboratorio realizados.
4	Análisis de los resultados permitiendo obtener una mezcla ideal de mortero con características óptimas en las propiedades mecánicas y de durabilidad analizadas y su comparación con muestras patrón a base de cemento Portland.
FASE 3	
ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA EL USO DEL MORTERO OBTENIDO	
No.	ACTIVIDADES
1	Consolidación de características del mortero obtenido por medio de una ficha técnica de caracterización propia del material.
2	Análisis de aplicaciones del mortero en diferentes escenarios civiles y arquitectónicos.

Figura 1. Diagrama de trabajo de la Fase 1.



Fuente: Autores

Figura 2. Diagrama de trabajo de la Fase 2.



Fuente: Autores

10. RESULTADOS Y ANÁLISIS

10.1. FASE 1 - DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA

10.1.1 Caracterización de la materia prima

Para la caracterización del metacaolín se procedió primero a analizar la ficha técnica del material, los resultados de análisis químicos y los resultados de fluorescencia de rayos x, fases cristalinas y amorfidad que permitieron determinar la reacción química con el activante alcalino a utilizar. Y pruebas físicas para determinar algunas de sus propiedades.

Al agregado para su caracterización se le realizaron una serie de ensayos determinando algunas de sus propiedades físicas propias como material de agregado en mezclas de morteros.

10.1.1.1 Base cementante

- **Generalidades:**

Material: METACAOLÍN

Nombre comercial: CAOLIN METACAOLIN MK

Descripción: Polvo grisáceo de extremada finura, fácil disolución.

Lugar de extracción: Oiba, Santander.

Figura 3. Muestra de metacaolín.



Fuente: Autores.

- Características químicas:

- Reporte de fluorescencia de rayos X

Para el análisis químico con fluorescencia de rayos X se solicitó al proveedor del material (KAOLINK S.A.S) la información observando los siguientes resultados:

Los resultados de esta prueba se reportan teniendo el metacaolín en base seca a 105° C, con una humedad relativa de 2,48%, una pérdida por ignición determinada a 1000° C durante una hora. La cantidad analizada fue de 1320 gramos, sin presentar radioactividad, radiación ni carácter magnético y la cantidad de compuestos químicos contenidos en el material se representa en la siguiente tabla:

Tabla 3. Reporte de fluorescencia de rayos X

NOMBRE	COMPUESTO/ ELEMENTO	COMPOSICIÓN (%)
Sílice	SiO ₂	67,27
Titanio	TiO ₂	1,70
Aluminio	Al ₂ O ₃	20,74
Hierro	Fe ₂ O ₃	1,17
Manganeso	Mn ₃ O ₄	N.D
Magnesio	MgO	0,29
Calcio	CaO	N.D
Sodio	Na ₂ O	0,30
Potasio	K ₂ O	2,70
Fósforo	P ₂ O ₅	0,07
Azufre	SO ₃	N.D
Vanadio	V ₂ O ₅	0,03
Cromo	Cr ₂ O ₃	N.D
Estroncio	SrO	N.D
Zirconio	ZrO ₂	0,06
Bario	BaO	N.D
Níquel	NiO	N.D
Cobre	CuO	N.D
Zinc	ZnO	N.D
Plomo	PbO	N.D
Hafnio	HfO ₂	N.D
Pérdidas	LOI	5,62

Fuente: KAOLINK S.A.S.

En la tabla anterior se evidencia que el material tiene un alto contenido de sílice y aluminio, indispensables para determinarlo como un geopolímero de activación alcalina.

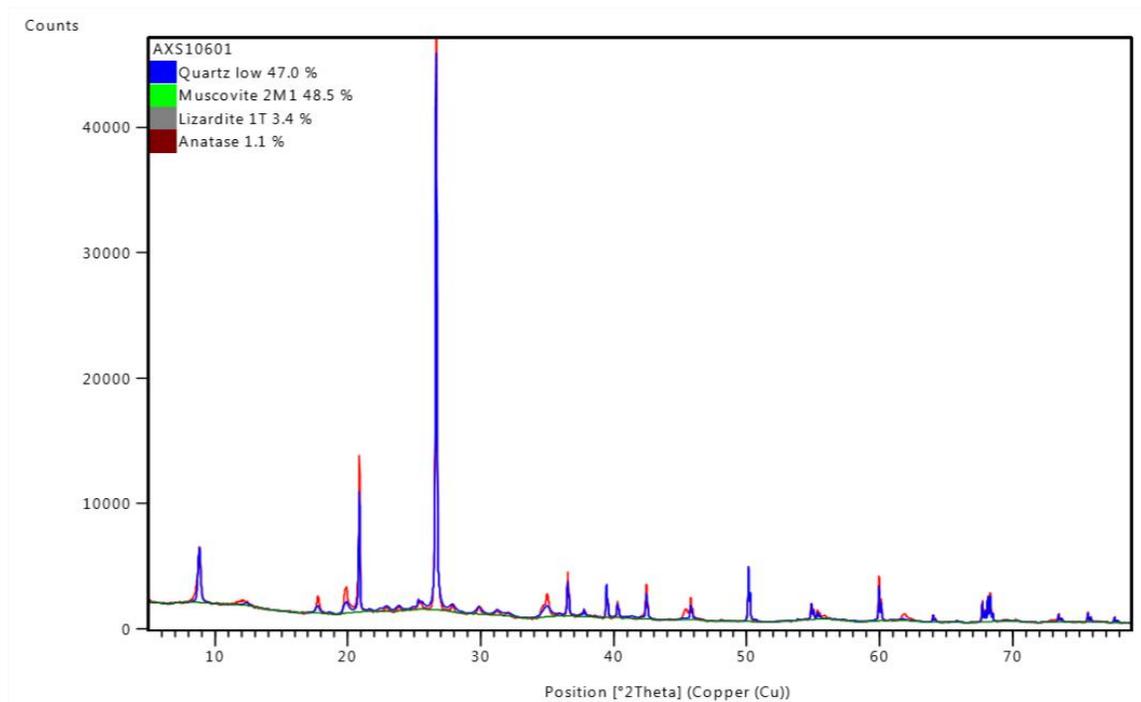
El anterior resultado, es determinante para poder realizar una prueba piloto que permita confirmar si el metacaolín a emplear se activa con una matriz de hidróxido de sodio y de silicato de sodio a diferentes concentraciones.

- **Reporte de prueba de fases cristalinas y amorfidad:**

Los siguientes resultados también fueron proporcionados por el proveedor del material, en ellos se observa lo siguiente:

Resultados obtenidos con un difractómetro de rayos X, medida en una configuración óptica de Bragg-Brentano con un detector de estado sólido de alta velocidad para la adquisición de los datos. Para la preparación de la muestra se utilizó el procedimiento de carga posterior en un portamuestras circular de 27 mm. La presión ejercida para prensar la muestra fue la presión normal obtenida manualmente.

Gráfica 1. Difractograma de amorfidad

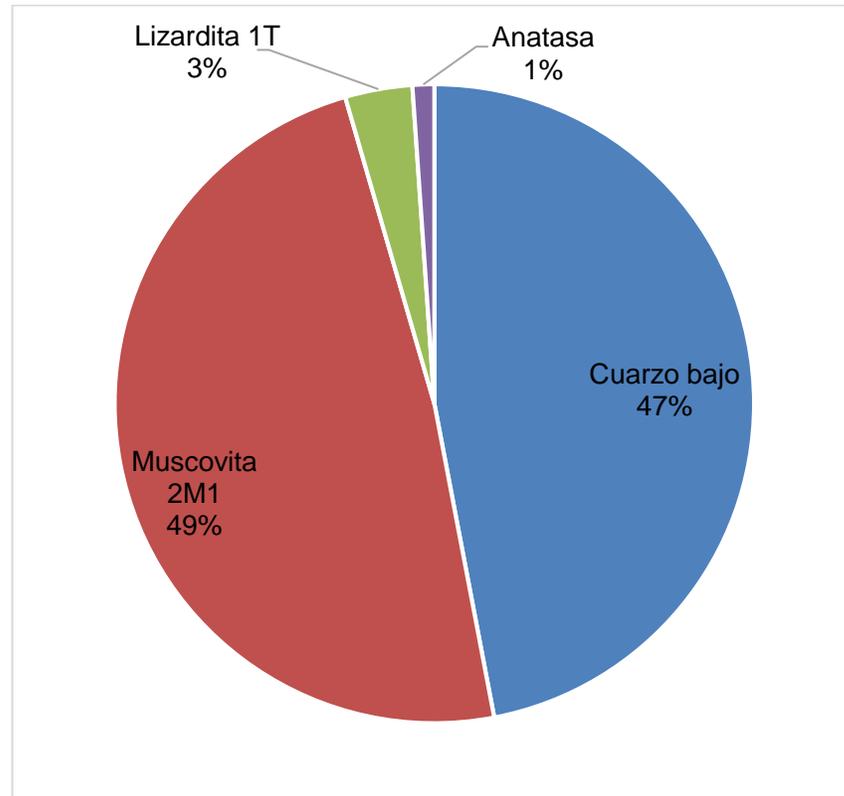


Fuente: KAOLINK S.A.S.

La cuantificación por Rietveld se obtiene por métodos matemáticos derivados de muestras de referencia puras, no se utilizó ningún tipo de estándar para obtener el resultado cuantitativo. Las fases cuantificadas por el método Rietveld son

normalizadas al 100% y dentro de la normalización no se tuvo en cuenta el porcentaje de la fase amorfa de la muestra.

Gráfica 2. Análisis cuantitativo por el Método de Rietveld – Fases cristalinas



Fuente: KAOLINK S.A.S.

En la anterior grafica se observa que la muestra se compone en su mayoría de Muscovita con un contenido del 49% del total y Cuarzo bajo con un 47%; y con un total de 4% de minerales compuesto de Lizardilla (3%) y Anatasa (1%).

- Características físicas:

Para determinar las características físicas del metacaolín se realizó el ensayo de densidad, guiado por el ensayo normalizado descrito en la norma NTC-221 que se realiza al cemento hidráulico, en el que se utilizó un frasco patrón de Le Chatelier en el que se sumergio cierta cantidad de metacaolín en kerosene libre de agua, se tomó la lectura inicial y final para determinar el volumen desplazado de kerosene

que dividiendo la masa de metacaolín utilizado calculándose de esta forma la densidad del metacaolín de $2,77 \text{ g/cm}^3$

Figura 4. Frasco de L'Chatlier



Fuente: Autores

10.1.1.2 Agregado

- Generalidades:

Nombre del material: Arena de río

Descripción: Material granular arenoso de diferente gradación, con partículas finas y color claro.

Figura 5. Muestra del agregado.



Fuente: Autores.

Se utilizó como agregado para el mortero arena de río ya que por sus propiedades y buena gradación en investigaciones anteriores ofrecía mejores resultados.

- Características físicas:

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de suelos de la facultad de ingeniería civil de la universidad La Gran Colombia, siguiendo los procedimientos descritos en la norma NTC-237 y NTC-77

Figura 6. Materia prima, arena de río



Fuente: Autores

- Ensayo granulométrico:

Para este ensayo se siguió el procedimiento descrito en la norma NTC-77 que describe el método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, donde se tomó una muestra de agregado seco previamente pesada, para separarse a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente reducidas para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas.

Resultados obtenidos de la granulometría de suelos:

Tabla 4. Granulometría realizada al agregado.

