

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN EN
MORTEROS ELABORADOS CON GEOPOLÍMEROS A BASE DE CENIZA
VOLANTE Y METACAOLÍN ACTIVADOS ALCALINAMENTE**

**ANGIE SHIRLEY ARIAS PRIETO
JUAN FELIPE BECERRA AYALA**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2017

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN EN
MORTEROS ELABORADOS CON GEOPOLÍMEROS A BASE DE CENIZA
VOLANTE Y METACAOLÍN ACTIVADOS ALCALINAMENTE**

**ANGIE SHIRLEY ARIAS PRIETO
JUAN FELIPE BECERRA AYALA**

**Trabajo de grado para optar el título de:
Ingeniero Civil**

**MSc. Ing. Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres
Asesor Disciplinar**

**Lic. Laura Milena Cala Cristancho
Asesora Metodológica**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2017

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primera instancia por guiarme en mi camino, a mis padres por el apoyo durante todo el proceso, a Juan Carlos por la ayuda y el apoyo, al ingeniero Arnold Gutiérrez por ayudarnos y colaborarnos durante el desarrollo de la investigación, por último, pero no menos importante, a mi compañera por realizar este proceso conmigo y por todo el apoyo durante la carrera.

Felipe Becerra

Quiero agradecer en primera instancia a Dios por permitirme culminar este proceso tan importante en mi carrera, a mis padres y mi hermana por estar siempre apoyándome en todo a pesar de las dificultades, a mis asesores, el ingeniero Arnold Gutiérrez por todo el apoyo que nos brindó en la investigación y por confiar en nosotros para ser sus pupilos, a la licenciada Laura Cala por apoyarnos y darnos ánimos en los momentos difíciles y, finalmente a mi compañero de investigación, por su constancia y apoyo en todo el proceso de la investigación y de la carrera.

Angie Arias

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
1.1 PREGUNTA PROBLEMA	14
2. ANTECEDENTES	15
3. JUSTIFICACIÓN	21
4. OBJETIVOS	23
4.1 OBJETIVO GENERAL	23
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	23
5. MARCO DE REFERENCIA	24
5.1 MARCO CONCEPTUAL	24
5.1.1 Cemento Portland.....	24
5.1.2 Puzolana	25
5.1.3 Adiciones Minerales Puzolánicas.....	26
5.1.4 Activadores alcalinos	29
5.1.5 Geopolímeros	31
5.1.6 Mortero	32
5.2 MARCO LEGAL.....	38
5.2.1 NTC 3493 “Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto”	39
5.2.2 NTC 220 “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8 mm de lado”	39
5.2.3 NTC 121 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland.	

Especificaciones Físicas Y Mecánicas”.....	39
5.2.4 INV-E 324-07 “Resistencia a la Flexión de Morteros de Cemento Hidráulico”.....	40
5.2.5 RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras)	40
6. DISEÑO METODOLÓGICO	41
6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	41
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN	41
6.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN .	42
6.4 DEFINICIÓN Y OPERACIONES DE LAS VARIABLES	42
6.5 FASES DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
6.5.1 Diagramas de flujo para la fases de investigación	44
7. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	48
7.1 RECONOCIMIENTO DE LA MOLARIDAD ÓPTIMA DE LOS ACTIVADORES ALCALINOS Y EL PORCENTAJE DE COMBINACIÓN ENTRE LOS GEOPOLÍMEROS.....	48
7.1.1 Caracterización de la materia prima a utilizar en la elaboración de pastas	48
7.1.2 Realizar pastas con geopolímeros.....	54
7.1.3 Ceniza Volante + Metacaolín (CV + MK)	59
7.2 ESTABLECER EL PORCENTAJE DE CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE SODIO PARA REALIZAR CUBOS DE MORTERO.....	64
7.2.1 Realizar cubos de morteros y someterlos a ensayo de compresión con diferentes porcentajes de concentración de Na_2O	64
7.2.2 Matriz de resultados	73
7.2.3 Definir la dosificación del material óptimo	75
7.2.4 Realizar viguetas de mortero y someterlas a ensayo de flexión con la dosificación de material óptimo de los cubos de mortero.	76
7.3 COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN DEL MORTERO ELABORADO CON GEOPOLÍMEROS ACTIVADOS ALCALINAMENTE Y EL MORTERO CONVENCIONAL	77
7.3.1 Comparación de los morteros elaborados con geopolímeros y cemento	

convencional	77
7.3.2 Comparación de la resistencia a compresión de los morteros elaborados con geopolímeros y cemento convencional en curado en agua salada	79
8. CONCLUSIONES	81
RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Resistencia a compresión de mortero	20
Ilustración 2. Diagrama de fase $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Localización de materiales puzolánicos	26
Ilustración 3. Resistencia a la flexión en tres y cuatro puntos.....	36
Ilustración 4. Diagrama del diseño metodológico. Fase 1	45
Ilustración 5. Diagrama del diseño metodológico. Fase 2	46
Ilustración 6. Diagrama del diseño metodológico. Fase 3	47
Ilustración 7. Muestra de Ceniza Volante	49
Ilustración 8. Muestra de Metacaolín.....	51
Ilustración 9. Muestra original de hidróxido de sodio	53
Ilustración 10. Muestra original del silicato de sodio.....	54
Ilustración 11. a) Mezcla de la pasta de CV y activador y, b) Pastas de CV activadas alcalinamente.	54
Ilustración 12. Prueba de resistencia a compresión en pastas de CV activadas con a) $\text{NaOH} - 6 \text{ mol}$ y b) Na_2SiO_3	56
Ilustración 13. Pastas de Ceniza volante a distintas molaridades.	57
Ilustración 14. Pastas de CV y MK activadas alcalinamente con diferentes soluciones.	59
Ilustración 15. Ensayo de flexión en viguetas con 95% CV - 5% MK activadas alcalinamente con una solución de $\text{NaOH} (8 \text{ mol}) - \text{Na}_2\text{SiO}_3$	76

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Resistencia a Compresión de pastas de ceniza volante en relación 1.5	57
Gráfica 2. Resistencia a Compresión de pastas de ceniza volante elaboradas con concentración de 5 mol de NaOH.	58
Gráfica 3. Resistencia a Compresión de pastas de 70% CV y 30% MK activadas a diferentes molaridades.	60
Gráfica 4. Resistencia a Compresión de pastas de 30% CV y 70% MK activadas a diferentes molaridades y relaciones	62
Gráfica 5. Resistencia a Compresión de pastas de 50% CV y 50% MK activadas a diferentes molaridades	63
Gráfica 6. Resistencia a compresión con concentración del 5.5%.....	67
Gráfica 7. Resistencia a compresión de cubos de mortero de 100% CV – 0% MK con concentración de Na ₂ O de 15% y 20%	69
Gráfica 8. Resistencia a compresión con concentración de 15%	71
Gráfica 9. Resistencias a compresión con 12% de concentración.....	72
Gráfica 10. Resistencia a compresión en morteros activados alcalinamente con concentración de Na ₂ O de 15%	73
Gráfica 11. Resistencia a compresión de 10 muestras de cubos de mortero activados alcalinamente a edades de 1, 3, 7 y 28 días	75
Gráfica 12. Resistencia a Compresión de CV-MK y CP	78
Gráfica 13. Comparación de la Resistencia a Flexión	79
Gráfica 14 Resistencia a compresión en CV-MK y CP curadas en agua salada ..	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variables de la investigación	42
Tabla 2. Caracterización química de la ceniza volante - FRX.....	49
Tabla 3. Caracterización química del metacaolín - FRX.....	51
Tabla 4. Ficha técnica del Silicato de sodio.....	53
Tabla 5. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con Ceniza Volante.....	55
Tabla 6. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con Ceniza Volante.....	56
Tabla 7. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con 70% CV y 30%MK.60	60
Tabla 8. Resistencia a Compresión para porcentajes del 30% CV y 70% MK.....	61
Tabla 9. Resistencia a Compresión de pastas realizadas en combinación de 50% CV y 50% MK.....	62
Tabla 10. Dosificación cubos de mortero de 50x50 mm con base en la concentración de Na ₂ O	64
Tabla 11. Muestras realizadas con diferentes soluciones activadoras y concentraciones de Na ₂ O.	65
Tabla 12. Muestras elaboradas con porcentajes 50/50 CV-MK y 70/30 CV-MK...	66
Tabla 13. Muestras realizadas con concentración del 5.5%	66
Tabla 14. Muestra realizada con 10% de Concentración de Na ₂ O.....	68
Tabla 15. Resistencia a Compresión de cubos de mortero con 100%CV – 0%MK con concentraciones de Na ₂ O de 15% y 20%	69
Tabla 16. Resistencia a compresión de cubos de mortero con concentración de Na ₂ O del 15%	71
Tabla 17. Resistencia a compresión de cubos de mortero con concentración de Na ₂ O del 12%.....	72
Tabla 18. Recuento de resultados en muestras de morteros elaboradas con CV - MK activados alcalinamente.....	74
Tabla 19. Resistencia a la flexión en viguetas de morteros activados alcalinamente	

.....	76
Tabla 20. Resistencia a compresión de muestras elaboradas con CV-MK y CP ..	77
Tabla 21. Resistencia a Flexión en CV-MK y CP	78
Tabla 22 Resistencia a compresión en CV-MK y CP curadas en agua salada.....	80

INTRODUCCIÓN

Desde tiempo atrás, una de las necesidades del hombre ha sido la vivienda y los caminos de acceso, donde se utilizan diferentes materiales para su fabricación y dentro de los cuales se encuentra principalmente el cemento, siendo éste un problema para el medio ambiente debido a los materiales que lo componen, como lo son el Yeso y el Clinker, donde este último es el responsable de más del 5% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a nivel mundial¹ aunque otros estudios llegan a elevar dicha cifra al 8%, debido a que el 90% de estas emisiones son a causa de su producción², ya que dicha producción involucra altas temperaturas en los hornos rotatorios. En la búsqueda de mejorar este aspecto, se ha venido plateando alternativas de materiales cementantes que tengan bajas emisiones de efecto invernadero en su fabricación, que requieran un menor consumo energético y que además posean propiedades similares o mejores a las del cemento Pórtland, por lo tanto, se busca implementar residuos industriales que ayuden a minorar estos efectos negativos al medio ambiente.

En este sentido, se tiene como idea utilizar puzolanas naturales, las cuales son subproductos provenientes de procesos industriales, como la ceniza volante, la escoria de alto horno, el metacaolín, entre otros. Debido a su proceso industrial, estos materiales poseen propiedades estructurales óptimas en la construcción de morteros, tales como, alta resistencia mecánica a temprana edad, mayor durabilidad, resistencia a la corrosión, entre otras cosas.

¹ MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de pb–zn. Trabajo de grado Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción. Monterrey. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 2015. 4 p.

² VILLAMOR LORA, Álvaro. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz. Trabajo de grado Ingeniero en Tecnologías Industriales. Sevilla. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. 2016. 25 p.

Por tal razón, este trabajo de grado está orientado en implementar geopolímeros a base de Ceniza Volante y Metacaolín activados alcalinamente con Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) como uso alternativo del cemento Pórtland para la elaboración de morteros, donde posteriormente se analizará la resistencia a compresión y a flexión en los mismos.

Para lograr este propósito, se estructuro el trabajo en cuatro momentos: el primero busca caracterizar las materias primas utilizadas en la preparación de los especímenes (morteros), en un segundo momento se determina la molaridad óptima de los activadores alcalinos NaOH y Na_2SiO_3 , y el porcentaje de combinación entre los precursores en las pastas elaboradas, para así llegar a un tercer momento que permitirá establecer la concentración de óxido de sodio (Na_2O) y el porcentaje de combinación entre los geopolímeros para realizar cubos y viguetas de mortero, permitiendo este proceso llegar a un cuarto momento que pretende comparar las propiedades mecánicas, la resistencia a compresión y a flexión, de morteros geopoliméricos y morteros convencionales.

Una vez finalizados los cuatro momentos se espera contar con la información suficiente que permita analizar cuál es la mezcla más óptima para el reemplazo del cemento Pórtland cumpliendo con las especificaciones estructurales expuestas en las Normas Técnicas Colombianas (NTC), donde se evaluarán las propiedades mecánicas (compresión y flexión) en comparación con el cemento Pórtland convencional.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento poblacional y el desarrollo en el área de la construcción han venido de la mano desde tiempo atrás, debido a que el hombre vio la obligación de suplir sus necesidades básicas, tales como, vivienda, vías o carreteras de acceso, sistemas de acueductos, entre otras, y una de las características principales de estas construcciones se centra en la utilización de materia prima en grandes proporciones como lo es agua, material cementante, agregados finos y agregados gruesos, principalmente, donde dicha materia prima son recursos no renovables. Estas obras en el pasado solían tener periodos más largos para su culminación lo que llevo a la búsqueda de mejorar los tiempos de ejecución con la implementación de distintos materiales, principalmente los que poseen los morteros y hormigones. Pero es la producción de dicho material cementante el que está generando emisiones contaminantes en el aire, ya que su fabricación depende de la explotación de canteras donde se extrae la caliza y la arcilla, una vez transportados estos minerales a la planta se les aplica un proceso de trituración, homogenización y calcinación³ para obtener el Clinker —principal ingrediente del cemento—⁴; dicha calcinación es la que está afectando el medio ambiente por las altas temperaturas que alcanza, 1450 °C. De forma cuantitativa, los datos actuales indican que la industria del cemento es la causante de las emisiones de 2×10^9 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) al año, siendo esta cantidad un poco superior al 5% de las emisiones totales, y se espera que para el año 2050 las emisiones sean de 5×10^9 toneladas⁵.

³ CEMEX S.A.B. Cómo hacemos cemento [en línea], [consultado 08-09-2016]. Disponible en Internet: <http://www.cemex.com/ES/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx>

⁴ CEMEX S.A.B. Productos y servicios: Cemento [en línea], [consultado 13-07-2017]. Disponible en Internet: <http://archive.cemex.com/ES/ProductosServicios/Cemento.aspx>

⁵ VILLAMOR LORA, Álvaro. Op. cit., 13 p.

Por lo tanto, es pertinente investigar distintos materiales que mitiguen la contaminación al medio ambiente y que a su vez posean propiedades mecánicas y de durabilidad, similares o mejores que las del cemento convencional. Para efecto de esta investigación se utilizará como precursores la Ceniza Volante Tipo F, residuo industrial procedente de la termoeléctrica TERMOPAIPA, y el Metacaolín, procedente de KAOLIN S.A.S., el cual es un residuo de la quema de la arcilla caolinita; estos materiales se activarán alcalinamente y serán usados para sintetizar los geopolímeros, donde finalmente se empleará como alternativa del cemento Pórtland para la producción de morteros con el fin de mejorar las propiedades existentes de los convencionales, y determinar la viabilidad estructural del mismo.

Con lo anterior, se busca fabricar una mezcla la cual posea propiedades mecánicas de compresión y flexión y, durabilidad que cumplan con las normas técnicas de construcción pero que al mismo tiempo sea viable, competitiva, innovadora y que esté a la vanguardia con los problemas actuales.

1.1 PREGUNTA PROBLEMA

¿Cuál es la mezcla óptima de los materiales precursores, Ceniza Volante y Metacaolín activados alcalinamente, que permita obtener resistencias a compresión y a flexión similares o superiores a las del cemento convencional para ser empleado como uso alternativo?