GRANULOMETRIA DE SUELOS						
Abertura Tamiz		Masa Retenida (g)	Masa Retenida Corregida de la Porción (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Material que Pasa
Pulgadas	mm					
1 1/2"	38,100	0	0,0	0,0	0,0	100,0
1"	25,400	0	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,050	0	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,700	0	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,525	0	0,0	0,0	0,0	100,0
No 4	4,750	0	0,0	0,0	0,0	100,0
8	2,360	0,82	0,8	0,1	0,1	99,9
16	1,180	130,14	130,1	11,3	11,3	88,7
30	0,600	307,1	307,1	26,6	37,9	62,1
50	0,300	387,48	387,5	33,5	71,4	28,6
100	0,150	227,29	227,3	19,7	91,1	8,9
200	0,075	68,62	68,6	5,9	97,0	3,0
FONDO		34,55	34,6	3,0	100,0	0,0
SUMATORIAS		1156,0	1156,0	100,0	100	0
Módulo de Finura		2,1				

Fuente: Autores.

Figura 7. Tamices utilizados en ensayo granulométrico



Fuente: Autores

- Ensayo de densidad al agregado fino (gravedad específica)

Para determinar la gravedad específica del material se realizó el procedimiento de laboratorio descrito la norma NTC-237 en laboratorio de la facultad.

En el que se determinó la relación entre el peso y el volumen de una masa de agregado fino, en este caso arena de río, obteniendo los siguientes datos y un valor de gravedad específica de: 2.62 g/cm^3

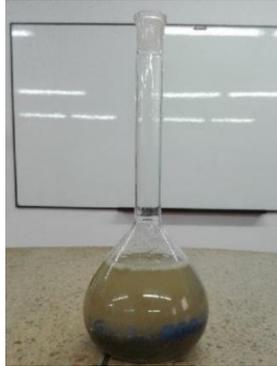
Resultados obtenidos de ensayo de gravedad específica:

Tabla 5. Gravedad específica del agregado (Gs)

GRAVEDAD ESPECÍFICA AGREGADO FINO	
Capacidad picnómetro (cm^3)	500
Peso suelo seco W_s (g)	497,7
Peso picn. + agua + suelo W_1 (g)	996
Peso picn. + agua a c.t. W_2 (g)	688
Gs a temperatura ensayo	2,62

Fuente: Autores

Figura 8. Densidad de agregado fino



Fuente: Autores

10.1.1.3. Soluciones químicas activantes

Para activar la base cementante (MK) se definieron dos tipos de soluciones químicas: el Hidróxido de Sodio y el Silicato de Sodio; que, por sus propiedades, tanto propias como de reacción con el MK ofrecen resultados favorables para su uso.

10.1.1.3.1. Hidróxido de Sodio

- Generalidades

Químico: Hidróxido de Sodio

Nombre comercial: Soda cáustica

Pureza: 98%

Descripción: Color blanco, inodoro, pH 14

Figura 9. Solución de Hidróxido de Sodio



Fuente: Autores

- Obtención de la solución química

Teniendo en cuenta que la molaridad de la solución alcalina es una de las variables independientes de la investigación se procedió a realizar una matriz de Hidróxido de Sodio con diferentes molaridades, calculando cuanta es la cantidad necesaria para diluir en 500 ml y en 1000 ml de agua destilada.

Tabla 6. Matriz de Hidróxido de Sodio con diferentes molaridades.

Molaridad	6	7	8	9	10	11	12
NaOH	240,0	280,0	320,0	360,0	400,0	440,0	480,0

Fuente: Autores

Se prepararon las soluciones en el laboratorio de química de la facultad para 500ml de agua destilada primeramente y teniendo en cuenta las cantidades mostrada en la anterior matriz de mezclas.

Figura 10. Preparación de la solución alcalina



Fuente: Autores

10.1.1.3.2. Silicato de Sodio

- Generalidades:

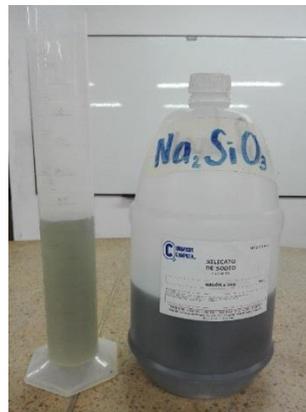
Químico: Silicato de Sodio

Nombre comercial: Vidrio soluble

Relación: SiO_2 : Na_2O 3,00-3,25

Descripción: Líquido viscoso de color grisáceo, pH 11.3

Figura 11. Solución de Silicato de Sodio



Fuente: Autores

- Obtención de la solución química

Al igual que con el Na_2SiO_3 la molaridad de la solución alcalina es una de las variables independientes de la investigación, se procedió a realizar la matriz de la misma forma.

Obteniendo la siguiente matriz de mezcla que permite establecer la cantidad de solución química a disolver en agua para su preparación y posterior aplicación al diseño de mezcla establecido

Tabla 7. Matriz de Silicato de Sodio con diferentes molaridades.

Molaridad	5	6	7	8	9	10	11
Na_2SiO_3	305,15	366,18	427,21	488,24	549,27	610,3	671,33

Fuente: Autores

Se prepararon las soluciones en el laboratorio de química de la facultad, teniendo en cuenta las cantidades mostradas en la anterior matriz de mezclas.

Figura 12. Preparación de la solución alcalina



Fuente: Autores

10.1.2. Determinación de variables de la matriz cementante

Para realizar esta determinación se tuvo en cuenta varios aspectos y metodologías para la dosificación de morteros, entre los sustentos teóricos más relevantes fueron utilizadas las metodologías de la norma NTC 112 y la metodología del Ing. Diego Sánchez de Guzmán en su libro “Tecnología del concreto y del mortero”²⁴, en el cual precisa que es necesario hacer una dosificación de las variables por peso dependiendo de su densidad, para así completar un volumen deseado, esto se realiza con una previo caracterización de los materiales teniendo así una secuencia como la siguiente, pero con modificaciones necesarias debido a que no es posible realizar una dosificación convencional:

1. Determinación del tipo de agregado fino, material cementante y solución activante.
2. Determinación de la relación material cementante/solución activante que satisfaga parámetros de fluidez/resistencia.
3. Determinación de la relación material cementante/ agregado fino.
4. Determinación de la proporción de material cementante (Metacaolin -Mk), dependiendo de las variables de densidad de materiales y sus relaciones correspondientes para un volumen deseado.
5. Determinación de la proporción solución activante dependiendo de la relación de esta con el material cementante y de su naturaleza química.

²⁴ CITAR SÁNCHEZ DE GUZMÁN

6. Determinación de la proporción de agregado fino dependiendo de la relación de esta con el material cementante.

10.1.2.1. Determinación de variables de la matriz cementante con solución activante de NaOH:

Tabla 8. Contenido de Mk, agregado y NaOH

Concentración		Relación		Contenido		
NaOH (M)	Metacaolín NaOH	Metacaolín Agregado	Metacaolín (g)	Agregado (g)	NaOH (cm3)	
7	0,5	1	113,15	113,15	56,57	
		2	86,56	173,12	43,28	
		3	70,09	210,28	35,05	
	0,7	1	97,46	97,46	68,22	
		2	77,07	154,14	53,95	
		3	63,74	191,21	44,62	
	0,9	1	85,60	85,60	77,04	
		2	69,46	138,92	62,51	
		3	58,44	175,32	52,60	
	9	0,5	1	113,15	113,15	56,57
			2	86,56	173,12	43,28
			3	70,09	210,28	35,05
0,7		1	97,46	97,46	68,22	
		2	77,07	154,14	53,95	
		3	63,74	191,21	44,62	
0,9		1	85,60	85,60	77,04	
		2	69,46	138,92	62,51	
		3	58,44	175,32	52,60	
11		0,5	1	113,15	113,15	56,57
			2	86,56	173,12	43,28
			3	70,09	210,28	35,05
	0,7	1	97,46	97,46	68,22	
		2	77,07	154,14	53,95	
		3	63,74	191,21	44,62	
	0,9	1	85,60	85,60	77,04	
		2	69,46	138,92	62,51	
		3	58,44	175,32	52,60	

Fuente: Autores

10.1.2.2. Determinación de variables de matriz cementante con solución activante de Na_2SiO_3 :

Tabla 9. Contenido de Mk, agregado y Na_2SiO_3

Concentración Na_2SiO_3 (M)	Relación		Contenido	
	Metacaolín Na_2SiO_3	Metacaolín (g)	Agregado (g)	Na_2SiO_3 (cm^3)
9	0,5	210,3	630,9	105
	0,6	200,7	602	120
	0,7	191,2	573,6	134
10	0,5	210,3	630,9	105
	0,6	200,7	602	120
	0,7	191,2	573,6	134
11	0,5	210,3	630,9	105
	0,6	200,7	602	120
	0,7	191,2	573,6	134

Fuente: Autores

10.2. FASE 2 - ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN, LA RESISTENCIA A TENSIÓN Y LA DURABILIDAD

Esta fase desarrolla lo propuesto para la evaluación de las propiedades mecánicas y condiciones de durabilidad de las mezclas diseñadas a partir de la dosificación realizada que determina y discrimina las concentraciones de NaOH y Na₂SiO₃, el tipo de agregado y la cantidad de base cementante.

Con lo anterior se elaboraron probetas normalizadas para mortero con características físicas que cumplan tanto en dimensiones como en la cantidad de ellas. Para cada diseño de mezcla se realizaron tres grupos de tres cubos cada uno con arista de cinco centímetros teniendo en cuenta que son cubos regulares donde de esta forma se tendrían las muestras necesarias para la evaluación de edades a siete, catorce y veintiocho días de curado. De la misma forma se elaboraron las probetas para las pruebas de durabilidad, con las mismas características en cuanto a su geometría.

10.2.1. DETERMINACIÓN DE LA MEZCLA ÓPTIMA

Para la determinación de la mezcla óptima se analizan las propiedades de las condiciones de mezcla; una con hidróxido de sodio y la otra con silicato de sodio, en las que se tiene en cuenta que la variable es la concentración molar de cada una. A partir de investigaciones anteriores nombradas en los antecedentes de estudio, se determina que para la solución de hidróxido de sodio se utilizaran concentraciones entre 7 M y 11 M, y más precisamente utilizando 7 M, 9 M y 11 M que por pruebas de endurecimiento y fraguado ofrecieron un mejor resultado, además de analizar por cada mezcla tres relaciones (0.5, 0.7 y 0.9) de contenido de metacaolín y contenido de solución química (comúnmente agua-cemento para mezcla de morteros convencionales) como se mostró en las tablas (contenido de mk ...) y _.

Así mismo, para las mezclas con silicato de sodio se determinó el análisis utilizando concentraciones entre 5 M y 11 M considerando que es una concentración media-alta de análisis por los antecedentes de otros estudios realizados a este activante químico, también se analizaron tres relaciones (0.5, 0.6 y 0.7) de contenido de MK y Na₂SiO₃.

Teniendo en cuenta que la utilización de activadores con alto contenido de Sílice ofrece un buen desempeño aplicándose a geopolímeros y utilizar silicato de sodio más precisamente con estas tres concentraciones.

En los antecedentes descritos se recomendaba utilizar concentraciones de silicato de sodio desde 6M en adelante sin superar una concentración de 12M; lo anterior se logró verificar en una prueba preliminar de endurecimiento y fraguado que mostró resultados favorables, comparado con el hidróxido de sodio, además una mejor manejabilidad en cuanto a la elaboración de las probetas.

Con lo anterior se procedió a evaluar la resistencia mecánica a compresión de las probetas realizadas, cada una con sus características ya mencionadas y descritas en la tabla de dosificación para las diferentes mezclas.

10.2.1.1. Activación con hidróxido de sodio

Resultados de resistencia mecánica a compresión evaluando carga y esfuerzo a probetas con las siguientes características y variables de análisis:

Edad: Siete días

Curado a temperatura: 85 °C por 24 horas

Relación agregado–metacaolín: 1:3

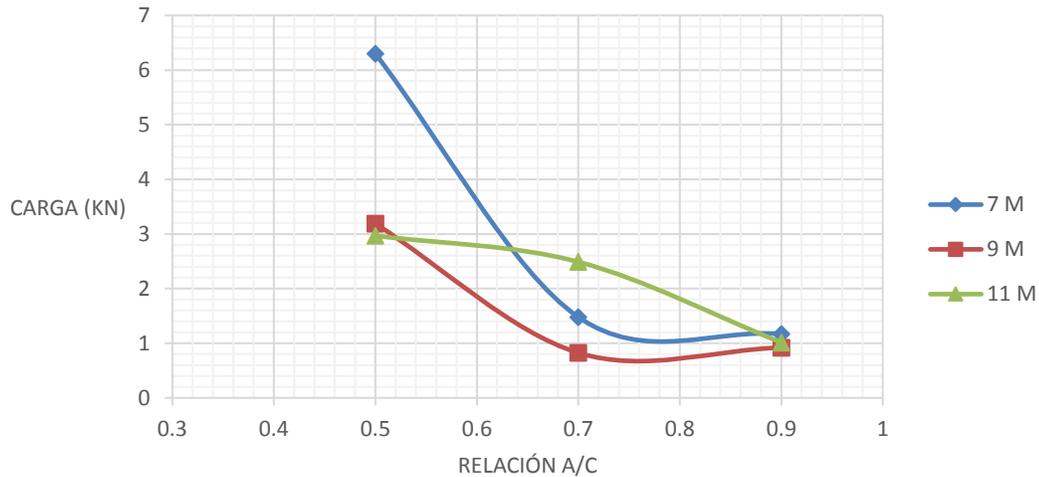
Tabla 10. Resultados carga y esfuerzo NaOH, mezcla óptima.

Molaridad NaOH (M)	Relación NaOH/MK	Carga (kN)	Esfuerzo (MPa)
7	0,5	6,3	2,520
	0,7	1,48	0,592
	0,9	1,17	0,468
9	0,5	3,19	1,276
	0,7	0,825	0,330
	0,9	0,92	0,368
11	0,5	2,97	1,188
	0,7	2,49	0,996
	0,9	1,015	0,406

Fuente: Autores

La siguiente gráfica muestra la relación de los resultados de resistencia a compresión respecto a la relación NaOH/metacaolín con las tres concentraciones de análisis:

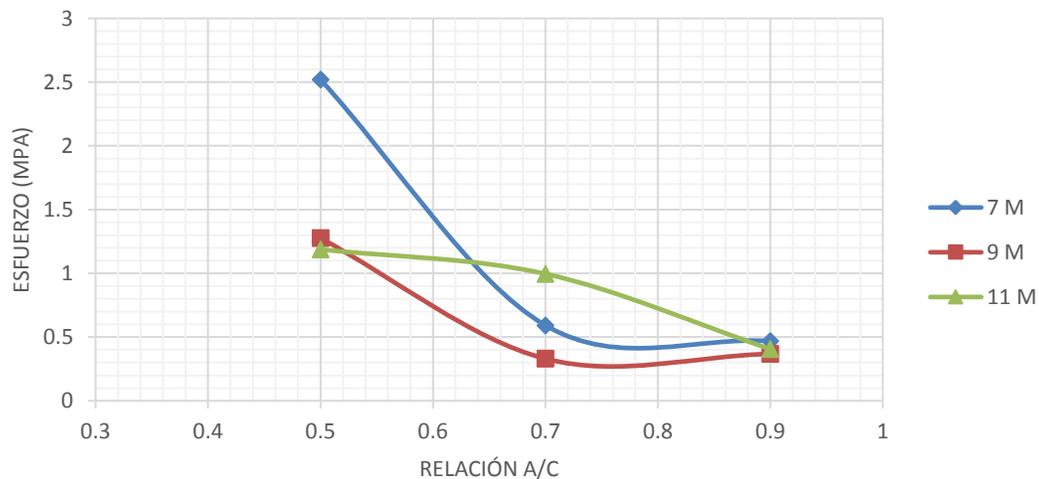
Gráfica 3. Carga Vs. Relación NaOH / MK a 7 M, 9 M, 11 M.



Fuente: Autores

Así mismo, la siguiente gráfica muestra los resultados de esfuerzo obteniendo en la prueba a las muestras con las características anteriormente descritas:

Gráfica 4. Esfuerzo Vs. Relación NaOH / MK a 7 M, 9 M, 11 M.



Fuente: Autores

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en las gráficas anteriores, la mezcla óptima para estos morteros requiere tener una concentración de hidróxido de sodio de 7M y una relación NaOH/metacaolín de 0,5.

10.2.1.2. Activación con silicato de sodio

Resultados de resistencia mecánica a compresión evaluando carga y esfuerzo a probetas con las siguientes características y variables de análisis:

Edad: Siete días

Curado a temperatura: 85 °C por 24 horas

Relación agregado–metacaolín: 1:3

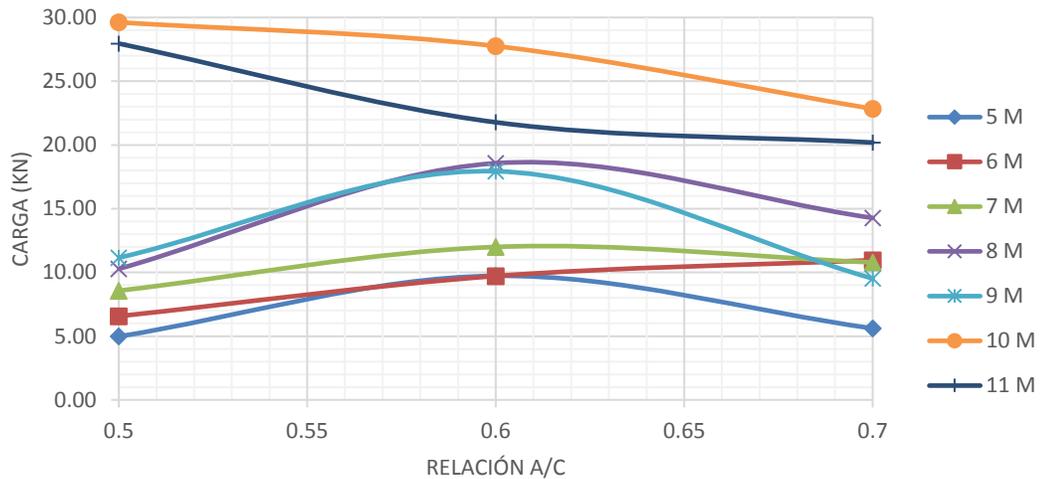
Tabla 11. Resultados carga y esfuerzo Na_2SiO_3 , mezcla óptima.

Molaridad Si_2NaO_3 (M)	Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{MK}$	Carga (kN)	Esfuerzo (Mpa)
5	0,5	4,977	1,991
	0,6	9,730	3,892
	0,7	5,610	2,244
6	0,5	6,567	2,627
	0,6	9,715	3,886
	0,7	10,965	4,386
7	0,5	8,567	3,427
	0,6	12,000	4,800
	0,7	10,787	4,315
8	0,5	10,280	4,112
	0,6	18,567	7,427
	0,7	14,275	5,710
9	0,5	11,153	4,461
	0,6	17,935	7,174
	0,7	9,520	3,808
10	0,5	29,623	11,849
	0,6	27,757	11,103
	0,7	22,837	9,135
11	0,5	27,957	11,183
	0,6	21,777	8,711
	0,7	20,190	8,076

Fuente: Autores

La siguiente gráfica muestra la relación de los resultados de resistencia a compresión respecto a la relación NaOH/metacaolín con las siete concentraciones de análisis:

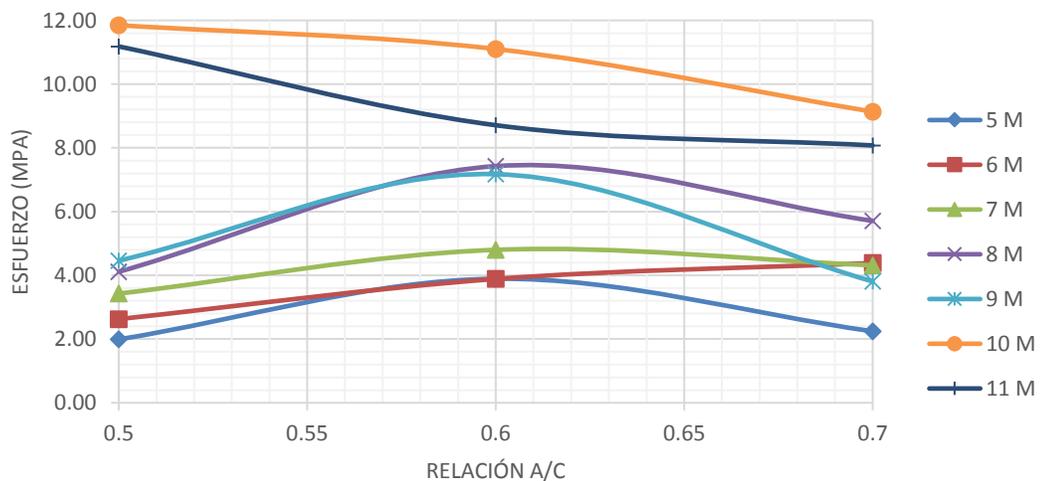
Gráfica 5. Carga Vs. Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{MK}$ a 5M – 11M



Fuente: Autores

Así mismo, la siguiente gráfica muestra los resultados de esfuerzo obteniendo en la prueba a las muestras con las características anteriormente descritas:

Gráfica 6. Esfuerzo Vs. Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{MK}$ a 7 M, 9 M, 11 M.



Fuente: Autores

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en las anteriores gráficas, la mezcla óptima para estos morteros requiere tener una concentración de silicato de sodio de 10M y una relación Na_2SiO_3 /metacaolín de 0,6. Si bien la relación 0,5 reporta mayores valores de esfuerzo y carga, las muestras de relación 0,6 presentan mejor manejabilidad.

10.2.3. EVALUACIÓN DE PROPIEDADES DE RESISTENCIA Y CARACTERÍSTICAS DE DURABILIDAD A MEZCLA ÓPTIMA

Por lo anterior se procede a evaluar la mezcla óptima obtenida, en muestras de mortero como las ya evaluadas, realizando grupos de tres muestras por grupo de análisis, para cada edad (7, 14 y 28 días), para cada ensayo de resistencia (compresión y tensión) y para los ensayos de durabilidad.

10.2.3.1 Mortero activado con hidróxido de sodio

Características y variables de análisis:

Solución activante: hidróxido de sodio

Concentración: 7M

Relación agregado–metacaolín: 1:3

Relación NaOH-metacaolín: 0,5.

Edades: 7 días – 14 días – 28 días

Ensayos de resistencia: Compresión y tensión

Ensayos de durabilidad: Sortividad, fluidez, absorción.

Figura 13. Muestras de mortero a base de MK activado con hidróxido de sodio



Fuente: Autores

10.2.3.1.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica

Para la evaluación de resistencia mecánica a compresión y tensión se realizó el ensayo en una máquina universal de aplicación de carga siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220 “Determinación De La Resistencia De Morteros De Cemento Hidráulico Usando Cubos De 50 mm o 50,8 mm De Lado” donde se establece la metodología a seguir para la determinación de la resistencia a la compresión y tensión en cubos de mortero dependiendo del tamaño elegido y además donde se determina cómo debe ser realizado el ensayo y la manera en la cual debe ser comprendido y analizado.

- Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a compresión

Figura 14. Prueba de resistencia mecánica a compresión - NaOH



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras de análisis para 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

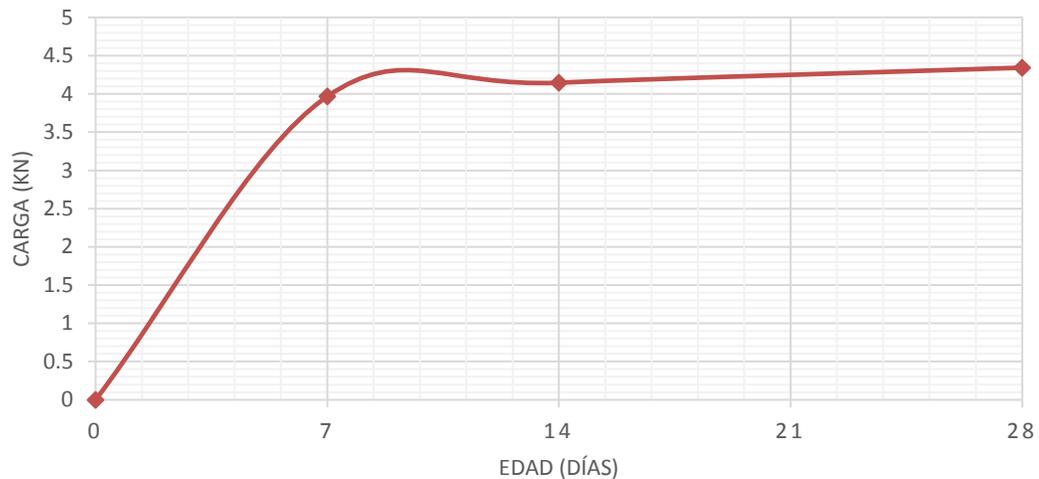
Tabla 12. Resultados de resistencia mecánica a compresión - NaOH

RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	3,98	3,87	4,05	3,97
14	4,15	4,21	4,08	4,15
28	4,34	4,43	4,26	4,34

Fuente: Autores

Con lo anterior se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 7. Resistencia mecánica a compresión - NaOH



Fuente: Autores

En esta gráfica se observa el comportamiento que tuvieron las distintas muestras que se ensayaron a compresión a edades de 7, 14 y 28 días. Los valores mostrados son las resistencias promedio de cada una de las mezclas en su respectiva edad. Se observa que la mezcla que alcanzó mayor resistencia a compresión, con un valor de 4,34 kN, fue la ensayada a edad de 28 días.

- Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a tensión

Figura 15. Prueba de resistencia mecánica a tensión - NaOH



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras normalizadas para ensayo a tensión en máquina universal para el análisis a edades de 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

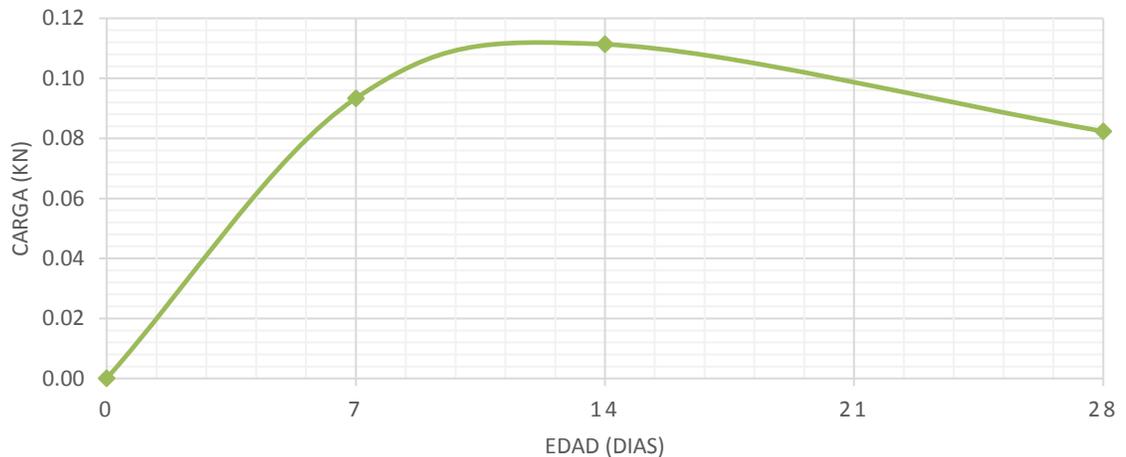
Tabla 13. Resistencia mecánica a tensión - NaOH

RESISTENCIA MECÁNICA A TENSIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	0,096	0,085	0,099	0,09
14	0,113	0,117	0,104	0,11
28	0,08	0,089	0,078	0,08

Fuente: Autores

Con la tabla anterior se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 8. Resistencia mecánica a tensión - NaOH



Fuente: Autores

Esta gráfica muestra la resistencia mecánica a tensión alcanzada por cada una de las mezclas a edades de 7, 14 y 28 días. Los valores mostrados en la gráfica son el promedio de cada mezcla en su respectiva edad de análisis donde se observa

que una vez alcanzada la edad de 14 días se obtiene una máxima resistencia de 0,11 kN.

- Resultados obtenidos para la evaluación de la influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión

Además, se evaluó la influencia que tiene la humedad en la resistencia a compresión en las probetas. Se realizaron muestras curadas a temperatura de 85 °C a diferente tiempo de permanencia en el horno para someterlas a carga de compresión, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 16. Muestras sometidas a 85 °C activadas con NaOH



Fuente: Autores

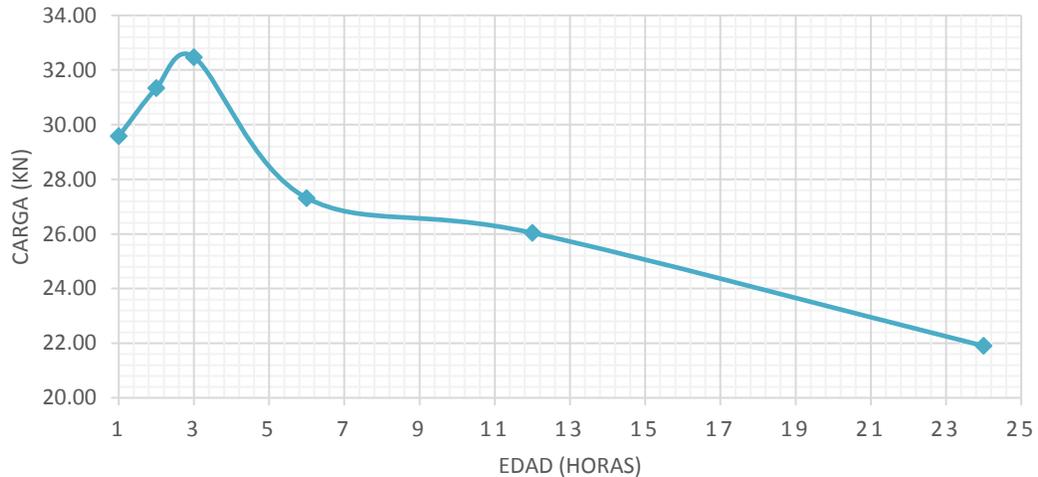
Tabla 14. Influencia de la humedad en la resistencia a compresión – NaOH

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
Tiempo (h)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
1	31,94	28,2	28,6	29,58
2	19,59	34,21	40,21	31,34
3	18,22	36,93	42,27	32,47
6	29,32	27,79	24,84	27,32
12	25,16	27,91	25,04	26,04
24	23,75	22,12	19,83	21,90

Fuente: Autores

Con la tabla anterior se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto al tiempo de permanencia de las muestras a 85 °C

Gráfica 9. Influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión



Fuente: Autores

En la gráfica anterior se muestran los resultados de la influencia de la humedad para cada mezcla, estos datos fueron obtenidos realizando tres muestras por cada tiempo de análisis, en este caso a una hora, dos horas, tres horas, seis horas, doce y veinticuatro horas de extraídas las muestras del horno a una temperatura de 85°C.

Se observa que la máxima resistencia alcanzada por las muestras se encuentra a tres horas de extraída la muestra del horno y que a medida que más tiempo transcurre luego de que se extraen las muestras su resistencia va disminuyendo.

Lo anterior indica que para alcanzar una resistencia óptima es necesario tener previamente las muestras a altas temperaturas una vez se quiera someter a cargas tanto de compresión como de tensión.

10.2.3.1.2 Resultados de evaluación de durabilidad

Para la evaluación de la durabilidad del mortero obtenido se realizaron los ensayos descritos en la Norma NTC 111 “Método para Determinar la Fluides de Morteros de Cemento Hidráulico” que determina la consistencia del mortero mediante el método de mesa de flujo en cementos hidráulicos y en la norma

ASTM C 1585- 04 “Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes” (Método Para Medir La Tasa De Absorción De Agua En Concreto De Cemento Hidráulico) que permite medir la resistencia del concreto a la penetración de agua por absorción capilar.

- **Sortividad (Absorción capilar)**

Para evaluar la sortividad en las muestras elaboradas, se depositaron los probetas en un recipiente con agua, teniendo en cuenta la masa inicial de cada una, el tiempo de extracción de la muestra del agua, la masa final luego de extraída la muestra y la penetración de agua en ella.

Este procedimiento se realizó tanto para las muestras activadas con hidróxido de sodio como para las muestras elaboradas con silicato de sodio obteniendo los siguientes resultados:

Para mortero activado con hidróxido de sodio.

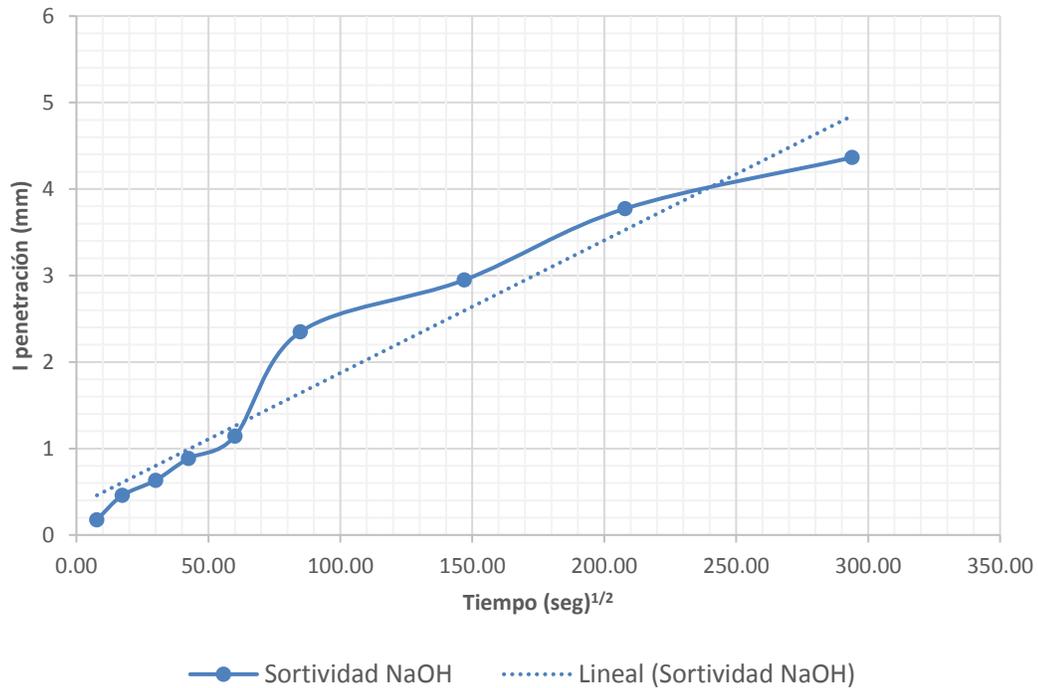
Tabla 15. Sortividad en mezclas activadas con NaOH

Sortividad NaOH						
Tiempo (min)	Tiempo (seg)	Tiempo (seg) ^{1/2}	Masa inicial (g)	Masa final (g)	ΔMasa (g)	I penetración (mm)
1	60	7,75	261,36	261,8	0,44	0,176
5	300	17,32	260,61	261,75	1,14	0,456
15	900	30,00	260,4	261,98	1,58	0,632
30	1800	42,43	268,45	270,66	2,21	0,884
60	3600	60,00	264,73	267,58	2,85	1,14
120	7200	84,85	256,85	262,72	5,87	2,348
360	21600	146,97	267,61	274,98	7,37	2,948
720	43200	207,85	270,21	279,64	9,43	3,772
1440	86400	293,94	263,93	274,84	10,91	4,364

Fuente: Autores

La anterior tabla evidencia el resultado obtenido de sortividad de la mezcla activada con NaOH

Gráfica 10. Sortividad a muestras de mortero activadas con NaOH



Fuente: Autores

Los anteriores valores obtenidos y mostrados en la anterior gráfica muestran como es el comportamiento que tiene la mezcla al absorber agua durante el proceso de humedecimiento, es decir, caracteriza los primeros estadios de su proceso de infiltración de agua.