2. ANTECEDENTES

El término geopolímero fue dado en la década de 1970 por el científico e ingeniero francés Joseph Davidovits, quien lo aplicó a una clase de materiales sólidos sintetizados por la reacción de un polvo de aluminosilicato con una solución alcalina.⁶ En 1975, en el laboratorio CORDI, Davidovits descubrió un potente aglutinante líquido geopolimérico a base de metacaolín y silicato alcalino soluble, y encontró que al fabricar zeolitas sintéticas combinando metacaolín e hidróxido de sodio generaba una importante reacción exotérmica, lo que al curarlas rápidamente a más de 120 °C endurecía después de 2 minutos.⁷ Al adicionar silicato de sodio lleva a reducir la cantidad de mineral utilizado en el proceso, y al mezclar silicato de sodio + hidróxido de sodio + Metacaolín tiene por ventajas el endurecimiento interno del material sólido y el endurecimiento rápido del aglutinante líquido.⁸

En 1983, el principal fabricante de cemento en América, la industria Lone Star formó una corporación con la compañía Shell Oil para desarrollar, producir y comercializar una nueva clase de materiales a base de aglomerantes geopolímeros, pero fue Davidovits y Sawyer quienes desarrollaron los primeros aglomerantes geopolímeros de alta resistencia y cementos basados en química de cemento geopolimérico e hidráulico. Pero en 1984, en la industria Lone Star, Richard Heitzmann y James Sawyer mezclaron cemento Portland con geopolímero, donde su principal propósito fue aprovechar las buenas propiedades

⁶ DAVIDOVITS, J. Synthetic mineral polymer compound of the silicoaluminates family and preparation process, Citado por PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.) Introduction to geopolymers. En: Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 1.

⁷ DAVIDOVITS, Joseph. Polymers and Geopolymers. Introduction. En: Geopolymer Chemistry and Applications. 3 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011. p. 6.

⁸ *Ibíd.*, p. 6.

del cemento geopolimérico junto con el bajo costo de fabricación del cemento Pórtland. El nuevo cemento alcanzó una resistencia a compresión de 20 MPa después de 4 horas, mientras que el cemento convencional llegó a esta resistencia después de varios días. En cuanto a las emisiones de CO₂ se logró mitigar el efecto invernadero con la producción de cementos geopoliméricos, los cuales tienen un bajo contenido de CO₂. En 1990, Joseph Davidovits comenzó con la aplicación de ese geopolímero, el cual generaba 0.180 toneladas de CO₂ con la producción de 1 tonelada de cemento geopolímero basado en caolín, en comparación con la producción de cemento Pórtland que produce 1 tonelada de CO₂, el nuevo cemento produce seis (6) veces menos CO₂.⁹ El cemento geopolímero basado en cenizas volantes ha desarrollado un importante campo de investigación porque emite menos CO₂, hasta nueve (9) veces menos que el cemento Pórtland.¹⁰ Posterior a esto, desarrollo morteros a base de ceniza volante activada alcalinamente, lo que ya había denominado como geopolímero en los años de los 70, siendo un material compacto que se caracteriza por las propiedades ligantes y grandes propiedades mecánicas¹¹.

Durante 1965, Glukhovsky a partir de sus investigaciones previamente realizadas en construcciones antiguas de Roma y Egipto, descubrió la posibilidad de producir un nuevo tipo de cementos a base de aluminosilicatos con bajos contenidos de calcio a los cuales nombró “geocementos” o precursores zeolíticos¹². Glukhovsky

⁹ *Ibíd.*, p. 8 – 10.

¹⁰ DAVIDOVITS, J. Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement, Citado por DAVIDOVITS, Joseph. Polymers and Geopolymers. Introduction. En: Geopolymer Chemistry and Applications. 3 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011. p 11.

¹¹ PALOMO A. F. "Geopolímeros": una única base química y diferente micro estructuras, Citado por ROBAYO NUÑEZ, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. 2013, 23 p.

¹² GLUKHOVSKY, V. Soil silicates. Their properties, technology and manufacturing and fields of application, Citado por MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de pb-zn.

fue el primero que supone que, el proceso geológico de las transformaciones de varias rocas volcánicas en zeolitas que tienen lugar durante la formación de rocas sedimentarias a bajas temperaturas y presión, podría ser modelado y llevado a cabo en los sistemas cementantes¹³.

Por otro lado, en Indonesia y Australia, tres investigadores, Wardhono, Law y Strano¹⁴ determinaron las características de la utilización de materiales como la escoria de alto horno y cenizas volantes, para dar un material más responsable con el ambiente, ellos desarrollaron varios cilindros con proporciones diferentes de ceniza volante y escoria de alto horno, los cuales fueron activados alcalinamente para el mejoramiento de las propiedades. Los cilindros fueron ensayados de acuerdo con la NSR-10 utilizando un periodo de tiempo de 3, 7, 14 y 28 días para verificar las características obtenidas en los ensayos. Las mezclas con ceniza volante demostraron una mejor resistencia a la compresión a edad temprana que las mezclas realizadas con escoria de alto horno, aunque a los 28 días una mezcla presenta una reducción en la resistencia, esto se debe a que se presentaron micro-grietas dentro de los cilindros realizados, lo que demostró que dichas micro-grietas se volvieron más grandes a través del tiempo.

En la búsqueda del mejoramiento de las propiedades evaluadas a los 28 días y de acuerdo con lo dicho anteriormente, llegaron a la conclusión de que la utilización de las cenizas volantes y la escoria de alto horno como reemplazo para el cemento portland pueden reducir potencialmente el impacto ambiental de la producción de CO₂. La mezcla elaborada con 100% de escoria tuvo una mala

Trabajo de grado Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción. Monterrey. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 2015. 6 p.

¹³ GLUKHOVSKY, V. In: Proceedings of the 2nd International Seminar on "Some Aspects of Admixtures and Industrial By-Products on the Durability of Concrete". Op. cit., 6 p.

¹⁴ WARDHONO, Arie et al. La fuerza de escoria activada alcalinamente / Cenizas volantes de mortero se mezcla a temperatura ambiente. En: Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. p. 650 – 656.

resistencia a compresión a los 28 días, en cambio las mezclas de 50% escoria de alto horno y 50% ceniza volante obtuvieron la mayor resistencia a compresión a los 28 días sin que ésta desmejorara con el tiempo.

En cuanto a las condiciones de temperatura y tiempo de curado consultados, éstas son variadas. Inicialmente estudios realizados por Davidovits proponían temperaturas inferiores a los 100 °C, sin embargo en estudios recientes la temperatura puede variar entre 40, 60 y 85 °C¹⁵. Entre los cuales están: Bonilla, J. y Niño, S.¹⁶ con una temperatura empleada de 85 °C en geopolímeros sintetizados con MK y donde los resultados no fueron favorables, Millán, G.¹⁷, empleo tres temperaturas de curado en geopolímeros de escorias de fundición de concentrados de PB–ZN: con 80 °C presento propiedades físicas poco favorables, con 23 °C alcanzó resistencias mayores a 40 MPa a los 28 días y con 53 °C obtuvo resultados no prometedores, Villamor, A.¹⁸, empleo 60 °C en geopolímeros sistetizados con ceniza volante y ceniza de cascarilla de arroz dando resultados de resistencias favorables, Robayo, E.¹⁹, empleo una temperatura de 60 °C en cenizas volantes activadas alcalinamente pero sin resultados óptimos, Fernandez,

¹⁵ MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de pb–zn. Trabajo de grado Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción. Monterrey. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 2015. 13 p.

¹⁶ BONILLA AGUDELO, Julián David y NIÑO SOTELO, Sindy Paola. Estudio de la resistencia mecánica a compresión, tensión y durabilidad, en morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir de metacaolín. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad La Gran Colombia. 2017. 82 p.

¹⁷ MILLÁN CORRALES, Guadalupe. Op. Cit., 91-92 p.

¹⁸ VILLAMOR LORA, Álvaro. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz. Trabajo de grado Ingeniero en Tecnologías Industriales. Sevilla. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. 2016. 68 p.

¹⁹ ROBAYO NUÑEZ, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. 2013, 71 p.

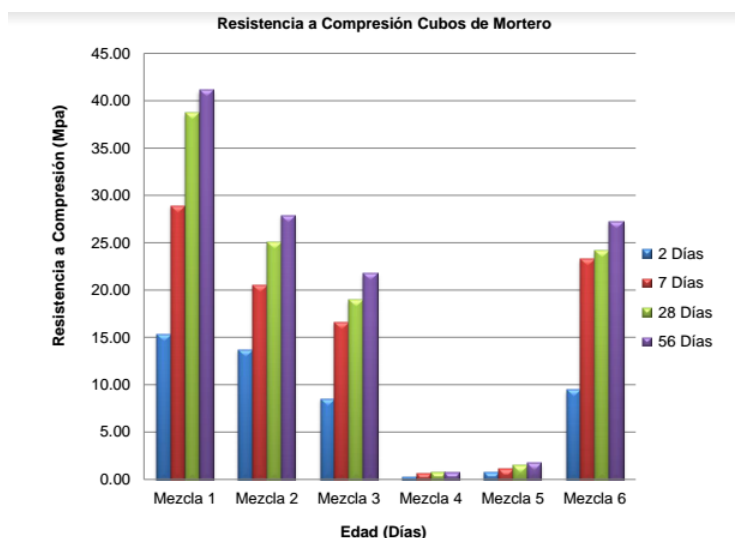
A., Palomo, A. y Criado, M²⁰ emplearon una temperatura de 85 °C demostrando bajas resistencias a compresión, entre otros tantos.

Por otro lado, en la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana, Robayo Estefanía²¹, realizó morteros a base de ceniza volante activada con Hidróxido de sodio (NaOH) y Silicato de sodio para determinar diferentes propiedades, dentro de ellas la compresión y así establecer si la implementación de este material serviría para el uso en la construcción, con la realización de una comparación con cementos tipo I y III; ella decide realizar 6 mezclas donde suministra diferentes proporciones de activador y la sustitución del cemento en un 100% con ceniza volante como remplazo al del cemento portland, estas mezclas son las siguientes: La mezcla 1 utiliza un 100% de cemento portland tipo III, Mezcla 2 un 100% Ceniza Volante activada con 100% de NaOH, la Mezcla 3 100% Ceniza Volante activada con 75% de NaOH y un 25% Silicato de sodio, Mezcla 4 es de 100% Ceniza Volante activada con 50% NaOH y 50% de Silicato de Sodio, Mezcla 5 100% Ceniza Volante activada con 25% de NaOH y 75% de Silicato de Sodio, por último se tiene la Mezcla 6 donde es 100% cemento portland tipo I. Con las mezclas realizadas procedió a la ejecución del ensayo a compresión, donde concluyo que al emplear la mezcla 2 poseía resistencias por encima de 15 MPa y 24 MPa para 7 y 28 días, respectivamente, de acuerdo a lo estipulado en la NTC 121 para un cemento tipo I (ver ilustración 1).

²⁰ FERNÁNDEZ JIMENEZ, A., PALOMO, A. y CRIADO, M. Activación alcalina de cenizas volantes. Estudio Comparativo entre activadores sódicos y potásicos. Madrid: Materiales de construcción, 2006. Vol. 56 (281). p. 63. ISSN 0465-2746.

²¹ ROBAYO NUÑEZ, Estefanía. OP. CIT., 79 p.

Ilustración 1. Resistencia a compresión de mortero



Fuente: ROBAYO NUÑEZ, Estefanía

Seguidamente, en la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Leeds en Reino Unido los investigadores Richardson, Girao, Taylor y Jia²² analizaron la hidratación que obtendrán las mezclas de cemento portland y ceniza volante activados alcalinamente, ellos realizaron mezclas con diferentes porcentajes de los dos materiales utilizados para obtener una alta hidratación, ya que esto influye en la resistencia que tendrá el material al final de su secado; obtuvieron que la mezcla de 70% cemento portland y 30% de ceniza volante activados alcalinamente con silicato, tiene hidratación rápida a edad temprana lo cual favorece la relación agua/cemento, obteniendo también altas resistencias en un periodo de tiempo menor que el del cemento portland normal.

²² RICHARDSON I.G. et al. La hidratación de agua y álcali-activa pastas de cementos Portland blanco y se mezcla con pulverizado baja en calcio ceniza de combustible. En: Cemento y hormigón de investigación. 2016. Vol. 83. p. 4.

3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación está basada en la búsqueda de un nuevo material cementante, el cual pueda ser utilizado en el campo de la construcción como uso alternativo al cemento portland, esto se debe a que actualmente en la construcción mundial es el material más utilizado y es uno de los mayores productores de contaminación debido a su proceso de fabricación. A nivel nacional, la producción de cemento en agosto del 2017, fue de 1'034.800 toneladas²³, lo que equivale aproximadamente a 0.98 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂), que por cada tonelada de cemento producido se emite 0.95 toneladas de CO₂²⁴. Por lo tanto, es pertinente implementar un material que tenga un menor impacto en el medio ambiente y que posea igual o mejores propiedades a las de los materiales ya existentes.

Con lo anterior, se ha llegado a la búsqueda de nuevos materiales que sean amigables con el medio ambiente y que sean utilizados como uso alternativo de los cementos tradicionales, para esto, se habla de la implementación de la Ceniza volante (CV) y el Metacaolín (MK), que son precursores para el material cementante. La implementación de CV como uso alternativo del cemento Pórtland (CP) tiene impactos ambientales positivos, ya que conserva el espacio de los rellenos sanitarios, reduce el consumo de energía y agua y, ayuda a la reducción del efecto invernadero,²⁵ debido a que emite nueve (9) veces menos CO₂ que el

²³ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Estadística de Cemento Gris – ECG [en línea], [consultado 10-07-2017]. Disponible en Internet: www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris

²⁴ DAVIDOVITS, J. Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement, Citado por DAVIDOVITS, Joseph. Polymers and Geopolymers. Introduction. En: Geopolymer Chemistry and Applications. 3 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011. p 3.

²⁵ HEADWATERS CONSTRUCTION MATERIALS [en línea], [consultado 10-07-2017]. Disponible en Internet: <http://flyash.com/about-fly-ash/>

cemento Pórtland.²⁶ Por otro lado, emplear MK genera 0.180 toneladas de CO₂ en comparación con 1 tonelada producida por el cemento Pórtland, es decir, seis (6) veces menos;²⁷ el efecto del MK tiene un aprovechamiento en la producción de morteros, ya que su aplicación se centra en su composición química y su fácil reactividad para usarlo como puzolana, y éste aprovechamiento contribuye en las resistencias mecánicas a edades tempranas, reducción de la permeabilidad y aumento de la durabilidad.²⁸

La viabilidad en la utilización de estos precursores no solamente beneficia al medio ambiente y la parte estructural, sino que también en la parte económica, ya que al utilizar desechos o residuos mineralógicos industriales se está evitando la explotación de las canteras y las emisiones contaminantes a la atmósfera con la activación a altas temperaturas. Cabe resaltar, que actualmente no se evidencia investigaciones de la combinación de estos dos precursores, ya que la mayoría de las consultas se centraron en estudiar cada material por separado, y en este trabajo de grado se evaluará las propiedades mecánicas, compresión y flexión, de un geopolímero a base de CV y MK activados alcalinamente.

²⁶ DAVIDOVITS, J. Op. cit., p. 4.

²⁷ *Ibíd.* p. 4.

²⁸ RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo; RESTREPO BAENA, Oscar Jaime y TOBÓN, Jorge Iván. Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland. Medellín: DYNA, 2006. Vol. 73 (150). p. 131

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento de la resistencia a compresión y a flexión en morteros elaborados con un geopolímero a base de Ceniza Volante y Metacaolín como uso alternativo del Cemento Portland.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar la materia prima utilizada en la preparación de los especímenes.
- Determinar la molaridad óptima de los activadores alcalinos (Na_2SiO_3 y NaOH) y el porcentaje de combinación entre los precursores en las pastas elaboradas.
- Establecer el porcentaje de concentración de óxido de sodio (Na_2O) y el porcentaje de combinación entre los geopolímeros para realizar cubos y viguetas de mortero.
- Comparar las propiedades mecánicas, resistencia a compresión y a flexión, de morteros geopoliméricos y morteros convencionales.