Los datos tomados en este análisis se materializan en la pendiente de la curva de infiltración acumulada en el primer minuto del ensayo donde su mayor valor es de 4,364 mm de penetración o infiltración de agua en 24 horas de encontrarse sumergida la muestra en agua.

10.2.3.2 Mortero activado con silicato de sodio

Características y variables de análisis:

Solución activante: silicato de sodio

Concentración: 10M

Relación agregado–metacaolín: 1:3

Relación Na_2SiO_3 -metacaolín: 0,6

Edades: 7 días – 14 días – 28 días

Ensayos de resistencia: Compresión y tensión

Ensayos de durabilidad: Sortividad, fluidez, absorción.

Figura 17. Muestras de mortero a base de MK activado con silicato de sodio



Fuente: Autores

10.2.3.2.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica

Para la evaluación de resistencia mecánica a compresión y tensión se realizó el ensayo en una máquina universal de aplicación de carga siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220 “Determinación De La Resistencia De Morteros De Cemento Hidráulico Usando Cubos De 50 Mm o 50,8 mm De Lado” donde se establece la metodología a seguir para la determinación de la resistencia a la compresión y tensión en cubos de mortero dependiendo del tamaño elegido y además donde se determina cómo debe ser realizado el ensayo y la manera en la cual debe ser comprendido y analizado.

- **Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a compresión**

Figura 18. Prueba de resistencia mecánica a compresión - Na_2SiO_3



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras de análisis para 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

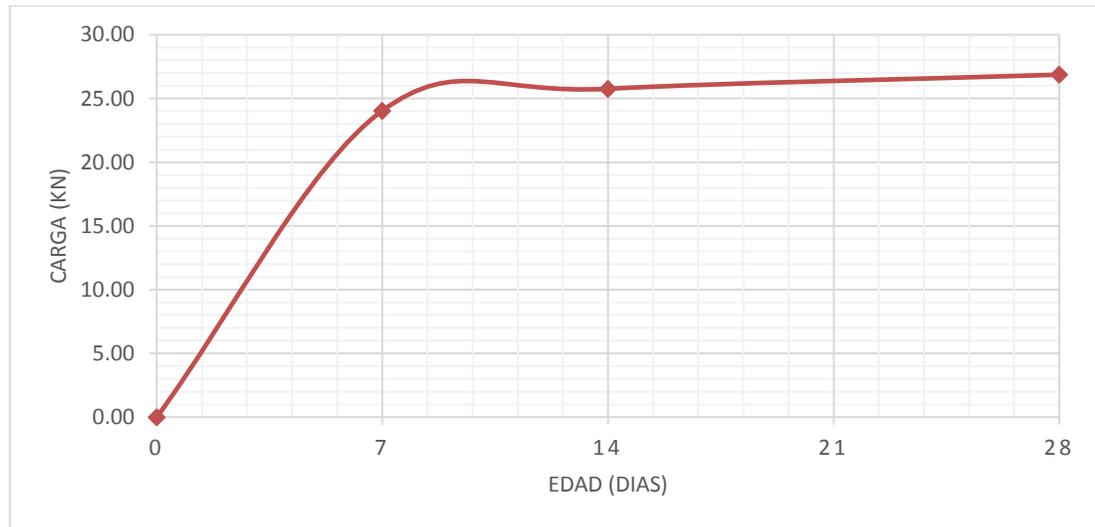
Tabla 16. Resultados de resistencia mecánica a compresión – Na_2SiO_3

RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	22,65	25,07	24,41	24,04
14	25,45	26,12	25,71	25,76
28	27,3	25,84	27,46	26,87

Fuente: Autores

En la anterior tabla se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 11. Resistencia mecánica a compresión - Na_2SiO_3



Fuente: Autores

La anterior gráfica muestra el comportamiento que tuvieron las distintas muestras que se ensayaron a compresión a edades de 7, 14 y 28 días. Los valores mostrados son las resistencias promedio de cada una de las mezclas en su respectiva edad. Se observa que la mezcla que alcanzó mayor resistencia a compresión, con un valor de 26,87 kN, fue la ensayada a edad de 28 días.

- **Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a tensión**

Figura 19. Prueba de resistencia mecánica a tensión - Na_2SiO_3



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras de análisis para 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

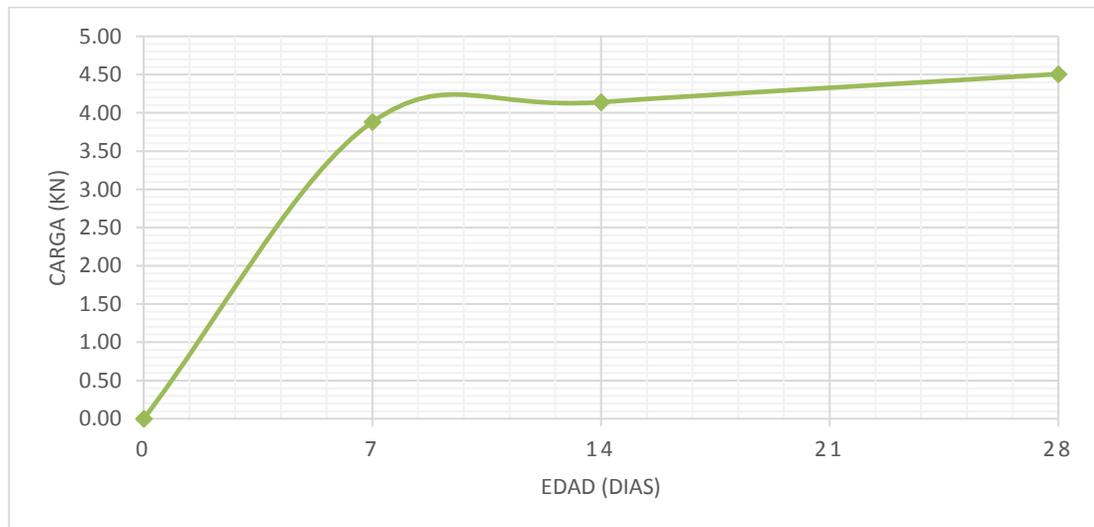
Tabla 17. Resistencia mecánica a tensión - Na_2SiO_3

RESISTENCIA MECÁNICA A TENSIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	3,76	3,87	4,01	3,88
14	4,13	4,21	4,08	4,14
28	4,33	4,42	4,77	4,51

Fuente: Autores

En la anterior tabla se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 12. Resistencia mecánica a tensión - Na_2SiO_3



Fuente: Autores

En la anterior gráfica se observan los resultados de la resistencia mecánica a tensión de mezclas activadas con Na_2SiO_3 a edades de 7, 14 y 28 días. Estos valores son el promedio de cada mezcla a una determinada edad de análisis

donde se observa que la mezcla alcanza su resistencia máxima a edad de 28 días de curado con resistencia a tensión de 5,51 kN.

- Resultados obtenidos para la evaluación de la influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión

Además, se evaluó la influencia que tiene la humedad en la resistencia a compresión en las probetas. Se realizaron muestras curadas a temperatura de 85 °C a diferente tiempo de permanencia en el horno para someterlas a carga de compresión, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 20. Muestras sometidas a 85 °C activadas con Na₂SiO₃



Fuente: Autores

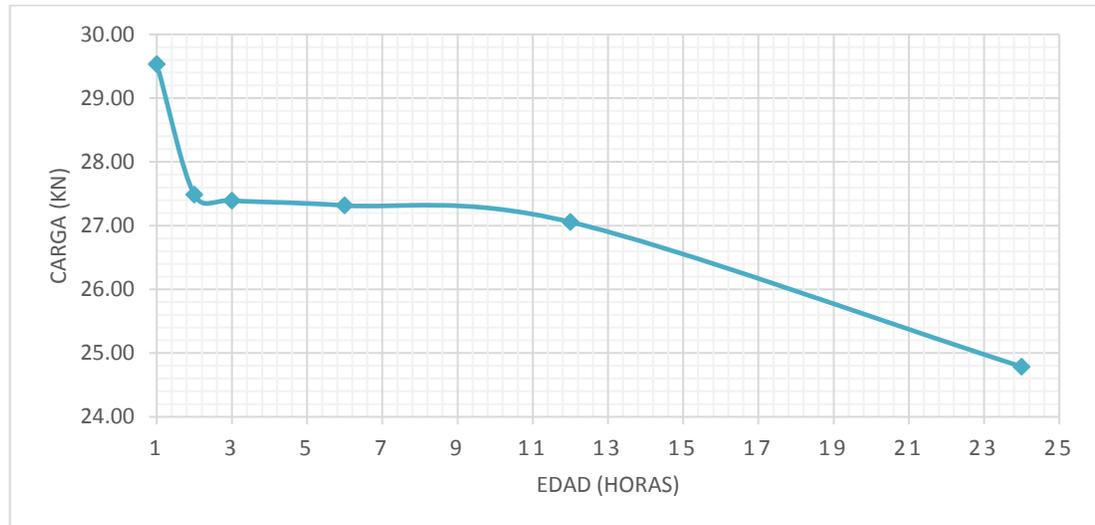
Tabla 18. Influencia de la humedad en la resistencia a compresión – Na₂SiO₃

INFLUENCIA DE LA HUMEDAD EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
Tiempo (h)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
1	39,82	31,31	17,48	29,54
2	24,06	29,53	28,87	27,49
3	27,24	26,38	28,56	27,39
6	29,32	27,79	24,84	27,32
12	22,52	34,46	24,19	27,06
24	24,15	24,54	25,67	24,79

Fuente: Autores

Con lo anterior se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto al tiempo de permanencia de las muestras a 85 °C

Gráfica 13. Influencia de la humedad en la resistencia mecánica a compresión



Fuente: Autores

Al igual que en las muestras activadas con NaOH, en este caso se realizó el mismo procedimiento para obtener los resultados de la influencia de la humedad en la mezcla y su posterior análisis de resistencia.

Se observa que la máxima resistencia alcanzada en este caso es cuando la muestra se extrae del horno y transcurre una hora a partir de ello alcanzando una resistencia de 29,54 kN.

Se observa igualmente que a medida de que transcurre más tiempo de retiradas las muestras del horno su resistencia disminuye significativamente. Indicando que la resistencia de las muestras mejora una vez son sometidas previamente a altas temperaturas.