5. MARCO DE REFERENCIA

5.1 MARCO CONCEPTUAL

Al ser el cemento portland uno de los materiales más utilizados en la construcción es pertinente explicar los distintos elementos y características que lo hacen ser elemento fundamental para la construcción, además de los elementos usados para la realización de esta investigación.

5.1.1 Cemento Portland

La fabricación de cemento portland inicia con la explotación a cielo abierto en las canteras donde se extraen las materias primas y, así transportarlas a la planta de trituración la cual reduce las medidas, luego se lleva el material a un proceso de molienda donde se reduce a una sustancia de gran finura denominada “harina”, en este proceso se seleccionan las características químicas que se desean obtener.

El material molido es transportado a silos de homogeneización, donde se logra una harina la cual servirá para alimentar el horno. La harina es introducida a un intercambiador de calor donde se desarrollarán las últimas reacciones físico-químicas y se dará formación al Clinker, este material obtenido es sometido a un proceso de enfriamiento y, posteriormente pasa a un quebrantador. Luego es transportado a un parque de almacenamiento donde es molido y se introducen las adiciones requeridas para la obtención del tipo de cemento que se requiera²⁹.

El cemento Portland se encuentra compuesto finalmente por los siguientes materiales en diferentes porcentajes, los materiales son los siguientes: Silicato

²⁹ ASOCIACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO PORTLAND. Proceso de fabricación [en línea], [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://www.afcp.org.ar/index.php?IDM=21&>

dicálcico (Ca_2SiO_4) en un 32%, Silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) en un 40%, Aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) en un 10%, Ferroaluminato TetraCálcico ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) en un 9% y Sulfato de Calcio (CaSO_4) en un 2-3%³⁰.

5.1.2 Puzolana

Las puzolanas se introdujeron como materiales de reemplazo de cemento, están compuestas esencialmente de sílice y alúmina, que al combinarse a una temperatura con cal y una solución se produce una reacción puzolánica brindándole propiedades cementantes³¹.

Las puzolanas pueden clasificarse según su origen en puzolanas naturales y puzolanas artificiales. Entre las primeras se encuentran las Cenizas volcánicas, tobas volcánicas, zeolitas, tierras de diatomeas (diatomitas). Entre las segundas se destacan las cenizas volantes, arcillas activadas térmicamente, humo de sílice, cenizas de cascara de arroz y escoria de Alto Horno³²; las cuales son subproductos industriales y materiales tratados térmicamente, como el caolín; el cual no presenta ningún tipo de actividad puzolánica hasta el momento en que se destruye o se transforma su estructura cristalina mediante un tratamiento térmico a temperaturas entre 500 y 600 °C, cuando se produce la calcinación del material³³.

³⁰ CEMENTO PORTLAND [Anónimo]. Componentes del Cemento Portland. [en línea], [consultado 03-06- 2017]. Disponible en Internet: <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento.pdf>

³¹ SALAZAR JARAMILLO, A. ¿Qué es una puzolana? ECOINGENIERIA S.A.S. (en línea). 2015. [consultado 12-07-2017] Disponible en Internet: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>

³² YU L. H., OU, H. y LEE, L. L. Investigación sobre el efecto puzolánico del polvo de perlita y XINCHENG, P. Investigation on pozzolanic effect of mineral additives in cement and concrete by specific strength index, Citado por RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo; RESTREPO BAENA, Oscar Jaime y TOBÓN, Jorge Iván. Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland. Medellín: DYNA, 2006. Vol. 73 (150). p. 132. ISSN 0012-7353.

³³ GIBBONS, PAT. Puzzolans for lime mortars. Aticles from building conservation, Citado por OP. cit., 132 p.

A continuación, Restrepo, J. et. al., represento las fases $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ de los minerales de acuerdo a su localización.

Ilustración 2. Diagrama de fase $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Localización de materiales puzolánicos



Fuente: RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo; RESTREPO BAENA, Oscar Jaime y TOBÓN, Jorge Iván.

5.1.3 Adiciones Minerales Puzolánicas

Las adiciones minerales puzolánicas son materiales que no presentan por sí mismos propiedades cementantes, necesitan una cantidad de agua para así provocar una reacción con el hidróxido de calcio en temperatura ambiente formando compuestos con propiedades cementantes. Se encuentran principalmente formados por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3), pueden ser residuos industriales, agrícolas o productos sintetizados, como lo es el Metacaolín³⁴.

Existe una gran variedad de materiales que pueden ser utilizados como adiciones minerales puzolánicas. Para esta investigación se utilizarán los siguientes:

³⁴ MITSUUCHI TASHIMA, M. Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS). Trabajo de grado Doctor. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. 2012. 454 p.

5.1.3.1 Ceniza Volante (CV)

La ceniza volante son los residuos los cuales se obtienen por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases producidos por las centrales termoeléctricas las cuales son alimentadas por carbones pulverizados³⁵. Este carbón, es una roca sedimentaria orgánica, que se extrae en todo el mundo y que la mayor parte de ella se utiliza para generar electricidad en las centrales eléctricas mediante la utilización del calor generado cuando el carbón se quema³⁶.

Estas cenizas tienden a tener un color gris claro o negro, depende de las cantidades de cal y carbono que tenga el material, cuando tiene gran cantidad de cal tienden a tener un color gris claro y con grandes cantidades de carbono su color será negro, lo cual indicaría una variación de color en el concreto³⁷.

La normativa americana ASTM M C618-12 / NTC 3493 (ASTM C150, 2012), clasifica la ceniza volante de acuerdo con su composición química en tres (3) tipos³⁸:

- **Clase N:** Son Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas

³⁵ RADA, James. ¿Por qué se ponen cenizas en el concreto? [en línea], [Consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: http://www.ehowenespanol.com/ponen-cenizas-concreto-como_88095/

³⁶ KEYTE, L.M. Fly ash glass chemistry and inorganic polymer cements. En: PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 16.

³⁷ CENIZA VOLANTE [Anónimo]. Antecedentes [en línea], [consultado 03-06-2017]. Disponible en Internet: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capitulo2.pdf>

³⁸ NUÑEZ ROBAYO, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. 2013. 21 p.

arcillas y lutitas.

- **Clase F:** Esta clase de ceniza contiene propiedades puzolánicas, son cenizas con bajo contenido de cal las cuales se obtienen a partir de la quema de antracita, cartón bituminoso, a partir de carbón sub-bituminoso y lignito.
- **Clase C:** Esta clase de ceniza también posee propiedades puzolánicas, tiene una propiedad cementante; contiene alto contenido de cal, proviene de la quema de carbón sub-bituminoso o ignito y a su vez puede presentar propiedades hidráulicas.

5.1.3.2 Metacaolín (MK)

El Metacaolín es un material cementante suplementario que se obtiene de la calcinación del caolín a temperaturas aproximadas a 550°C produciendo un material con estructura cristalina. Fundamentalmente se aplica centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad como puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, contribuyendo en las resistencias mecánicas a edades tempranas y reduciendo la permeabilidad³⁹.

Por otro lado, el metacaolín es en sí mismo un material relativamente complejo, generándose por calcinación de arcilla caolinita a temperaturas que oscilan entre 500 y 800 °C dependiendo de la pureza y cristalinidad de la arcilla precursora. En esencia, el metacaolín consiste en alternar las capas de silicato y aluminato, con el silicio en 4-coordinación y el aluminio en una mezcla de 4-, 5- y 6-coordinación.⁴⁰

³⁹ SANTALLA, Luis. Teoría de construcción. Metacaolín [en línea], [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/metacaolin-definicion-y-ensayos/>

⁴⁰ GRANIZO, M. L. et al. Alkaline activation of metakaolin – An isothermal conduction calorimetry study y BADOIANNIS, E. et al. Metakaolin as supplementary cementitious material, Citado por PROVIS, John; YONG, S y DUXSON, P. Nanostructure/microstructure of metakaolin geopolymers. En: PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 73.

5.1.4 Activadores alcalinos

La concentración del activador alcalino es una de las variables fundamentales en el proceso de geopolimerización, ya que la solubilidad del aluminosilicato se incrementa con el aumento en la concentración del ión hidróxido⁴¹. Entre las soluciones activantes más utilizadas se encuentran: el NaOH, Na₂CO₃, (Na₂SiO₃), Ca(OH)₂, Na₂SO₄, CaSO₄, etc., o mezclas de los mismos; aunque se considera al NaOH y Na₂SiO₃ como las soluciones activantes que aportan mejores propiedades en las mezclas de cementos activados alcalinamente⁴². A continuación, se describe estos dos (2) activadores alcalinos, los cuales serán utilizados en dicha investigación.

5.1.4.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)

El Hidróxido de sodio o también conocido como soda cáustica, es una sustancia química la cual está compuesta por sodio, hidrogeno y oxigeno altamente corrosiva. El hidróxido sódico que se utiliza proviene al 100% de su fabricación artificial. La mayoría se obtiene por un proceso conocido como caustificación, que consiste en el contacto de un hidróxido con un compuesto de sodio.⁴³

⁴¹ GASTEIGER, H. et al. Solubility of aluminosilicates in alkaline solutions and a thermodynamic equilibrium model, Citado por RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante. Trabajo de investigación. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. 2009. p. 15.

⁴² MARÍA CRIADO, S. "Tesis doctoral", Citado por ARIAS JARAMILLO, Yhan Paul. Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón. Tesis Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Materiales y Minerales. 2013. p. 16.

⁴³ PADIAL, J. ¿Qué es el hidróxido de sodio o soda cáustica? [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <https://curiosoando.com/que-es-el-hidroxido-de-sodio-o-sosa-caustica>

El NaOH es el activador de hidróxido más utilizado en la síntesis de geopolímeros, siendo el más barato y más ampliamente disponible de los hidróxidos alcalinos. El uso de NaOH como activador en la síntesis de geopolímeros, a partir de cenizas volantes y precursores de metacaolín, está muy extendido debido a su bajo costo, amplia disponibilidad y baja viscosidad.⁴⁴

Se debe tener en cuenta que los geopolímeros activados con una alta concentración de soluciones de hidróxido puede producir eflorescencia (formación de carbonato sódico blanco o cristales de bicarbonato), el cual es un problema conocido, donde el exceso de álcali reacciona con el CO₂ atmosférico.⁴⁵

5.1.4.2 Silicato de Sodio (Na₂SiO₃)

Es un compuesto inorgánico que se produce a partir de dióxido de silicio y carbonato de sodio, para obtener este compuesto se utilizan diferentes proporciones y se introducen en hornos a altas temperaturas, dando así diferentes tipos de silicatos de sodio dependiendo de la concentración de cada uno.⁴⁶

Son utilizados en la industria en diferentes casos, como puede ser: adhesivos, detergentes, cementos, ligantes, como un ingrediente para productos de limpieza, capas protectoras, bases de catalizadores, insumos químicos, etc. Las propiedades y características de los silicatos solubles pueden ser utilizadas para la solución eficiente y económica de distintos problemas que puedan surgir en las

⁴⁴ PROVIS, J. L. Activating solution chemistry for geopolymers. En: PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 53.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 55.

⁴⁶ POCHTECA. Silicato de sodio [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <http://www.pochteca.com.mx/silicato-de-sodio/>

industrias.⁴⁷

Cuando el silicato es utilizado en la realización de cemento, reacciona químicamente con los materiales y así forma una masa con fuertes propiedades ligantes. Las ventajas que posee la utilización del silicato son las siguientes:⁴⁸

- ✓ Resistencia a la temperatura
- ✓ Resistencia a los ácidos
- ✓ Resistencia a disolventes después de su uso
- ✓ Facilidad de manejo

5.1.5 Geopolímeros

Fueron nombrados por Davidovits como aluminosilicatos tridimensionales que se forman a baja temperatura y a corto tiempo por una activación altamente alcalina.⁴⁹ Por otro lado, Provis⁵⁰ define a los geopolímeros generalmente como: *un material de aluminosilicato sólido y estable formado por hidróxido alcalino o silicato alcalino de activación de un precursor que normalmente se suministra como un polvo sólido*. Estos geopolímeros también han sido nombrados como: «*polímeros minerales*», «*polímeros inorgánicos*», «*cristales de polímeros*

⁴⁷ QUIMINET. ¿Cuáles son los usos y aplicaciones del silicato de sodio líquido y sólido? [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-silicato-de-sodio-liquido-y-solido-27872.htm>

⁴⁸ Ibíd.

⁴⁹ DAVIDOVITS, J. y DAVIDOVICS, M. Geopolymer: room-temperature ceramic matrix for composites, Citado por MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de pb–zn. Trabajo de grado Maestría en Ciencias con orientación en Materiales de Construcción. Monterrey. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 2015. 25 p.

⁵⁰ PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.) Introduction to geopolymers. En: Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 3.

*inorgánicos», «cerámicas unidas por álcali», «material de ceniza alcalina», «cementos de suelo».*⁵¹ Davidovits introdujo la nomenclatura de "sialato" para describir las estructuras de aluminosilicato⁵². El tipo de enlace Si-O-Al se denominó un enlace de sialato, y Si-O-Si un enlace siloxo. Esto proporcionó un medio para describir la composición de geopolímeros de acuerdo con su relación Si / Al, siendo una proporción de 1.0 un poli (sialato), 2.0 un poli (sialato-siloxo) y 3.0 un poli (sialato-disiloxo).⁵³

Los cementos de geopolímeros son un ejemplo de la clase más amplia de los ligantes alcalinos-activos, que también incluye escorias metalúrgicas, álcali-activado y otros materiales relacionados.⁵⁴ Actualmente, el principal objetivo de la tecnología de geopolímeros se basa en la reducción de CO₂ con el desarrollo de nuevos materiales de construcción como una alternativa a los cementos basados en Portland (silicato de calcio)⁵⁵.

5.1.6 Mortero

El mortero se puede definir como la mezcla de un material aglutinante (Cemento portland), un material de relleno (Agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas

⁵¹ *Ibíd.*, p. 3.

⁵² DAVIDOVITS, J. The need to create a new technical language for the transfer of basic scientific information, Citado por PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.) Introduction to geopolymers. En: Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 4.

⁵³ PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Op. cit. p. 4.

⁵⁴ ARQHYS. Geopolímeros [en línea], 2012 [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>

⁵⁵ PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Op. cit. p. 6.

similares a las del concreto⁵⁶. Existen diferentes tipos de morteros dependiendo de su composición:

- **Morteros Calcáreos:** Este mortero posee cal lo cual lo hace manejable para su uso en embellecimiento de interiores donde se requiere delicadeza en los acabados, además de que debido a la cal no se obtendrán altas resistencias ya que su endurecimiento es lento.
- **Morteros Hidráulicos:** Estos morteros son utilizados cuando se busca una gran manejabilidad, buena retención de agua y altas resistencias iniciales. Si el contenido de cemento es alto, las características que se obtendrán serán altas resistencias y poco tiempo entre amasado y colocación lo cual lo hará menos trabajable además de producirse una contracción (3%) si se encuentra muy seco⁵⁷.

5.1.6.1 Propiedades del mortero

Para determinar las propiedades del mortero, se debe evaluar en dos estados que son: estado fresco y estado endurecido, ya que las propiedades de éste en estado endurecido dependen en cierto grado de las propiedades en estado fresco⁵⁸. A continuación, se menciona las propiedades relevantes de los dos estados.

a. Estado Fresco

⁵⁶ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá D.C.: Bhandar Editores, 1996, p 303.

⁵⁷ *Ibíd.*, p 303-304.

⁵⁸ *Ibíd.*, p 111.

❖ **Manejabilidad**

Esta propiedad da a conocer la facilidad de colocación de la mezcla, también se encuentra relacionada con la consistencia la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando está en estado fresco⁵⁹.

❖ **Retención de agua**

Es la capacidad que posee el mortero para mantener su plasticidad cuando sea colocado sobre una superficie, existen diferentes materiales los cuales mejoran la retención de agua como lo es la cal, ya que tiene la capacidad plastificante, otros pueden ser una mayor cantidad de finos, adición de aditivos plastificantes y la utilización de cementos puzolánicos. Dicha retención incide altamente en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final a la compresión⁶⁰.

b. Estado Endurecido

❖ **Resistencia**

Es la propiedad que se obtiene cuando el mortero se encuentra en estado endurecido, donde se evalúa la capacidad para soportar una carga a compresión, flexión o tracción.

El tamaño de los granos de arena que se utiliza para la realización de la mezcla influye considerablemente en la resistencia que se obtendrá del mortero, ya que al agregar una arena con una menor cantidad de volumen de poros, tendrá como

⁵⁹ Ibíd., p 308.

⁶⁰ Ibíd., p 309.

consecuencia hacer el mortero más denso y por lo tanto se obtendrá una mayor resistencia. El efecto del agua sobre la resistencia depende de la densidad del mortero resultante; los morteros secos son más resistentes que los morteros húmedos por ser más densamente compactos⁶¹.

Dentro de este concepto se evalúa de forma experimental dos propiedades mecánicas importantes para evaluar el comportamiento estructural de los morteros.

▪ Resistencia a Compresión

La compresión es un proceso físico o mecánico que consiste en someter un cuerpo a la acción de dos fuerzas opuestas que disminuyan su volumen. Se conoce como esfuerzo de compresión el resultado de las dos fuerzas ejercidas, las unidades que se manejan son: MPa, Kgf/cm² y PSI.⁶²

La máquina de ensayos será una prensa hidráulica o mecánica, que disponga de varias escalas de manera que se pueda escoger la apropiada, según el valor medio del ensayo a efectuar, de forma que ningún resultado individual quede por debajo de la décima parte del valor máximo de la gama de medida empleada. Debe permitir la aplicación de la carga de una manera continua y progresiva.⁶³

Se aplica la carga a la velocidad que especifica la norma correspondiente y se registra el valor, F , al que se produce la rotura. Entonces, la resistencia a la compresión vendrá dada por:

⁶¹ *Ibíd.*, p 309-310.

⁶² PÉREZ, J y MERINO, M. Compresión [en línea], [Consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <http://definicion.de/compresion/>

⁶³ PROPIEDADES MECÁNICAS: Ensayos [Anónimo] [en línea], [consultado 10-07-2017]. p. 1. Disponible en Internet: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMII.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf>

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

donde:

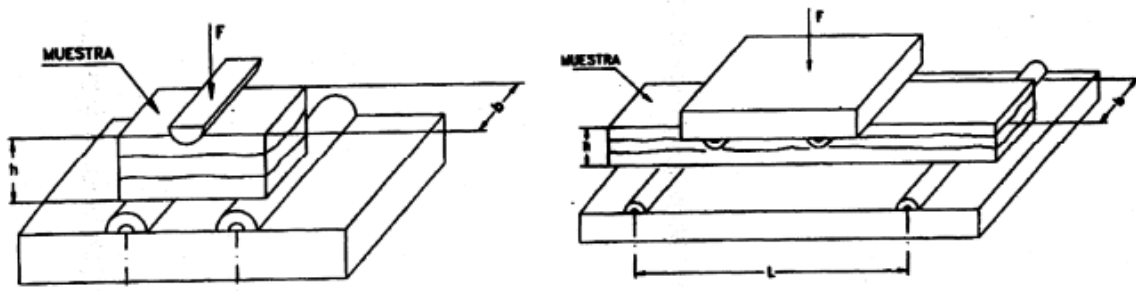
F = carga máxima con la que se produce rotura.

A = área de la sección de la probeta donde se aplica la carga.

▪ Flexión Mecánica

El comportamiento tensión – deformación de los materiales frágiles usualmente no se describe mediante el ensayo de tracción por dos razones. En primer lugar, es difícil preparar y ensayar probetas de tracción con la geometría requerida y en segundo lugar, existe una diferencia significativa entre los resultados obtenidos a partir de ensayos conducidos bajo cargas de tracción y de compresión. Por consiguiente, frecuentemente se emplea un ensayo de flexión, en el cual una probeta en forma de barra con sección rectangular es flexionada usando una técnica de tres o cuatro puntos de aplicación de la carga. En el punto de aplicación de la carga, la superficie superior está sometida a un estado de compresión, mientras la superficie inferior está sometida a tracción.⁶⁴ El esquema de aplicación de carga por tres y cuatro puntos se muestra a continuación:

Ilustración 3. Resistencia a la flexión en tres y cuatro puntos.



Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAlI.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf>

⁶⁴ Ibíd., p. 2.

➤ **Factores que influyen en la resistencia**

Fraguado: El tiempo de fraguado es importante para saber si es necesario utilizar aditivos que controlen la velocidad del fraguado, con el fin de regular los tiempos de mezclado, de manera que no se vaya a afectar la manejabilidad ni la resistencia de la mezcla⁶⁵. Los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla deben estar entre límites adecuados. Por lo general, se aceptan valores entre 2 y 24 horas. Sin embargo, éste tiempo depende de diversos factores, como: condiciones del clima, composición de la mezcla⁶⁶.

Edad: La edad es un factor importante ya que afecta la resistencia, debido a la relación que hay entre la relación agua-cemento (A/C) y la resistencia que se aplica únicamente a un tipo de cemento y a una sola edad. Cuando el espécimen alcanza una resistencia de 28 MPa, comienza el proceso de adquisición de resistencia, la cual va aumentando con el transcurso del tiempo. Como ésta resistencia es variable, es necesario definir una edad donde la resistencia en ese momento caracterice sus propiedades mecánicas. Despóticamente, esta edad se ha tomado en 28 días⁶⁷.

Curado: Debido a la exposición al aire después de haber perdido humedad durante el proceso de fraguado y posteriormente imposibilitando la hidratación completa del cemento afecta así la resistencia final, disminuyéndola. El curado tiene por objeto mantener el mortero saturado para terminar de hidratar el

⁶⁵ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Op. Cit., p 135.

⁶⁶ *Ibíd.*, p 308.

⁶⁷ *Ibíd.*, p 135-136.

cemento⁶⁸.

Temperatura: Otro factor que afecta la resistencia es la temperatura durante los procesos de fraguado y curado, debido a que una elevada temperatura acelera la reacción química de la hidratación y esto afecta positivamente la resistencia temprana, sin efectos contrarios en la resistencia posterior. Sin embargo, puede afectar adversamente la resistencia a partir de aproximadamente los 7 días de edad⁶⁹.

❖ Durabilidad

Es la resistencia a agentes externos los cuales pueden ser bajas temperaturas, la penetración de agua, desgaste por abrasión, retracción por secado, eflorescencias, agentes corrosivos, choques térmicos, entre otros, sin que se observe un deterioro en sus condiciones físico-químicas con el tiempo. Por lo general, se considera los morteros de alta resistencia a la compresión morteros de buena durabilidad⁷⁰.

5.2 MARCO LEGAL

Para realizar la parte experimental, ésta investigación está basada en normas aplicadas a morteros elaborados a partir de cemento convencional, ya que actualmente no existe una normativa la cual se base en la elaboración de morteros geopoliméricos.

⁶⁸ Ibíd., p 137.

⁶⁹ Ibíd., p 137-138.

⁷⁰ Ibíd., p 310.

5.2.1 NTC 3493 “Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto”

Esta norma cubre las cenizas volantes y las puzolanas naturales, calcinadas o crudas, para uso en el concreto cuando se desea una acción cementante o puzolánica, o ambas; o cuando se deseen otras propiedades normalmente atribuidas a las cenizas volantes o a las puzolanas; o cuando se quieran lograr ambos objetivos.⁷¹

5.2.2 NTC 220 “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8 mm de lado”

En esta norma específica el método para determinar la resistencia a la compresión en morteros de 50 mm o 50,8 mm de lado. Además de contener las proporciones base de cemento, arena y la relación agua/cemento para la realización de 6 o 9 cubos de mortero con las medidas mencionadas en el título de la norma. También contiene especificaciones para la compactación del material evitando una mayor cantidad de vacíos y que varíe su resistencia uno de otro⁷².

5.2.3 NTC 121 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas Y Mecánicas”.

Esta norma da a conocer los requisitos físicos para que un cemento pueda ser utilizado en la construcción, desde la finura de los materiales hasta la resistencia

⁷¹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto. NTC 3493. Bogotá D.C: ICONTEC, 2017. p. 1.

⁷² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado. NTC 220. Bogotá D.C: ICONTEC, 2004. p. 2.

que se debe obtener en diferentes días al ser sometido a una carga a compresión⁷³.

5.2.4 INV-E 324-07 “Resistencia a la Flexión de Morteros de Cemento Hidráulico”.

Esta norma tiene como objetivo establecer un método para la determinación de la resistencia a la flexión de viguetas realizadas con mortero hidráulico, además de explicar el proceso que se debe realizar para la compactación y la determinación de la resistencia⁷⁴.

5.2.5 RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras)

Esta unión tiene como objetivo promover la cooperación científica en el área de los materiales de construcción, además de brindar información actualizada sobre distintas investigaciones que estén relacionadas con la construcción sostenible y segura⁷⁵.

⁷³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas Y Mecánicas. NTC 121. Bogotá D.C: ICONTEC, 1982. p. 2.

⁷⁴ INTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. INV-E 324. Bogotá D.C. 2007. p. 1.

⁷⁵ RILEM. International Union of laboraties and experts in construction materials, systems and structures [en línea], [Consultado 12-07-2017]. Disponible en Internet: http://rilem.org/docs/2011171137_flyer-es.pdf.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

El tipo de enfoque que se desarrolló en este trabajo de grado fue cuantitativo, debido a que se encuentra orientado en el análisis de los resultados de las propiedades mecánicas, compresión y flexión, por medio de ensayos de laboratorio; estos tipos de ensayos tienen una continuidad, la cual es importante en el avance de la investigación, es importante mencionar en este enfoque que por ser una investigación donde se establecieron porcentajes de materiales y donde se observó el comportamiento de los mismos, se llegó a una conclusión por medio de tablas y gráficas donde se determinó la factibilidad de la investigación, allí se pudo observar de forma clara el comportamiento de los materiales de acuerdo al proceso que se empleó.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se encuentra diseñada bajo una metodología experimental con técnicas controladas, como el números de golpes en la preparación de los especímenes los cuales están especificados en la NTC 220 y la INV-E 324, la temperatura de fraguado que se mide en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), tiempo de fraguado y curado que se miden en días y la velocidad de la maquinaria empleada, tales como: la mezcladora, donde se mezcló los materiales y se preparó los especímenes y, la maquina Versa Tester donde se efectuaron los ensayos de compresión y flexión a los morteros; se analiza las propiedades mecánicas de los geopolímeros, Ceniza Volante y Metacaolín activados alcalinamente, a través de la fabricación de cubos y viguetas de mortero con diferentes porcentajes en peso de los materiales utilizados. Se parte de este método experimental ya que permite

reconocer, establecer y verificar el comportamiento de los materiales utilizados.

6.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La técnica utilizada para la investigación es el análisis de documentos, debido a que se obtuvo información clave de artículos científicos, tesis de grado o doctorales nacionales e internacionales, los cuales se encuentran enfocados en los materiales utilizados en esta investigación, tales como, ceniza volante, metacaolín, los diferentes activadores, NaOH y Na_2SiO_3 y, temperaturas de curado y fraguado. Esto tuvo como fin proporcionar un conocimiento base en el inicio de los ensayos planteados anteriormente.

6.4 DEFINICIÓN Y OPERACIONES DE LAS VARIABLES

Tabla 1. Variables de la investigación

	VARIABLE	INDICADOR	MEDICIÓN
Independiente (X)	Cantidad de material a utilizar	Ceniza Volante y Metacaolín	% en peso
		Solución activadora	% en volumen Molaridad
Dependiente (Y)	Comportamiento estructural	Resistencia a la compresión	MPa
		Resistencia a la flexión	MPa
Interviniente	Activador alcalino	Concentración de la sustancia	Mol % NaO_2
	Fraguado y curado del mortero	Tiempo de fraguado	24 horas
		Temperatura de fraguado	70 °C
		Tiempo de curado	1, 3, 7 y 28 días
		Temperatura de curado	Ambiente (23 °C)

Fuente: Elaboración propia

6.5 FASES DE LA INVESTIGACIÓN

1) Reconocimiento de la molaridad óptima de los activadores alcalinos y el porcentaje de combinación entre los geopolímeros.

Realizar diferentes relaciones entre los geopolímeros y los activadores alcalinos, como se presenta a continuación:

- Geopolímeros: Relación 100% Ceniza Volante, 0% Metacaolín.
Relación 70% Ceniza Volante, 30% Metacaolín.
Relación 30% Ceniza Volante, 70% Metacaolín.
Relación 50% Ceniza Volante, 50% Metacaolín.
- Activadores: Silicato de Sodio (Na_2SiO_3)
Hidróxido de Sodio (NaOH) $\rightarrow$ 6 mol, 9 mol y 12 mol.
Relación $\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1.0 \rightarrow$ 5 mol de NaOH .
Relación $\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 1.5 \rightarrow$ 3 mol y 5 mol de NaOH .
 - a) Caracterización de la materia prima a utilizar en la elaboración de pastas.
 - b) Realizar pastas con los materiales puzolánicos activándolos alcalinamente.
 - c) Efectuar ensayo de compresión.
 - d) Determinar la molaridad óptima de los activadores.

2) Establecer el porcentaje de concentración de óxido de sodio para realizar los cubos de mortero.

Realizar cubos de morteros con distintos porcentajes de concentración de Na_2O determinando así la mezcla óptima.

- a) Elaborar cálculos estequiométricos en función de la concentración de Na_2O y la molaridad de NaOH para realizar la dosificación de los especímenes.

- b) Realizar cubos de morteros con diferentes porcentajes de concentración de Na_2O y someterlos a ensayo de compresión.
- c) Elaborar una matriz de resultados.
- d) Definir la mezcla óptima de materiales.
- e) Realizar viguetas de mortero y someterlas a ensayo de flexión con la dosificación de material óptimo de los cubos de mortero.

3) Comprobación de la resistencia a compresión y a flexión del mortero elaborado con geopolímeros activados alcalinamente y el mortero convencional.