10.2.3.2 Resultados de evaluación de durabilidad

Para la evaluación de la durabilidad del mortero obtenido se realizaron los ensayos descritos en la norma Norma NTC 111 “Método para Determinar la Fluidéz de Morteros de Cemento Hidráulico” que determina la consistencia del mortero mediante el método de mesa de flujo en cementos hidráulicos y en la norma ASTM C 1585- 04 “Standard Test Method for Measurement of Rate of

Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes” (Método Para Medir La Tasa De Absorción De Agua En Concreto De Cemento Hidráulico) que permite medir la resistencia del concreto a la penetración de agua por absorción capilar.

- **Sortividad (Absorción capilar)**

Para evaluar la sortividad en las muestras elaboradas, se depositaron los probetas en un recipiente con agua, teniendo en cuenta la masa inicial de cada una, el tiempo de extracción de la muestra del agua, la masa final luego de extraída la muestra y la penetración de agua en ella.

Se realizó el mismo procedimiento para las muestras activadas con hidróxido de sodio y para las muestras elaboradas con silicato de sodio.

Obteniendo los siguientes resultados:

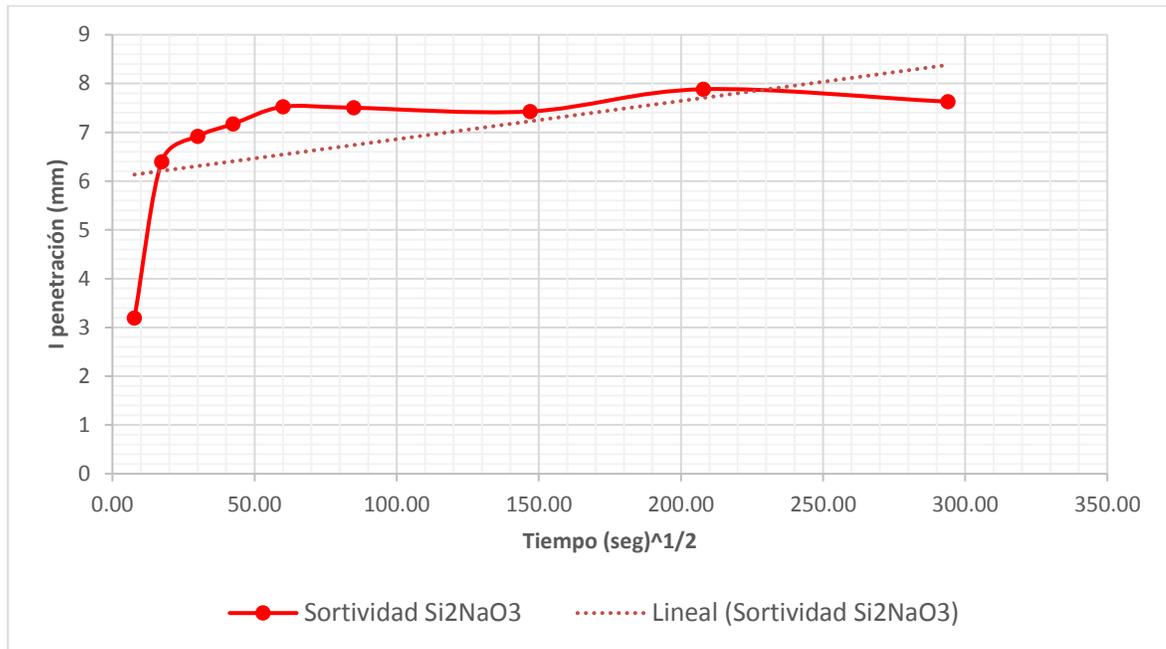
Tabla 19. Sortividad en mezcla de activado con silicato de sodio.

Sortividad Na_2SiO_3						
Tiempo (min)	Tiempo (seg)	Tiempo (seg) ^{1/2}	Masa inicial (gr)	Masa final (gr)	Δ Masa (gr)	I penetración (mm)
1	60	7,75	244,07	252,06	7,99	3,196
5	300	17,32	248,51	264,51	16	6,4
15	900	30,00	261,71	279,01	17,3	6,92
30	1800	42,43	241,3	259,23	17,93	7,172
60	3600	60,00	264,94	283,75	18,81	7,524
120	7200	84,85	255,81	274,57	18,76	7,504
360	21600	146,97	261,34	279,91	18,57	7,428
720	43200	207,85	266,38	286,09	19,71	7,884
1440	86400	293,94	244,82	263,89	19,07	7,628

Fuente: Autores

La siguiente gráfica evidencia el resultado obtenido de sortividad de la mezcla activada con Na_2SiO_3

Gráfica 14. Sortividad a muestras de mortero activadas con Na_2SiO_3



Fuente: Autores

Los anteriores valores obtenidos y mostrados en la anterior gráfica muestran como es el comportamiento que tiene la mezcla al absorber agua durante el proceso de humedecimiento, es decir, caracteriza los primeros estadios de su proceso de infiltración de agua.

Los datos tomados en este análisis se materializan en la pendiente de la curva de infiltración acumulada a los 15 minutos de iniciado el ensayo donde su valor mayor es de 7,884 mm de penetración o infiltración de agua en 12 horas de encontrarse sumergida la muestra en agua.

- Fluidez

Para evaluar la fluidez en la mezcla de mortero a base metacaolín se realizó el procedimiento descrito en la norma NTC 111 en la que se tomó una porción de la mezcla y se depositó en el cilindro de la mesa flujo, teniendo en cuenta su diámetro inicial y su diámetro final luego de ejercer el ensayo.

Figura 21. Ensayo de mesa de flujo



Fuente: Autores

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 20. Fluidez de mezcla de mortero a base MK

% FLUIDEZ NTC 111			
# MUESTRA	Diametro muestra (mm)	Diametro base molde (mm)	% FLUIDEZ
1	101,9	100	1,90
2	102,36	100	2,36
3	102,2	100	2,20
4	101,8	100	1,80
PROMEDIO	102,07	100,00	2,07

Fuente: Autores

La anterior tabla muestra los resultados del ensayo de fluidez realizado a la mezcla donde se obtiene un valor promedio de fluidez de 2,07% siendo un valor relativamente bajo comparado con valores de muestras a base de Cemento Portland que tienen una fluidez de $110 \pm 5\%$

- Absorción

Para evaluar la absorción en la mezcla de mortero a base de metacaolín se realizó el procedimiento descrito en la norma INV-E 427 en la que se sumergieron muestras normalizadas en un recipiente con agua tomando su masa con contenido de agua y luego de someterse a secado.

Figura 22. Ensayo de absorción



Fuente: Autores

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 21. Absorción de mezcla de mortero a base MK

# MUESTRA	% ABSORCIÓN INV-427		
	Masa muestra saturada (g)	Masa muestra seca (g)	% ABSORCIÓN
1	277,36	255,4	8,60
2	259,32	237,58	9,15
3	263,59	241,59	9,11
PROMEDIO	266,76	244,86	8,94

Fuente: Autores

En este caso se obtuvo una absorción promedio de 8,94% analizando la muestra saturada al someterse previamente a secado y su diferencia de masa.

10.2.3.3. Mortero convencional a base de Cemento Portland y agua

Características y variables de análisis:

Base líquida: Agua H₂O

Relación agregado–cemento: 1:3

Relación agua-cemento: 0,5.

Edades: 7 días – 14 días – 28 días

Ensayos de resistencia: Compresión y tensión

Figura 23. Muestras de mortero convencional a base de Cemento Portland y agua



Fuente: Autores

10.2.3.1.1 Resultados de evaluación de resistencia mecánica

Para la evaluación de resistencia mecánica a compresión y tensión se realizó el ensayo en una máquina universal de aplicación de carga siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220 “Determinación De La Resistencia De Morteros De Cemento Hidráulico Usando Cubos De 50 Mm o 50,8 mm De Lado” donde se establece la metodología a seguir para la determinación de la resistencia a la compresión y tensión en cubos de mortero dependiendo del tamaño elegido y además donde se determina cómo debe ser realizado el ensayo y la manera en la cual debe ser comprendido y analizado.

- Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a compresión

Figura 24. Prueba de resistencia mecánica a compresión – Mortero convencional



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras de análisis para 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

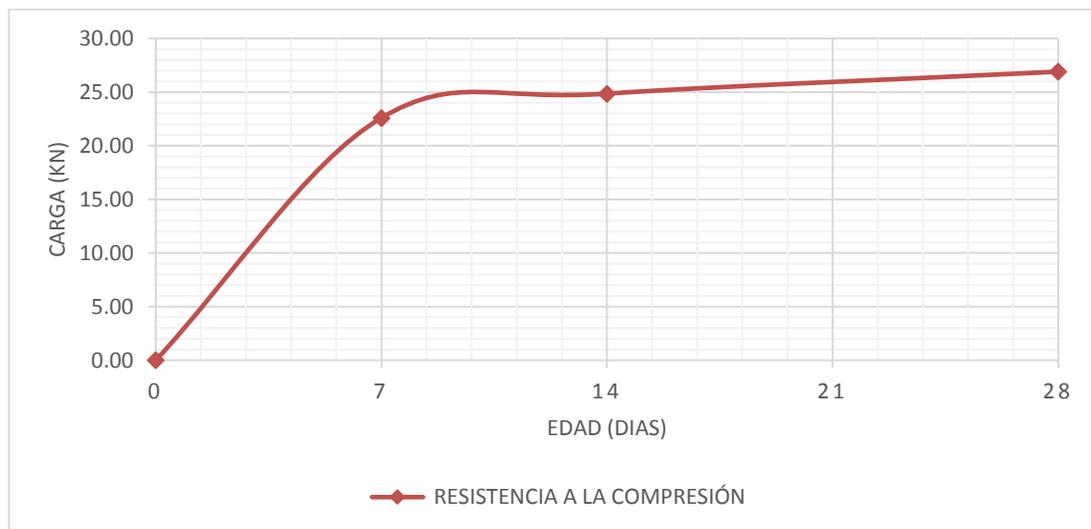
Tabla 22. Resultados de resistencia mecánica a compresión - Mortero convencional

RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	22,65	21,64	23,51	22,60
14	25,71	24,69	24,17	24,86
28	27,48	26,28	26,96	26,91

Fuente: Autores

De la anterior tabla se logró obtener la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 15. Resistencia mecánica a compresión – Mortero convencional



Fuente: Autores

Esta gráfica muestra el comportamiento que tuvo la mezcla de CP igualmente a edades de 7, 14 y 28 días de curado. Se observa que se alcanzó una máxima resistencia de 26,91 kN a 28 días.