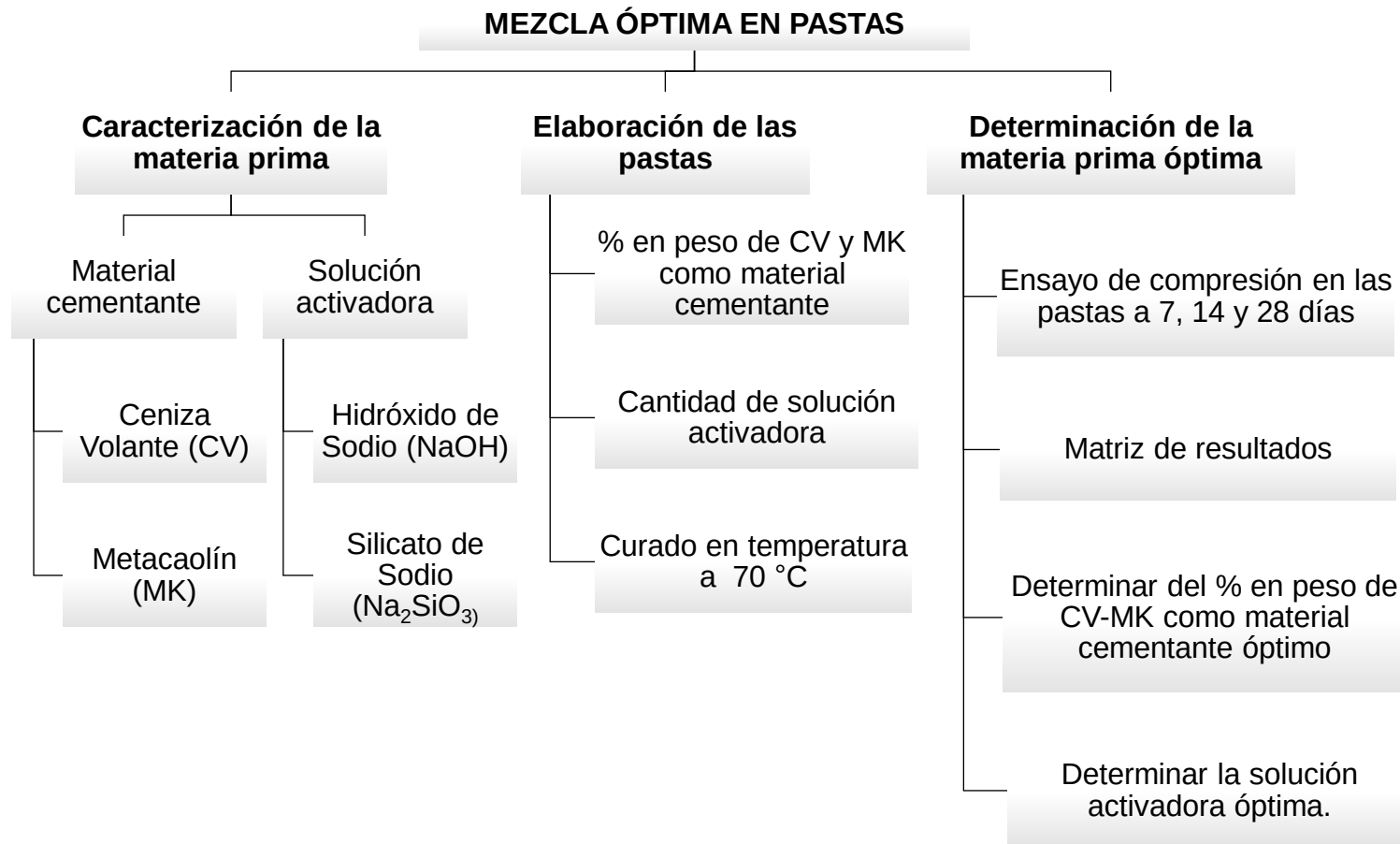
Observar los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de los morteros realizados con los geopolímeros activados alcalinamente, y los resultados del mortero convencional.

- a) Comparar los resultados de las resistencias mecánicas, compresión y flexión, de los morteros curados a temperatura ambiente.
- b) Comparar los resultados de las resistencias mecánicas, compresión y flexión, de los morteros curados en agua salada.

6.5.1 Diagramas de flujo para las fases de investigación

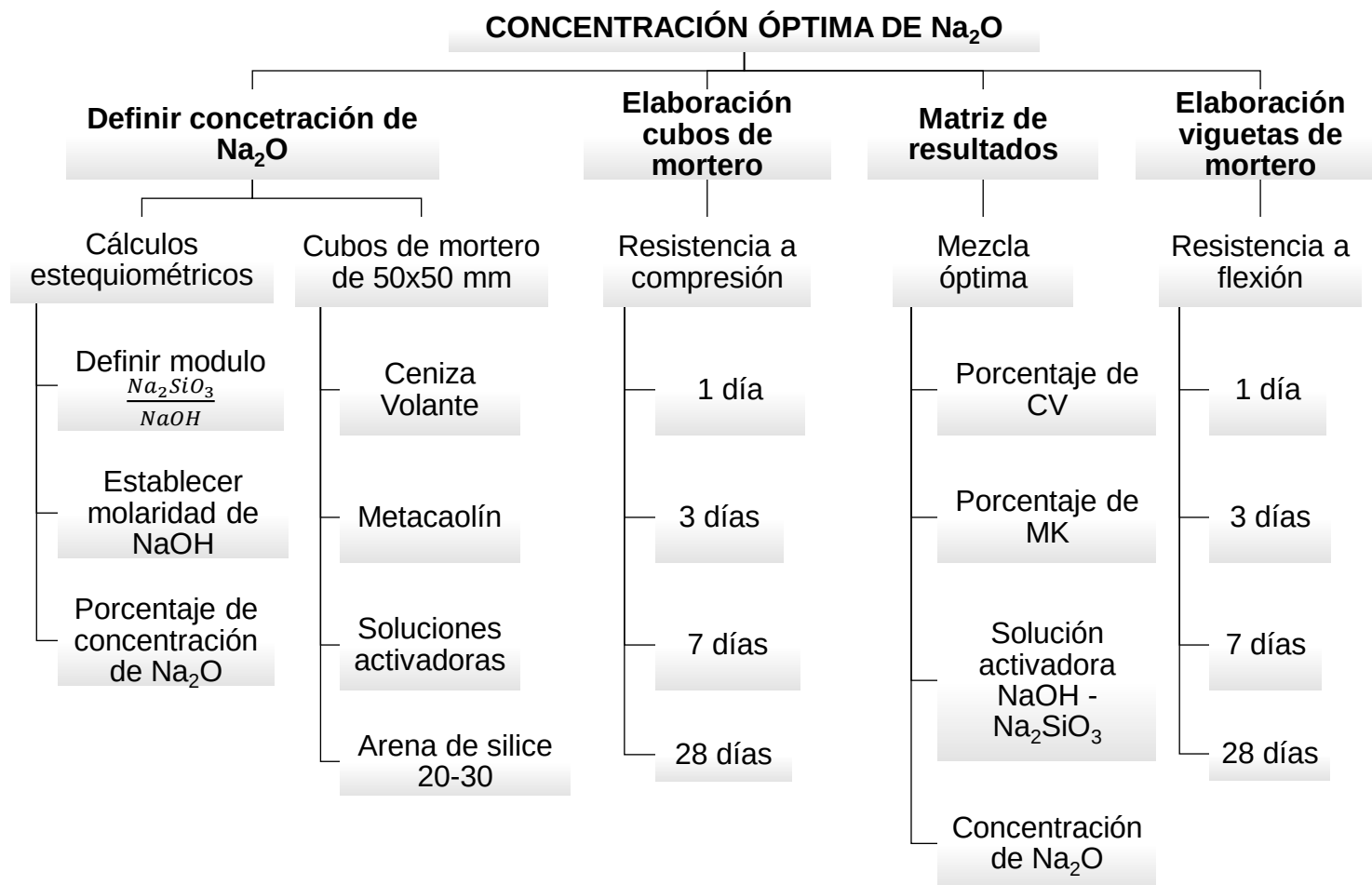
Se resume cada fase de acuerdo a la organización en paralelo que se mantuvo en la investigación, esto para razonar mejor del proceso y la relación de las ideas de cada sub-fase.

Ilustración 4. Diagrama del diseño metodológico. Fase 1



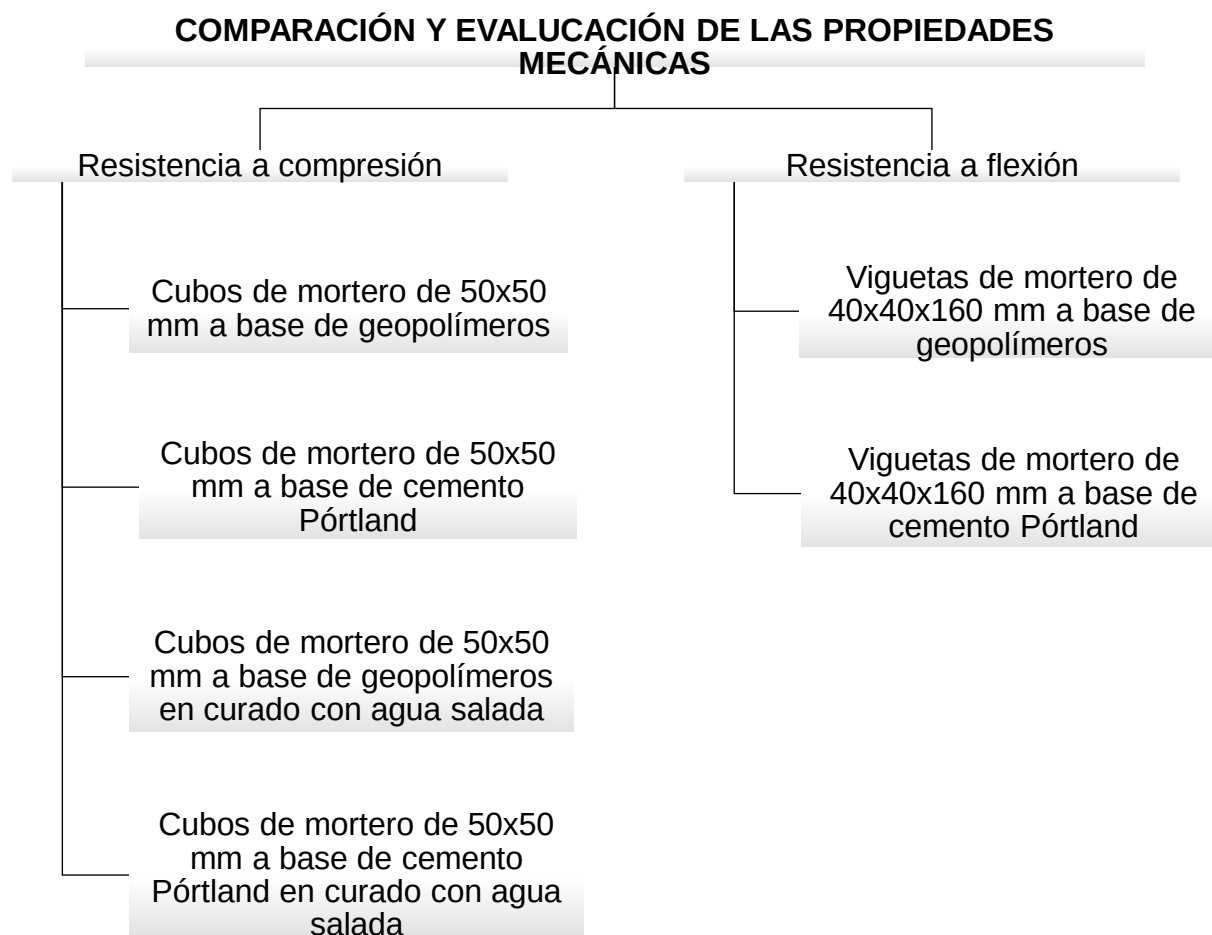
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 5. Diagrama del diseño metodológico. Fase 2



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 6. Diagrama del diseño metodológico. Fase 3



Fuente: Elaboración propia

7. ANÁLISIS Y RESULTADOS

7.1 RECONOCIMIENTO DE LA MOLARIDAD ÓPTIMA DE LOS ACTIVADORES ALCALINOS Y EL PORCENTAJE DE COMBINACIÓN ENTRE LOS GEOPOLÍMEROS

En esta fase se muestra inicialmente la caracterización de los materiales que se emplean en la elaboración de pastas, posteriormente se muestra los resultados óptimos de las pastas activadas alcalinamente donde se establece el tipo de porcentaje en peso de masa cementante y la molaridad del activador alcalino.

7.1.1 Caracterización de la materia prima a utilizar en la elaboración de pastas

Para la caracterización de los materiales cementantes se analizaron los resultados del ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) donde se determinó la cantidad en porcentaje de los compuestos químicos que posee. En cuanto a los activadores alcalinos se analizó las fichas técnicas correspondientes, las cuales fueron suministradas por el proveedor QUIMICOS CAMPOTA S.A.

7.1.1.1 Material cementante

- **Ceniza Volante**

El tipo de ceniza utilizada en esta investigación es procedente de la Central de Generación Térmica: TERMOPAIPA, ubicada en Paipa, Boyacá, de propiedad de GENSA (Gestión Energética S.A. E.S.P.).

Ilustración 7. Muestra de Ceniza Volante



Fuente: Elaboración propia

Para tener conocimiento sobre el tipo de CV que se está utilizando, fue necesario realizar el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX), en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Allí se analizó una muestra de 20 gramos, en donde se clasificó los elementos y/o compuestos químicos presentes en porcentaje de peso del material, como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 2. Caracterización química de la ceniza volante - FRX

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	% en peso
Silicio	SiO₂	61.57
Aluminio	Al₂O₃	24.70
Hierro	Fe₂O₃	5.18
Azufre	SO₃	1.98
Potasio	K₂O	1.53
Titanio	TiO₂	1.34
Calcio	CaO	1.21
Fosforo	P₂O₅	0.98
Magnesio	MgO	0.60
Sodio	Na₂O	0.53
Estroncio	Sr	0.11
Bario	Ba	0.08

Zirconio	Zr	0.04
Vanadio	V	0.03
Cerio	Ce	0.03

Fuente: Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X. UNAL.

Obtenidos los porcentajes en peso de los compuestos químicos se determinó que el tipo de ceniza es una ceniza volante Tipo F, donde se establece que *“Materiales ricos en SiO_2 y Al_2O_3 , generalmente representa arcillas modificadas como metacaolín y principalmente cenizas volantes tipo F”*⁷⁶. De igual forma, la NTC 3493⁷⁷ especifica que el material se clasificará como Tipo F, si: el porcentaje mínimo de la suma de Dióxido de Silicio (SiO_2) + Óxido de Aluminio (Al_2O_3) + Óxido de Hierro (Fe_2O_3) es de 70%, si el porcentaje máximo de Trióxido de Azufre (SO_3) es de 5% y si el porcentaje máximo de Óxido de Calcio (CaO) es de 10%, lo que para el material utilizado fue de 91.45%, 1.98% y 1.21%, respectivamente, y esto da conformidad a la clasificación mencionada.

- **Metacaolín**

El tipo de metacaolín utilizado en esta investigación es originario de Oiba, Santander, y comercializado por KAOLINK S.A.S., en la ciudad de Bogotá D.C.

⁷⁶ ARIAS JARAMILLO, Yhan Paul. Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón. Tesis Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Materiales y Minerales. 2013. p. 13.

⁷⁷ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto. NTC 3493. Bogotá D.C: ICONTEC, 2017. p. 2.

Ilustración 8. Muestra de Metacaolín



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de esta prueba se reportan teniendo el metacaolín a 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 magnético⁷⁸ y la cantidad de compuestos químicos contenidos en el material se representa en la siguiente tabla:

Tabla 3. Caracterización química del metacaolín - FRX

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	% en peso
Silicio	SiO₂	67.27
Aluminio	Al₂O₃	20.74
Potasio	K₂O	2.70
Titania	TiO₂	1.70
Hierro	Fe₂O₃	1.17
Sodio	Na₂O	0.30
Magnesio	MgO	0.29

⁷⁸ BONILLA AGUDELO, Julián David y NIÑO SOTELO, Sindy Paola. Estudio de la resistencia mecánica a compresión, tensión y durabilidad, en morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir de metacaolín. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad La Gran Colombia. 2017. P. 38.

Fosforo	P₂O₅	0.07
Zirconio	Zr	0.06
Vanadio	V	0.03
Azufre	SO₃	N.D
Calcio	CaO	N.D
Estroncio	Sr	N.D
Bario	Ba	N.D

Fuente: KAOLINK S.A.S referenciado por BONILLA, Julián y NIÑO, Sindy

7.1.1.2 Activadores alcalinos

- **Hidróxido de Sodio (NaOH)**

El hidróxido de sodio o soda cáustica, como se distingue comercialmente, con una pureza del 98% es procedente de QUIMICOS CAMPOTA en la ciudad de Bogotá D.C., viene en presentación solida (escamas) por kilo (Ver Ilustración 9).

De acuerdo a lo especificado en las fases de investigación, se realiza diferentes molaridades para la activación de los precursores, las cuales son: 4, 6, 8, 9 y 12 mol. Se calcula la cantidad de NaOH que se diluirá en 1 litro de agua destilada, teniendo en cuenta la masa molar del compuesto, que en este caso es 39.997 g/mol. A continuación, se presenta la forma de obtener la cantidad de NaOH: $4 \text{ mol} * 39,997 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \approx 160 \text{ gramos de NaOH.}$

Por cada molaridad realizada se requiere 160 g, 240 g, 320 g, 360 g y 480 g, respectivamente, para 1 litro de agua destilada.

Ilustración 9. Muestra original de hidróxido de sodio



Fuente: Elaboración propia

- **Silicato de Sodio (Na_2SiO_3)**

El silicato de sodio utilizado en esta investigación, fue suministrado por la empresa JADESI S.A., a continuación, se presenta la ficha técnica para tener conocimiento de las propiedades y características que posee.

Tabla 4. Ficha técnica del Silicato de sodio

CONCEPTO	RANGO ACEPTADO	RESULTADOS
Color	Grisáceo	Grisáceo
Textura	Fluida	Fluida
Olor	Característico	Inodoro
Densidad ($^{\circ}\text{Be}$) a 20°	49 ± 1	50
Gravedad Específica	1.480 a 1.500	1.5
Alcalinidad ($\%\text{Na}_2\text{O}$)	12.5 ± 1	12.7
Sílice ($\%\text{SiO}_2$)	31.20 a 33.15	32.2
Sólidos Totales (%)	43.7 a 44.5	43.9
Relación ($\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$)	1:2.10 a 1:2.40	1:2.45
Viscosidad	600 a 850 Centipoise	750
P/H	12 ± 05	12.1

Fuente: JADESI S.A.

Ilustración 10. Muestra original del silicato de sodio



Fuente: Elaboración propia

7.1.2 Realizar pastas con geopolímeros

Inicialmente, se realizaron pastas con 100% Ceniza Volante, las cuales fueron activadas con Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) (ver Ilustración 11), las molaridades utilizadas en las soluciones de los activadores alcalinos para la fabricación de las pastas fueron: NaOH con concentraciones de 6, 9 y 12 mol, Na_2SiO_3 , relación molar $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ igual a 1.0 con concentración de 5 mol de hidróxido de sodio y, relación molar $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ igual a 1.5 con concentraciones de 3 y 5 mol de hidróxido de sodio.

Ilustración 11. a) Mezcla de la pasta de CV y activador y, b) Pastas de CV activadas alcalinamente.



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizadas las pastas, se dejaron a curado con temperatura ambiente durante varios días para observar la activación alcalina de la CV con las diferentes molaridades del activador. Al cabo de 7 días de realizadas las pastas se observó que el material no reaccionó con los activadores alcalinos, ya que aún se encontraban en estado fresco, por lo tanto, se someten a curado a una temperatura de 70 °C en horno durante 24 horas, esto referenciado de Palomo, A. et al.⁷⁹, que sugieren condiciones de trabajo más agresivas para iniciar las reacciones (medios altamente alcalinos y temperaturas de curado de 60 a 200 °C). Pasado el tiempo de curado en horno, las muestras se sacan y se observa que las muestras activadas a 6 mol de NaOH y Na₂SiO₃ llegan a estado de endurecimiento, aunque no del 100% por lo que se dejan a curado en temperatura ambiente hasta edad de 14 días. En la Tabla 5 se observa valores de resistencia a compresión en la muestra activada con 6 mol de NaOH a edades de 14 y 28 días, la muestra activada con la solución de Na₂SiO₃ no presenta valores de resistencia puesto que ésta falla por aplastamiento (ver Ilustración 12b), también se evidencia que las muestras activadas con 9 y 12 mol de NaOH no presentan valores debido a que no llegaron a un estado de endurecimiento a los 28 días de curado.

Tabla 5. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con Ceniza Volante.

Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
		7 (días)	14 (días)	28 (días)
NaOH	6	-	3.83	3.92
	9	-	-	-
	12	-	-	-
Na ₂ SiO ₃	-	-	Aplastamiento	Aplastamiento

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente imagen se observa el ensayo a compresión efectuado en las muestras activadas con 6 mol de NaOH y Na₂SiO₃ a 14 días de curado.

⁷⁹ PALOMO, A. et al. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. En: Materiales de Construcción. 2014. Vol. 64. P. 7. ISSN: 0465-2746.

Ilustración 12. Prueba de resistencia a compresión en pastas de CV activadas con a) NaOH - 6 mol y b) Na₂SiO₃.



Fuente: Elaboración propia

Al observar que no se presentó una reacción favorable en la activación de las pastas de CV elaboradas con las soluciones NaOH y Na₂SiO₃, se realizó la combinación de los dos activadores reduciendo el módulo del silicato el cual es de 2.45 a 1.0 y 1.5 manejando una relación $\frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$, implementando NaOH de molaridades 3 y 5 para la elaboración de las pastas (ver ilustración 13), éstas se introducen inmediatamente al horno una vez se encuentren realizadas, ya que en las anteriores muestras no reaccionaron a temperatura ambiente, estos valores se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con Ceniza Volante.

Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
		7 (días)	14 (días)	28 (días)
$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.0$	5	0.68	1.75	3.07
$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.5$	3	0.46	0.81	1.27
	5	0.20	1.41	1.90

Fuente: Elaboración propia

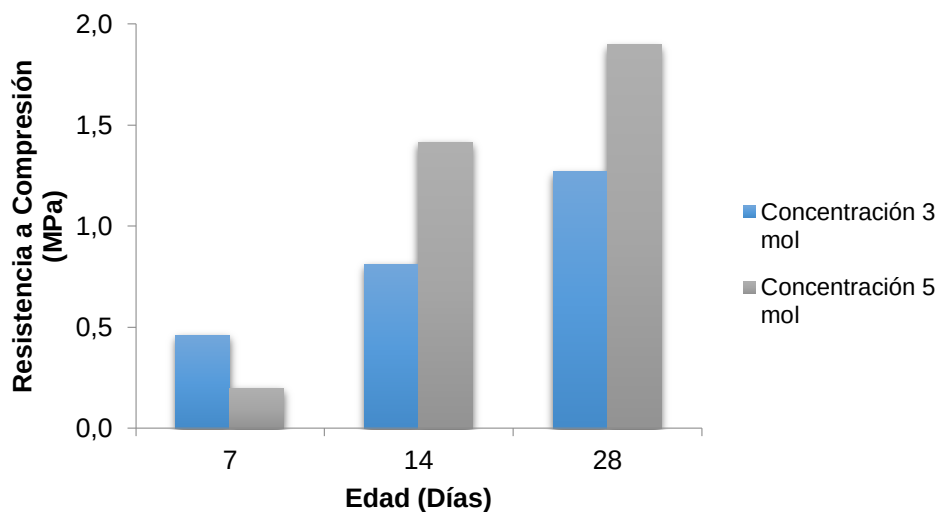
Ilustración 13. Pastas de Ceniza volante a distintas molaridades.



Fuente: Elaboración Propia

En la siguiente gráfica se muestran los valores de la resistencia a compresión de las mezclas realizadas con relación 1.5 de Na_2SiO_3 / NaOH , con concentraciones molares de 3 y 5 de NaOH . Se observa que la mezcla que mejor se comportó fue la realizada con 5 mol, aunque a la edad de 7 días presentó un valor de 0.2 MPa por debajo de la realizada con 3 mol, a edad de 14 y 28 días su resistencia aumenta considerablemente con respecto a la de 3 mol (Ver Tabla 7).

Gráfica 1. Resistencia a Compresión de pastas de ceniza volante en relación 1.5

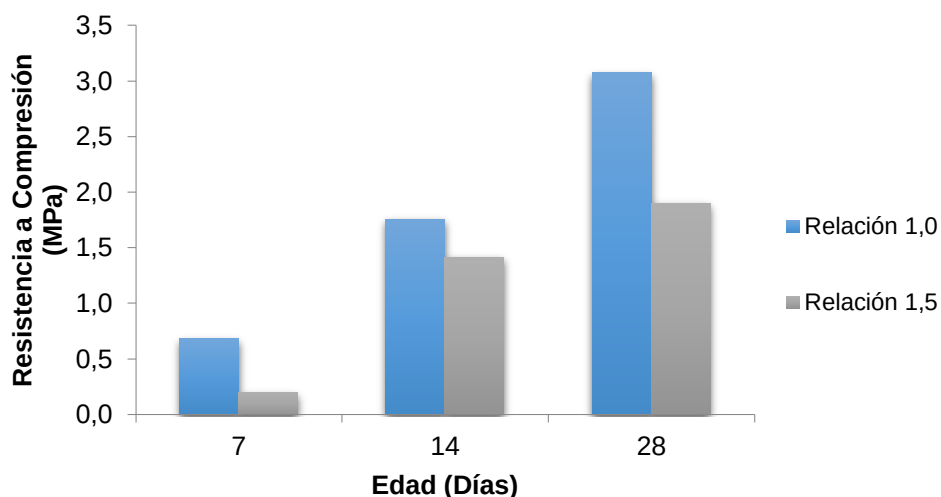


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 2 se observa las resistencias que se obtuvieron en las mezclas

realizadas con relaciones molares de 1.0 y 1.5 de Na_2SiO_3 / NaOH manejando una concentración de 5 mol de NaOH . Se observa que la mezcla que obtuvo un mejor comportamiento en la resistencia a compresión fue la realizada con la relación molar 1.0, dando como valor máximo a 28 días 3.07 MPa en comparación con la relación molar 1.5 que obtuvo una resistencia de 1.90 MPa. Con esto se puede estimar que la CV Tipo F tendrá un mejor comportamiento frente a la resistencia activándola alcalinamente con una relación molar 1.0.

Gráfica 2. Resistencia a Compresión de pastas de ceniza volante elaboradas con concentración de 5 mol de NaOH .



Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a los datos mostrados anteriormente, se puede analizar que la ceniza volante tiene un mejor comportamiento cuando se utiliza una molaridad alta con una relación molar baja, lo cual indica que es necesario utilizar altas concentraciones molares de NaOH en relación con el Na_2SiO_3 manejando una relación molar baja para que el precursor reaccione, además se evidencio la necesidad de la implementación de una temperatura de curado para lograr una reacción entre el material y activador.

7.1.3 Ceniza Volante + Metacaolín (CV + MK)

Después de realizadas las pastas con ceniza volante activada alcalinamente, se observó que este geopolímero no mostraba condiciones favorables, por lo tanto, fue necesario realizar pastas con la combinación de Ceniza Volante (CV) y Metacaolín (MK) con tres (3) diferentes porcentajes de peso del material cementante (70% CV - 30% MK, 30% CV - 70% MK y 50% CV - 50% MK).

Ilustración 14. Pastas de CV y MK activadas alcalinamente con diferentes soluciones.



Fuente: Elaboración Propia

En esta etapa no se activó el material cementante con solo NaOH, debido al comportamiento con la CV, adicionalmente se realizó una activación agregando al Na_2SiO_3 una pequeña cantidad de 4 mol de NaOH para observar el comportamiento en la activación de los precursores, esto para los porcentajes en peso de masa cementante, 70% CV - 30% MK (Ver Tabla 7) y 30% CV - 70% MK (Ver Tabla 8).

En cuanto al porcentaje 50% CV - 50% MK, se realizó una nueva activación con 11 mol de NaOH, para visualizar el comportamiento de la activación del material en función de la molaridad (Ver Tabla 9). Las muestras fueron fraguadas a temperatura de 70 °C en horno con una duración de 24 horas.

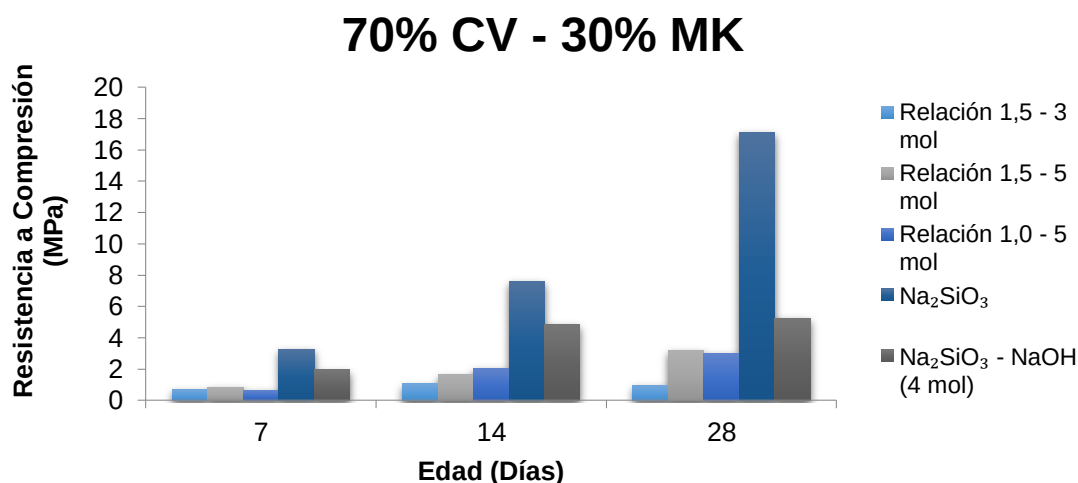
Tabla 7. Resistencia a Compresión de pastas realizadas con 70% CV y 30%MK.

Porcentaje	Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
			7 (días)	14 (días)	28 (días)
70% CV 30% MK	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.5$	3	0.72	1.07	0.97
		5	0.86	1.65	3.22
	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.0$	5	0.67	2.07	3.01
	Na_2SiO_3	-	3.30	7.64	17.15
	Na_2SiO_3 - NaOH (4 mol)	4	1.96	4.85	5.27

Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 3 se observa el comportamiento de las muestra con 70% CV - 30% MK activadas con diferentes soluciones, algunas de éstas ya establecidas por el comportamiento previo que se obtuvo en la CV. El activador que obtuvo un mejor comportamiento en la resistencia a compresión, es la mezcla activada con Na_2SiO_3 , presentando una resistencia a 28 días de 17.15 MPa superando en un 48.3% a la mezcla activada Na_2SiO_3 - NaOH (4 mol).

Gráfica 3. Resistencia a Compresión de pastas de 70% CV y 30% MK activadas a diferentes molaridades.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se observan los valores de la resistencia a la compresión utilizando porcentajes de 30% CV - 70% MK, donde además se emplean distintos activadores para la elaboración de la mezcla, como se mencionó anteriormente, lo cual tiene como finalidad determinar qué molaridad o relación permitirá mejores resistencias.

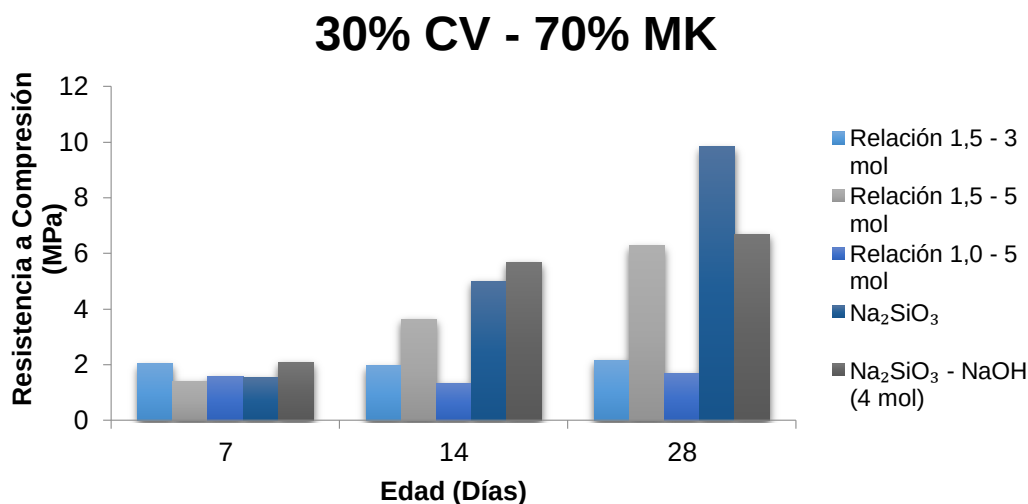
Tabla 8. Resistencia a Compresión para porcentajes del 30% CV y 70% MK

Porcentaje	Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
			7 (días)	14 (días)	28 (días)
30% CV 70% MK	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.5$	3	0.72	1.07	0.97
		5	0.86	1.65	3.22
	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1.0$	5	0.67	2.07	3.01
		-	3.30	7.64	17.15
	Na_2SiO_3	-	1.96	4.85	5.27
	NaOH	4			

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 4, muestra las resistencias obtenidas empleando 30% CV - 70% MK como material cementante, se evidencia que la utilización del activador Na_2SiO_3 presenta un mejor comportamiento en la resistencia en los días evaluados, comparándolo con la mezcla activadora NaOH (4 mol) - Na_2SiO_3 , la primera supera en un 31.9% la resistencia, aunque es favorable la resistencia, esta investigación está orientada en activar los precursores con la implementación de los dos activadores.