- **Resultados obtenidos para la resistencia mecánica a tensión**

Figura 25. Probetas de resistencia mecánica a tensión – Mortero convencional



Fuente: Autores

Se elaboraron tres muestras de análisis para 7, 14 y 28 días de curado, permitiendo obtener los siguientes resultados:

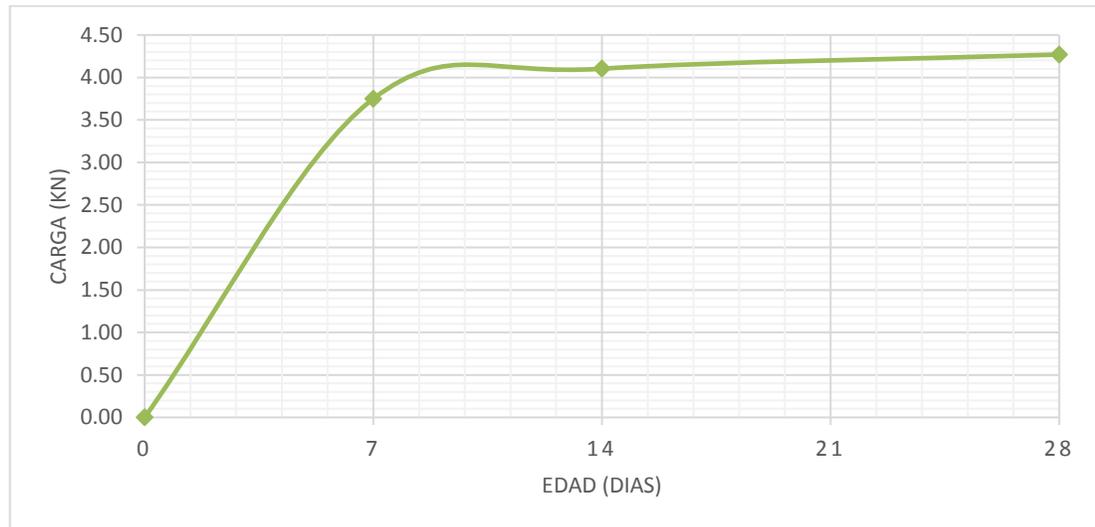
Tabla 23. Prueba de resistencia mecánica a tensión (Mortero convencional)

RESISTENCIA MECÁNICA A TENSIÓN				
Edad (días)	Carga (kN)			
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Promedio
7	3,79	3,63	3,83	3,75
14	4,41	4,12	3,78	4,10
28	4,53	3,71	4,57	4,27

Fuente: Autores

Con lo anterior se obtuvo la siguiente gráfica que muestra los resultados de carga respecto a las tres edades de análisis:

Gráfica 16. Resistencia mecánica a tensión – Mortero convencional



Fuente: Autores

La anterior gráfica muestra la resistencia mecánica a tensión de la mezcla a base de CP, analizada a 7, 14 y 28 días. Alcanzando una resistencia máxima a tensión de 4,27 kN a 28 días de curado.

10.2.3.4. Comparación de resultados de resistencia mecánica de muestras de mortero activadas alcalinamente y mortero convencional

Como resultado de la comparación de los resultados obtenidos de resistencia mecánica a compresión y tensión para las muestras de mortero a base de metacaolín activadas con hidróxido de sodio, silicato de sodio y mortero convencional de cemento Portland y agua se muestran los siguientes datos comparativos:

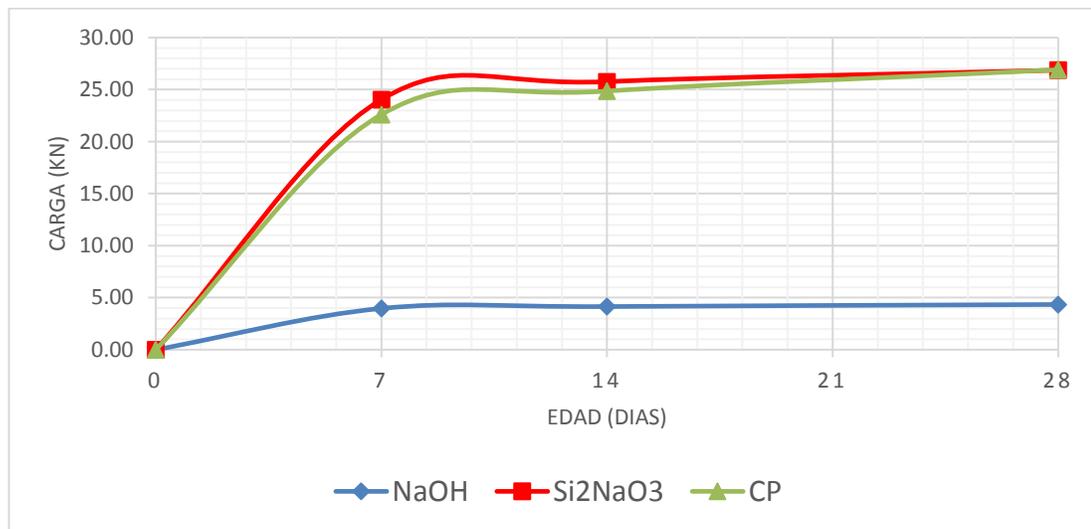
10.2.3.4.1 Comparación resultados de resistencia mecánica a compresión

Tabla 24. Tabla comparativa de resistencia mecánica a compresión

Edad (Días)	RESISTENCIA MECÁNICA A COMPRESIÓN		
	NaOH	Na ₂ SiO ₃	CP
0	0,00	0,00	0,00
7	3,97	24,04	22,60
14	4,15	25,76	24,86
28	4,34	26,87	26,91

Fuente: Autores

Gráfica 17. Gráfico comparativo de resistencia mecánica a compresión



Fuente: Autores

En la anterior gráfica se observa una comparación de las tres curvas obtenidas de resistencia mecánica a compresión para mezclas a base de MK activadas con NaOH y Na₂SiO₃ y una muestra tomada como patrón de comparación a base de CP. En ella se observa que la mezcla activada con Na₂SiO₃ tiene un comportamiento similar y casi por encima comparado con la mezcla patrón de análisis. De igual forma se observa que los valores de resistencia a compresión de la mezcla a base de NaOH se encuentra muy por debajo de la mezcla patrón.

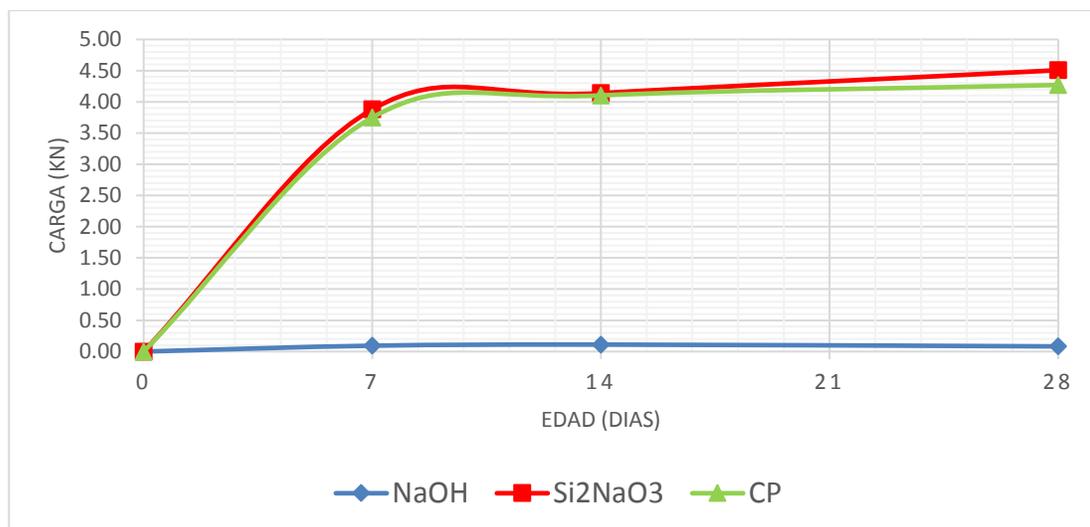
10.2.3.4.1 Comparación resultados de resistencia mecánica a tensión

Tabla 25. Tabla comparativa de resistencia mecánica a tensión

RESISTENCIA MECÁNICA A TENSIÓN			
Edad (Días)	Carga (kN)		
	NaOH	Na ₂ SiO ₃	CP
0	0,00	0,00	0,00
7	0,09	3,88	3,75
14	0,11	4,14	4,10
28	0,08	4,51	4,27

Fuente: Autores

Gráfica 18. Gráfico comparativo de resistencia mecánica a tensión



Fuente: Autores

En la anterior gráfica de igual forma se observa una comparación de las tres curvas obtenidas de resistencia mecánica a tensión para mezclas a base de MK activadas con NaOH y Na₂SiO₃ y una muestra tomada como patrón de comparación a base de CP. En ella se observa que la mezcla activada con Na₂SiO₃ tiene un comportamiento similar y superando a 28 días la resistencia comparado con la mezcla patrón de análisis. De igual forma se observa que los valores de resistencia a tensión de la mezcla a base de NaOH se encuentra muy por debajo de la mezcla patrón, siendo significativamente desfavorable en este caso.

10.3 FASE 3 - ANÁLISIS DE CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES PARA EL USO DEL MORTERO OBTENIDO

10.3.1. Ficha técnica de mortero a base de Metacaolín activado con hidróxido de sodio

Tabla 26. Ficha técnica de mortero a base de MK activado con NaOH

<i>Material cementante</i>	Geopolímero	Metacaolín
	Densidad	2,77 g/cm ³
<i>Agregado</i>	Tipo	Arena de río
	Módulo de finura	2,1
	Gravedad específica	2.62 g/cm ³
<i>Solución química de activación</i>	Hidróxido de sodio	NaOH
	Pureza	98%
	Concentración	7M
<i>Relaciones de mezcla:</i>	Agregado/Metacaolín	1:3
	NaOH/Metacaolín	0,5
<i>Temperatura</i>	Temperatura de curado	85°C
	Tiempo de permanencia a altas temperaturas	24 horas
<i>Resistencia</i>	Compresión	4,34 kN
	Edad	28 días
	Tensión	0,11 kN
	Edad	14 días
<i>Durabilidad</i>	Sortividad	Penetración máx. 4,36 mm en 24 horas



Fuente: Autores

10.3.2. Ficha técnica de mortero a base de Metacaolín activado con silicato de sodio

Tabla 27. Ficha técnica de mortero a base de MK activado con Na_2SiO_3

Material cementante	Geopolímero	Metacaolín
	Densidad	2,77 g/cm ³
Agregado	Tipo	Arena de río
	Módulo de finura	2,1
	Gravedad específica	2.62 g/cm ³
Solución química de activación	Silicato de sodio	Na_2SiO_3
	Concentración	10M
Relaciones de mezcla:	Agregado/Metacaolín	1:3
	Na_2SiO_3 /Metacaolín	0,6
Temperatura	Temperatura de curado	85°C
	Tiempo de permanencia a altas temperaturas	24 horas
Resistencia	Compresión	26,87 kN
	Edad	28 días
	Tensión	5,51 kN
	Edad	28 días
Durabilidad	Sortividad	Penetración máx. 7,884 mm en 12 horas
	Fluidez	2,07%
	Absorción	8,94%



Fuente: Autores

10.3.3. Análisis de aplicaciones del mortero obtenido en diferentes escenarios civiles y arquitectónicos

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la capacidad mecánica y durabilidad mostrada por las mezclas activadas con hidróxido de sodio y silicato de sodio, se puede enfocar el uso de este material hacia la fabricación de morteros premezclados y elementos prefabricados, esto debido a que deben ser utilizadas soluciones de cuidado especial y la mezcla debe ser sometida a un tratamiento térmico, lo cual hace que esta mezcla sea realizada en taller o laboratorio.

Su uso en el mercado se remite a elementos no estructurales tales como adoquines, bordillos, decoración estructural y productos del mobiliario urbano, esto debido a que el material presenta resistencias mecánicas óptimas para el tipo de carga a las cuales son sometidos estos elementos, presentando una mayor durabilidad de las muestras debido a la resistencia propia del material.

Por su resultado similar y casi superior en comparación con morteros a base de cemento Portland podrían desempeñar un óptimo trabajo como morteros premezclados. La norma NTC 3356 – Mortero premezclado para mampostería, establece los requisitos que debe cumplir todo mortero premezclado, seco o húmedo, empleado en la construcción de mampostería simple. Así mismo, la norma NTC 2017 – adoquines para pavimentos, fija un mínimo de módulo de rotura de 5,0 MPa a 28 días, en este caso implementando la mezcla activada con silicato de sodio cumple con el requerimiento de anterior ya que presenta un esfuerzo de más de 10 MPa a 28 días de curado.