Gráfica 4. Resistencia a Compresión de pastas de 30% CV y 70% MK activadas a diferentes molaridades y relaciones



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 9 se presentan los valores para las pastas realizadas con 50% CV y 50% MK, donde se emplean diferentes activadores, con estos resultados se procede a realizar la gráfica correspondiente para efectuar el análisis.

Tabla 9. Resistencia a Compresión de pastas realizadas en combinación de 50% CV y 50% MK

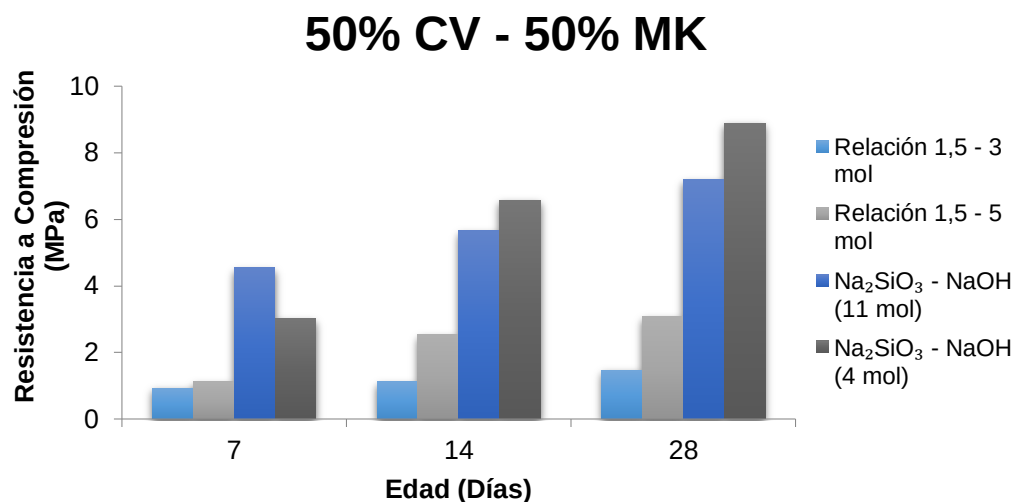
Porcentaje	Activador	Molaridad (mol)	Resistencia a Compresión (MPa)		
			7 (días)	14 (días)	28 (días)
50% CV 50% MK	$\frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 1,5$	3	0.93	1.11	1.46
		5	1.11	2.52	3.07
	Na ₂ SiO ₃	-	4.54	5.65	7.19
	NaOH (11mol)	11			
	Na ₂ SiO ₃	-	3.01	6.58	8.89
	NaOH	4			

Fuente: Elaboración propia

La gráfica 5 muestra las resistencias a compresión de las pastas elaboradas con

50% CV y 50% MK activadas con distintas relaciones y molaridades. En esta gráfica se observa que a los 7 días el que mejor obtuvo resistencia a compresión fue la mezcla realizada con Na_2SiO_3 -NaOH (11 mol), pero luego a la edad de 14 días se comportó mejor la mezcla realizada con Na_2SiO_3 -NaOH (4 mol) al igual que en los 28 días. De lo anterior se analiza que la mezcla realizada con concentración 11 mol de NaOH presenta un desmejoramiento en su resistencia luego de los 7 días y la realizada con concentración 4 mol de NaOH tiene un aumento constante sin presentar bajas en sus resistencias.

Gráfica 5. Resistencia a Compresión de pastas de 50% CV y 50% MK activadas a diferentes molaridades



Fuente: Elaboración propia

De lo realizado anteriormente, se puede analizar que la implementación de los activadores Na_2SiO_3 y la combinación Na_2SiO_3 - NaOH demuestran una mejora en la resistencia a compresión, además se reconoció que entre los dos materiales utilizados, en mayor porcentaje de CV se obtiene un mejor comportamiento.

7.2 ESTABLECER EL PORCENTAJE DE CONCENTRACIÓN DE ÓXIDO DE SODIO PARA REALIZAR CUBOS DE MORTERO

Una vez realizado el estudio preliminar, se determina de investigaciones donde emplean la CV Tipo F, que la concentración de la solución utilizada no se encuentra en función de la molaridad sino en el porcentaje de concentración de Na_2O presente en el material que se desea activar. Por esta razón, se emplea porcentajes de concentración para la realización de los cubos de mortero, tomando como base activadores utilizados en las pastas.

Para la elaboración de los cubos de mortero se utiliza la norma NTC 220 donde especifica las cantidades de arena, material que en este caso es la CV - MK y la cantidad de agua que se debe emplear. A continuación, se presenta la dosificación con base en la concentración de Na_2O .

Tabla 10. Dosificación cubos de mortero de 50x50 mm con base en la concentración de Na_2O

	CONCENTRACIÓN DE Na_2O				
	5.5%	10%	12%	15%	20%
Material cementante (CV - MK) - (gr)	500	500	500	500	500
Arena (gr)	1375	1375	1375	1375	1375
Relación A/C	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
Agua - (ml)	17	53	-3	-66	-172
Molaridad NaOH - (mol)	4	16	8	8	8
NaOH - (ml)	132	60	143	179	239
Na_2SiO_3 - (ml)	58	105	126	157	210

Fuente: Elaboración propia

7.2.1 Realizar cubos de morteros y someterlos a ensayo de compresión con diferentes porcentajes de concentración de Na_2O .

A continuación, se presenta diez (10) diferentes muestras de cubos de morteros realizadas para esta investigación (ver Tabla 11). Allí, se evidencia las variaciones en el porcentaje en peso del material cementante, del activador alcalino, concentración de Na_2O y relación A/C; para facilidad de compresión, la relación A/C que se maneja en cementos alcalinos es la cantidad de agua que posee el activador más la cantidad de agua que se debe adicionar.

Para cada muestra se realizan un total de 12 cubos, obteniendo tres (3) valores por edad estudiada para así efectuar un promedio entre estos y obtener un valor con una probabilidad de mayor exactitud.

Tabla 11. Muestras realizadas con diferentes soluciones activadoras y concentraciones de Na_2O .

Muestra	% en peso de CV – MK	Activador	Concentración de Na_2O	Relación A/C
M1	50 – 50	NaOH (4 mol) - Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M2	70 – 30	NaOH (4 mol) - Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M3	70 – 30	Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M4	70 – 30	NaOH (16 mol) - Na_2SiO_3	10.0%	0.4
M5	100 – 0	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	15.0%	0.5
M6	100 – 0	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	20.0%	0.5
M7	90 – 10	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	15.0%	0.5
M8	90 – 10	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	12.0%	0.5
M9	95 – 5	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	15.0%	0.5
M10	95 – 5	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	12.0%	0.5

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede evidenciar en la Tabla 12, en los activadores alcalinos se utilizó Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) y la combinación entre Hidróxido de sodio (NaOH) –

Silicato de sodio (Na_2SiO_3), la molaridad utilizada en el NaOH fue de 4 mol y, los porcentajes en peso de los geopolímeros fue de 50% - 50% y 70% - 30% de CV y MK, respectivamente. Estipulado lo anterior, se dio inicio a la elaboración de morteros.

Tabla 12. Muestras elaboradas con porcentajes 50/50 CV-MK y 70/30 CV-MK

Muestra	% en peso de CV - MK	Activador	Concentración de Na_2O	Relación A/C
M1	50 – 50	NaOH (4 mol) - Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M2	70 – 30	NaOH (4 mol) - Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M3	70 – 30	Na_2SiO_3	5.5%	0.4
M4	70 – 30	NaOH (16 mol) - Na_2SiO_3	10.0%	0.4

Fuente: Elaboración propia

Se realizó tres (3) muestras con porcentajes en peso del material cementante (50 % CV – 50 % MK y 70 % CV – 30 % MK). El activador, combinación NaOH (4 mol) – Na_2SiO_3 , el módulo $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH} = 1.0$ y de solo Na_2SiO_3 , la concentración Na_2O del 5.5% y relación A/C de 0.4 permanecen constantes para las 3 muestras.

A partir de los resultados que se obtienen de estas 3 muestras (Ver Tabla 13), se procede a realizar la respectiva gráfica, para así determinar el porcentaje de geopolímero y el activador con el cual los valores presentan un mejor comportamiento.

Tabla 13. Muestras realizadas con concentración del 5.5%

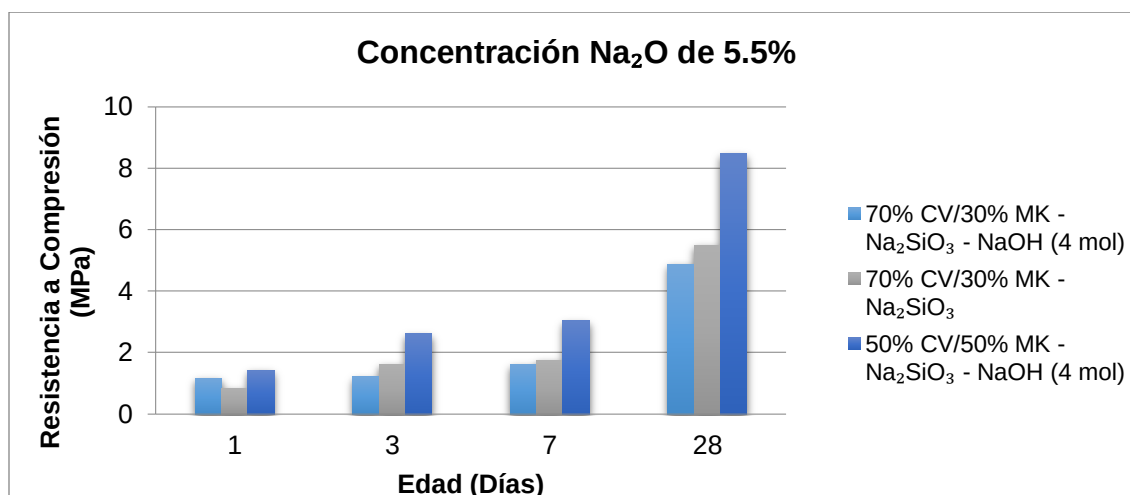
CONCENTRACIÓN 5.5% Na_2O						
Muestra	Mezcla	Activador	Resistencia a Compresión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
M1	50% CV 50% MK	NaOH 4mol Na_2SiO_3	1.41	2.61	3.03	8.47

M2	70% CV 30% MK	NaOH 4mol Na ₂ SiO ₃	1.16	1.21	1.61	4.87
M3	70% CV 30% MK	Na ₂ SiO ₃	0.84	1.62	1.75	5.50

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 6 se observa el comportamiento de las tres muestras realizadas con un porcentaje de concentración del 5.5% a edades de 1, 3, 7 y 28 días. Las resistencias a compresión que se muestran tanto en la gráfica 6 como en la Tabla 13, donde los valores son promedios de cada edad respectivamente. Se logra evidenciar que la mezcla que mejor se comportó fue la realizada con porcentajes del 50% CV - 50% MK, con la utilización como activador la combinación entre NaOH (4 mol) – Na₂SiO₃.

Gráfica 6. Resistencia a compresión con concentración del 5.5%



Fuente: Elaboración propia

Los valores correspondientes a la muestra 4, la cual es realizada con un porcentaje de concentración del 10% se pueden apreciar en la Tabla 14, donde se da a conocer el promedio correspondiente de los valores obtenidos en las distintas edades.

Tabla 14. Muestra realizada con 10% de Concentración de Na_2O .

CONCENTRACIÓN 10% Na_2O						
Muestra	Mezcla	Activador	Resistencia a Compresión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
M4	70% CV	NaOH 16mol	1.03	2.32	3.23	6.16
	30% MK	Na_2SiO_3				

Fuente: Elaboración propia

Comparando las muestras M1 con concentración de 5.5 % Na_2O y M4 con concentración de 10 % Na_2O , se analiza que los resultados de la resistencia a compresión en la muestra M1 son mejores que los obtenidos en la muestra M4. Y al comparar los resultados de las 4 muestras con la norma NTC 121, la cual estipula la resistencia mínima a compresión que debe alcanzar un mortero elaborado con cemento Tipo I, el valor de referencia para evaluar el comportamiento de los morteros es a la edad de 28 días con 24 MPa. Efectuando lo anteriormente mencionado, se evidencia que las resistencias a la edad de 28 días de las 4 muestras no cumplen con lo establecido en la NTC 121.

Observando los resultados anteriores, se realizó dos (2) muestras de cubos de morteros (ver Tabla 15) con diferentes concentraciones de Na_2O , 15% y 20%, con el fin de averiguar si la ceniza que se utilizó para la realización de los morteros no poseía las propiedades adecuadas y por lo cual estaba presentando resistencias a la compresión bajas. Se realizaron cubos para evaluar el comportamiento hasta la edad de 7 días por lo mencionado anteriormente. Las muestras que se realizaron presentan las siguientes generalidades:

- Masa cementante: 100% CV - 0% MK
- Activador alcalino: 8 mol NaOH - Na_2SiO_3
- Relación A/C: 0.5

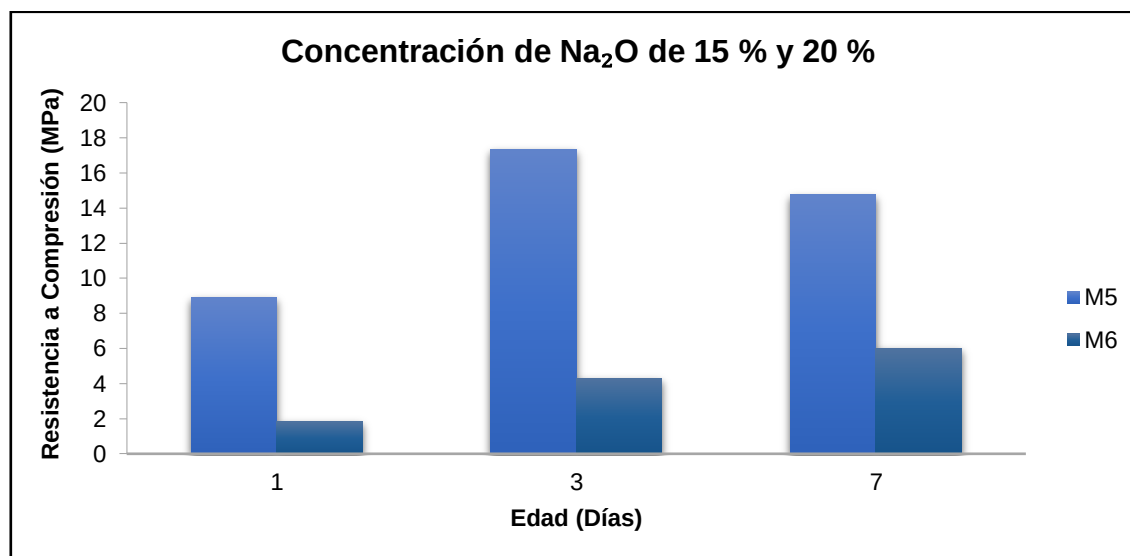
Tabla 15. Resistencia a Compresión de cubos de mortero con 100%CV – 0%MK con concentraciones de Na₂O de 15% y 20%

Muestra	% en peso de CV - MK	Activador	Concentración de Na ₂ O	Resistencia a Compresión (MPa)			
				1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
M5	100 – 0	NaOH 8mol Na ₂ SiO ₃	15.0%	8.88	17.33	14.74	-
M6	100 – 0	NaOH 8mol Na ₂ SiO ₃	20.0%	1.83	4.29	5.98	-

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 7, se observa que la CV posee un mejor comportamiento en l resistencia cuando se utiliza un porcentaje de concentración del 15% de Na₂O que al utilizar el 20%, debido a que la resistencia decae en un 41 % a la edad del mortero de 7 días.