Además, teniendo en cuenta lo anterior y como condición principal exponer las muestras a altas temperaturas, antes de su aplicación de carga mejorando su resistencia gradualmente, es un aspecto a favor que puede ser aprovechado en estructuras especiales donde se requiera o pueda estar a altas temperaturas.

10.3.4. Presentación de costos de las mezclas obtenidas a base metacaolín y su comparación con muestras de mortero convencional.

Como resultado final de todo el análisis presentado, a continuación se realiza una presentación de costos generales que incluye y describe el equipo utilizado para realizar las mezclas de mortero no convencional, los materiales requeridos y un costo por tipo de mortero ya sea activado con hidróxido de sodio o silicato de sodio y su comparación con un mortero convencional tomado como patrón de análisis. Lo anterior se representa por medio del siguiente análisis de costos unitarios:

Tabla 28. Análisis de precios unitarios

 UNIVERSIDAD La Gran Colombia		1. MATERIA PRIMA ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
ITEM	ACTIVIDAD			UNIDAD	CANT	
1	Elaboración muestras mortero			cm3	1000	
1.1 EQUIPO						
DESCRIPCIÓN	MARCA	RENDIMIENTO	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VR. TOTAL
Horno 198L, 2 kWh	Humboldt	0,24	kWh	\$ 426,56	2	\$ 204,75
Mezcladora 5 kWh	Humboldt	0,25	kWh	\$ 426,56	5	\$ 533,20
SUBTOTAL EQUIPO						\$ 737,95
1.2 MATERIALES						
DESCRIPCIÓN	TIPO	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VR. TOTAL	
Metacaolín	MK	kg	\$ 550,00	1,544	\$ 849,20	
Agregado fino	Arena de río	kg	\$ 407,50	4,631	\$ 1.887,13	
Cemento Portland	Gris	kg	\$ 480,00		\$ -	
Hidróxido de sodio	Soda caustica	kg	\$ 3.200,00		\$ -	
Silicato de sodio		gal	\$ 7.100,00	0,32	\$ 2.272,00	
Agua	-	cm3	\$ -		\$ -	
SUBTOTAL MATERIALES						\$ 2.736,33
COSTO POR TIPO DE MORTERO						
DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VR. UNITARIO	CANTIDAD	VR. TOTAL		
Mortero a base de MK activado con NaOH				\$ 3.421,08		
Horno 198L, 2 kWh	kWh	\$ 426,56	2	\$ 204,75		
Metacaolín	kg	\$ 550,00	1,544	\$ 849,20		
Agregado fino	kg	\$ 407,50	4,631	\$ 1.887,13		
Hidróxido de sodio	kg	\$ 3.200,00	0,15	\$ 480,00		
Mortero a base de MK activado con Na₂SiO₃				\$ 5.213,08		
Horno 198L, 2 kWh	kWh	\$ 426,56	2	\$ 204,75		
Metacaolín	kg	\$ 550,00	1,544	\$ 849,20		
Agregado fino	kg	\$ 407,50	4,631	\$ 1.887,13		
Silicato de sodio	gal	\$ 7.100,00	0,32	\$ 2.272,00		
Mortero convencional a base de CP				\$ 3.670,75		
Cemento Portland	kg	\$ 480,00	1,544	\$ 741,12		
Agregado fino	kg	\$ 407,50	4,631	\$ 1.887,13		
Agua	cm3	\$ 1,50	695	\$ 1.042,50		

Fuente: Autores

La anterior tabla de análisis de precios unitarios muestra lo necesario para la preparación de 1.000 cm^3 de mezcla de cada tipo de mortero y su respectivo valor en pesos colombianos. Se observa que en por cada 1.000 cm^3 de mezcla el precio varía en comparación con la mezcla patrón a base de cemento Portland, pues se tiene en cuenta que utilizar horno para el curado de las muestras es un valor agregado y diferente en la preparación una mezcla convencional.

Se observa que el mortero activado con hidróxido de sodio disminuye en \$249,67 en comparación con el mortero de CP, por el contrario la mezcla de mortero activada con silicato de sodio eleva el costo en \$1.524,33. Lo anterior determina que la mezcla con NaOH es óptima para su aplicación en cuanto a costo, teniendo en cuenta que no tiene la mejor resistencia de las tres mezclas. Así mismo, la mezcla de Na_2SiO_3 presenta comportamientos más favorables en cuanto a su resistencia comparada con el CP, su costo es más elevado, por lo que se recomienda seguir investigando en este activante alcalino con el fin de mitigar la implementación de horno.

11. CONCLUSIONES

De acuerdo a la investigación realizada se evidencia que las soluciones activantes de NaOH y Na₂SiO₃ generan un mejor desempeño de propiedades mecánicas en altas concentraciones, particularmente el Na₂SiO₃ brinda una mayor resistencia mecánica, lo cual tiene concordancia con los antecedentes y la teoría analizada, ya que por la naturaleza del metacaolín, es un material con alto contenido de sílice y propicia una mejor reacción con esta sustancia.

Las relaciones de agregado, activante y material cementante determinadas, son similares a las relaciones utilizadas en las mezclas de mortero con cemento Portland convencional, con lo cual se demuestra que el material cementante tiene un comportamiento similar al del cemento en la matriz aglutinante; debido a esto lo más apropiado es utilizar la mezcla de mortero con metacaolín.

Se logró determinar que para lograr mejores resultados en la activación alcalina de los materiales empleados en esta investigación, se requiere trabajar un gradiente térmico entre los 60 °C y los 100 °C. Además de tener en cuenta la edad de desmolde de las muestras, y el tiempo necesario para que la mezcla tenga un fraguado y se puedan generar las reacciones químicas necesarias para este proceso.

Analizando la matriz de mezcla óptima para ambos tipos de mezcla se determina que necesariamente para mezclas activadas con hidróxido de sodio, se debe tener una concentración de 7M de NaOH, relación MK/agregado de 1:3, relación NaOH/MK de 0,5 y temperatura de curado de 85°C. Por otro lado mezclas activadas con silicato de sodio, deben tener una concentración de 10M de Na₂SiO₃, relación agregado/MK de 1:3 igualmente, relación Na₂SiO₃/MK de 0,6 y temperatura de curado de 85°C.

Teniendo en cuenta la mezcla óptima que se determinó para cada tipo de activante alcalino, se obtuvieron resultados de resistencia mecánica a compresión de 1,73 MPa y 10,7 MPa para mezclas con NaOH y Na₂SiO₃ respectivamente. La resistencia mecánica a tensión obtenida fue de 0,04 MPa para mezclas con NaOH y 1.80 Mpa para mezclas con Na₂SiO₃.

La diferencia de resistencia mecánica en las muestras de NaOH y Na₂SiO₃ son hasta del 78%, en ambas mezclas se observa un resultado elevado de resistencia a temprana edad, lo cual es coherente con la teoría y las investigaciones anteriores, esto debido a que el Na₂SiO₃ tiene la capacidad de producir

rápidamente enlaces con un alto contenido en Silicio con el metacaolin los cuales contribuyen significativamente en la resistencia mecánica del material.

Al someter las muestras a pruebas de permeabilidad se identificó que las mezclas de NaOH tienen una mejor respuesta a la penetración inicial, la cual es menor, pero al transcurrir las horas se observa que la velocidad de penetración aumenta y se mantiene; las muestras de Na_2SiO_3 tiene un comportamiento inverso, en cuanto a la absorción de las mezclas poseen una absorción baja, lo cual nos permite caracterizarlas como cementos de permeabilidad moderada.

12.RECOMENDACIONES

El tema de los materiales alternativos al cemento Portland debe ser investigado con un mayor detalle ya que la variabilidad en su composición química y mineralógica del precursor, modifica en gran medida los resultados de resistencia, es necesario realizar pruebas que involucren la química propia del material así como las reacciones generadas en la matriz del aglutinante, entender estas propiedades permiten realizar mejores diseños que conllevan a obtener propiedades físico-mecánicas más ajustadas para un aprovechamiento óptimo del material.

El método de curado en la mezcla es un parámetro determinante en las propiedades del material, pero el uso de energía en este hace que se eleve su costo y se produzca contaminación, se recomienda investigar alternativas que permitan mitigar el uso del horno aprovechando la naturaleza exotérmica de la mezcla, así como la importancia de la temperatura y la duración en el método de curado.

De otra parte, analizar la metodología de realización de la mezcla es un parámetro indispensable en materiales alternativos esto debido a que el número de variables presentes en la elaboración del cemento junto con la dificultad en la plena comprensión de los procesos químicos que se desarrollan y las reacciones, hacen difícil definir estándares que garanticen la calidad. Ya que no es posible seguir las normas vigentes aplicadas al cemento convencional, debido a que su comportamiento no es igual; por tanto, es necesario analizar la forma de compactación de la mezcla, así como la carga que se aplica, esto es una variable determinante en la resistencia mecánica que brinda el material.

La influencia de la humedad en la mezcla es un parámetro determinante en las mezclas de NaOH, ya que esta condiciona la capacidad de la mezcla en la resistencia, mientras que en el Na_2SiO_3 no es un parámetro determinante, es necesario analizar el porqué de esta variable, ya que este comportamiento condiciona el tipo de uso que puede tener el material.

Los avances en las técnicas de caracterización (espectroscopia de resonancia magnética nuclear con núcleos ^{27}Al y ^{29}Si , infrarroja con transformada de Fourier, Microscopia electrónica de barrido, etc.), Ha permitido una comprensión más profunda de la nano estructura y micro estructura, pero no toda. La interpretación de los espectros no siempre es sencilla

13.BIBLIOGRAFÍA

- ALVAREZ MANTILLA H. Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Trabajo de Grado. Geólogo. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímica: 2010.
- DE SILVA Y SAGOE-CRENTSIL K. "The effect of Al₂O₃ and SiO₂ on setting and hardening of Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O, geopolymer system", J Aust Ceram Society. 2008.
- J. ESCALANTE, A. NAVARRO, L.Y. GÓMEZ. "Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza". México, revista ALCONPAT Volumen 1, Número 2, Mayo-Agosto 2011.
- JONES T.R. Metakaolin as a pozzolanic addition to concrete. Structure & Performance of cements, Ed. Bensted J and Barnes P, Spon Press; Chapter fifteen, 2001.
- JUSTICE, J. M.; KENNSION, L. H.; MOHR, B. J.; BECKWITH, S. L.; MCCORMICK, L. E.; WIGGINS, B.; ZHANG, K. Z. Z.; KURTIS, E. "Comparison of two metakaolins and a silica fume used as supplementary cementitious materials". SP-228, ACI, Farmington Hills, Mich. 2005
- R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ; S. DELVASTO Y R. TALERO. "Una nueva puzolana para materiales cementicios de elevadas prestaciones". Madrid, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Materiales de Construcción, 50(259) 2000.
- M. MONZÓ, A. FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, M. VICENT, A. PALOMO, A. BARBA.: "Activación alcalina de metacaolín. Efecto de la adición de silicato soluble y de la temperatura de curado". Sociedad Española de cerámica y vidrio. Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 47. (2008)
- J. MOYA. "Últimos avances sobre el tratamiento térmico del caolín: Formación o no de puzolanas artificiales". Madrid: Memorias Congreso Puzolanas Naturales, Cenizas Volantes y Similares en la Construcción, Cemento y Hormigón, 1998.
- SABIR, B. B.; WILD, S.; BAI, J: "Metakaolin and calcined clay as pozzolans for concrete: a review", Cement and Concrete Composites, vol. 23. 2001
- SALAS, J. TORRES, R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ, S. DELVASTO. "Engineering properties of blended concrete with Colombian rice husk ash and metakaolin." Universidad del Valle, Colombia. Revista Ingeniería y Competitividad, Volumen 15, No. 2. 2013



- SANCHEZ DE GUZMAN D. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá: Bhandar Editores, 1996