Gráfica 7. Resistencia a compresión de cubos de mortero de 100% CV – 0% MK con concentración de Na₂O de 15% y 20%



Fuente: Elaboración propia

Por lo tanto, se evidenció que el material que posee bajas propiedades, las cuales

desmejoran la resistencia a compresión, es el MK, ya que al realizar los morteros con solo CV presentó mayores resultados que al realizarlos mezclando los dos materiales.

Se decide realizar mezclas con porcentajes mayores de CV puesto que en los antecedentes mencionados, se encontró que al manejar 100% CV tipo F en peso del material como uso alternativo al CP se obtienen resistencias superiores a las estipuladas por la norma NTC 121⁸⁰ y además se encuentra que el comportamiento del MK a la resistencia a compresión es desfavorable obteniendo resistencias muy bajas en comparación con las convencionales⁸¹.

Una vez determinado el comportamiento de la resistencia a compresión en función de la concentración de Na_2O , se procede a la elaboración de las muestras M7 y M9 con una concentración del 15% y, M8 y M10 con una concentración del 12%. Lo anteriormente mencionado se evidencia en la Tabla 16 y Tabla 17, respectivamente. Estas tablas muestran resultados de resistencia a compresión de acuerdo al porcentaje de peso de la masa cementante y con estos valores se determina la concentración de Na_2O óptima, consecuentemente se determinará la muestra óptima para la elaboración de las viguetas de mortero.

A continuación, se muestran los valores de las resistencias para las muestras M7 y M9 elaboradas con un porcentaje de concentración del 15%.

⁸⁰ ROBAYO NUÑEZ, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería. 2013. 58 p.

⁸¹ BONILLA AGUDELO, Julián David y NIÑO SOTELO, Sindy Paola. Estudio de la resistencia mecánica a compresión, tensión y durabilidad, en morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir de metacaolín. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad La Gran Colombia. 2017. 86 p.

Tabla 16. Resistencia a compresión de cubos de mortero con concentración de Na_2O del 15%

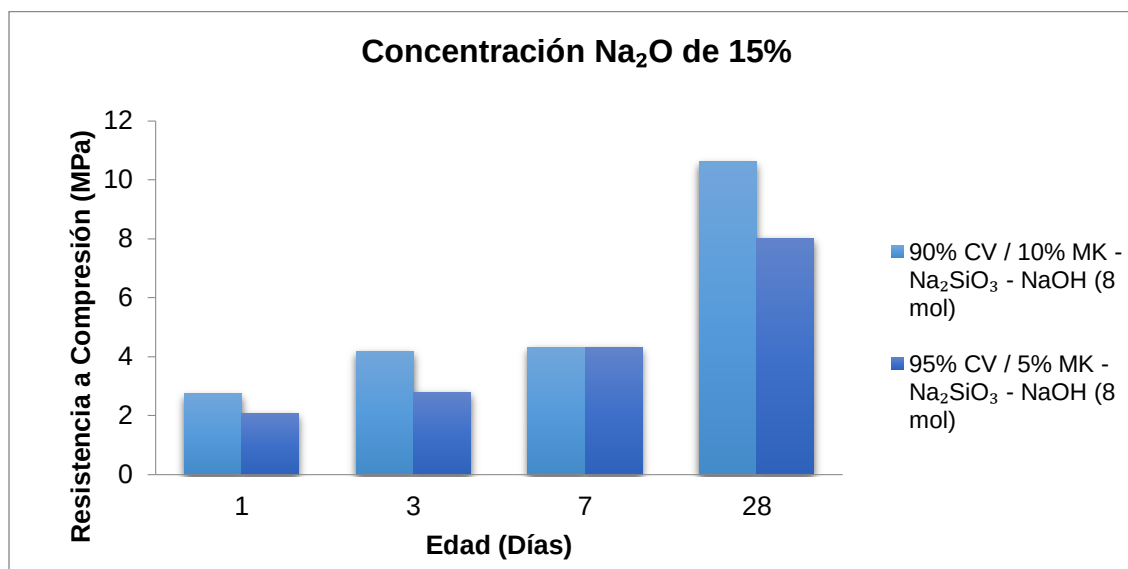
Muestra	Mezcla	Activador	Resistencia a compresión (MPa)			
			1 Días	3 Días	7 Días	28 Días
M7	90% CV 10% MK	NaOH (8 mol) Na_2SiO_3	2.73	4.16	4.31	11.14
M9	95% CV 5% MK	NaOH (8 mol) Na_2SiO_3	2.10	2.80	4.31	8.02

Fuente: Elaboración propia

Con los valores que se mostraron anteriormente se realiza la gráfica correspondiente para la comparación del comportamiento de la resistencia a compresión de las muestras elaboradas con un 15% de concentración.

En la Gráfica 8, se evidencia que la muestra con mejor comportamiento a la resistencia a compresión elaboradas con un 15% de concentración, es la muestra que posee un porcentaje de MK del 10%, el cual muestra un mejor comportamiento que la realizada con 5% MK.

Gráfica 8. Resistencia a compresión con concentración de 15%



Fuente: Elaboración propia

Los valores de las muestras M8 y M10 realizadas con un porcentaje de Na₂O del 12% se muestran a continuación.

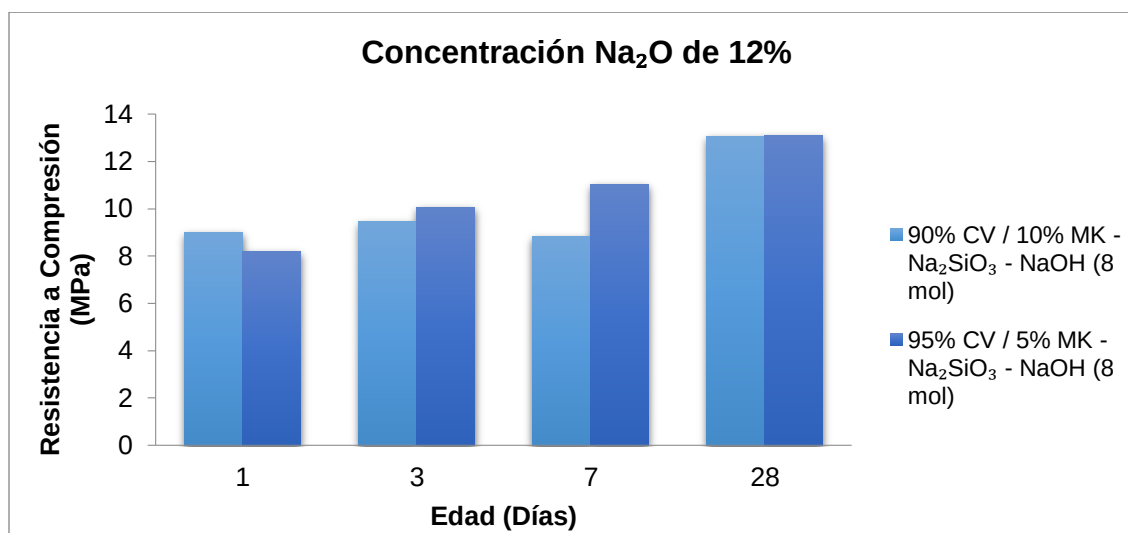
Tabla 17. Resistencia a compresión de cubos de mortero con concentración de Na₂O del 12%

Muestra	% en peso CV - MK	Activador	Resistencia a Compresión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
M8	90 - 10	NaOH 8 mol Na ₂ SiO ₃	10.44	9.45	8.83	13.05
M10	95 - 5	NaOH 8 mol Na ₂ SiO ₃	7.26	11.47	11.97	13.79

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente gráfica, se logra observar que la muestra M10, realizada con 95% CV – 5% MK, tiene un comportamiento superior en la resistencia con un valor de 13.79 MPa a la edad de 28 días superando a la muestra M8 realizada con 90% CV - 10% MK, también se evidencia que la muestra M10 tiene un comportamiento ascendente lineal en su resistencia, pasando lo contrario con la muestra M8.

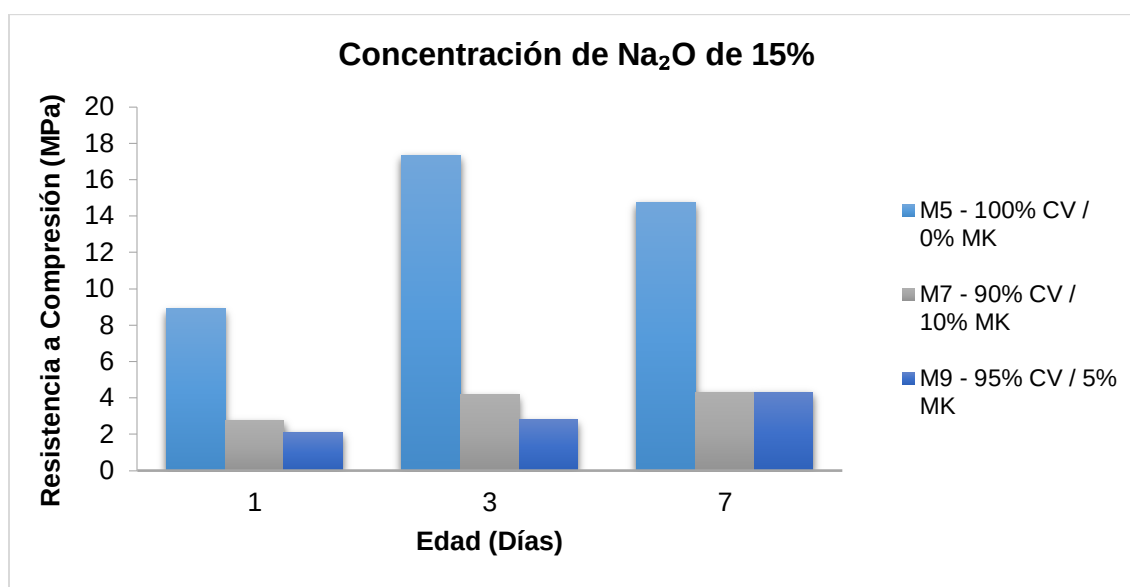
Gráfica 9. Resistencias a compresión con 12% de concentración



Fuente: Elaboración propia

En cuanto al porcentaje de concentración del 15 % de Na_2O se determina que al utilizar 100% CV - 0% MK la resistencia a compresión aumenta considerablemente con respecto a los otros porcentajes (ver Gráfica 10), y al comparar los resultados con la NTC 121 se define que alcanza el valor mínimo requerido de 15 MPa a 7 días de edad; los resultados se hicieron a esta edad para analizar el comportamiento a temprana edad de los morteros.

Gráfica 10. Resistencia a compresión en morteros activados alcalinamente con concentración de Na_2O de 15%



Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Matriz de resultados

Se presenta una matriz con los resultados obtenidos en la elaboración de muestras de cubos de morteros activados alcalinamente para visualizar el comportamiento de cada muestra a cuatro (4) edades, 1, 3, 7 y 28 días, basadas en la NTC 121 para su correspondiente análisis.

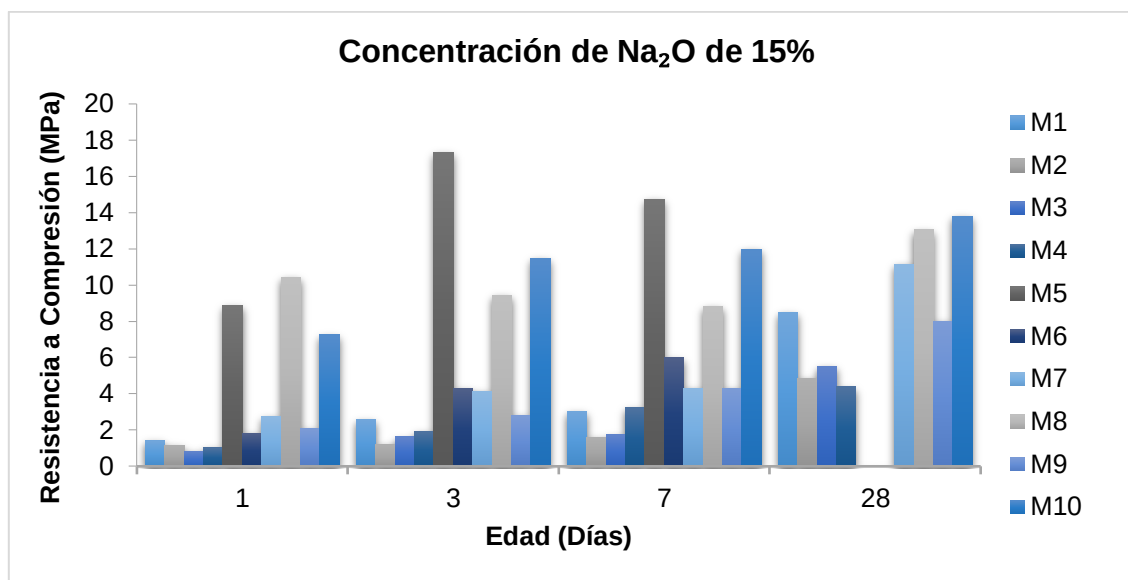
Tabla 18. Recuento de resultados en muestras de morteros elaboradas con CV - MK activados alcalinamente

Muestra	% en peso de CV - MK	Activador	Concentración de Na ₂ O	Relación A/C	Resistencia a Compresión (MPa)			
					1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
M1	50 - 50	NaOH (4 mol) - Na ₂ SiO ₃	5.5%	0.4	1.41	2.61	3.03	8.47
M2	70 - 30	NaOH (4 mol) - Na ₂ SiO ₃	5.5%	0.4	1.16	1.21	1.61	4.87
M3	70 - 30	Na ₂ SiO ₃	5.5%	0.4	0.84	1.62	1.75	5.50
M4	70 - 30	NaOH (16 mol) - Na ₂ SiO ₃	10.0%	0.4	1.03	1.92	3.23	4.38
M5	100 - 0	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	15.0%	0.5	8.88	17.33	14.74	-
M6	100 - 0	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	20.0%	0.5	1.83	4.29	5.98	-
M7	90 - 10	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	15.0%	0.5	2.73	4.16	4.31	11.14
M8	90 - 10	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	12.0%	0.5	10.44	9.45	8.83	13.05
M9	95 - 5	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	15.0%	0.5	2.08	2.79	4.31	8.02
M10	95 - 5	NaOH (8 mol) - Na ₂ SiO ₃	12.0%	0.5	7.26	11.47	11.97	13.79

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Gráfica 11, del total de muestras de mortero elaboradas, las que mejor comportamiento tuvieron frente a la resistencia a compresión a las cuatro (4) edades analizadas, fueron M5, M8 y M10. A pesar de que la M5 obtuvo altas resistencias a edad temprana, ésta no se tiene en cuenta ya que, esta investigación busca reemplazar parcialmente el cemento Pórtland con la mezcla de los dos (2) precursores: CV Tipo F y MK.

Gráfica 11. Resistencia a compresión de 10 muestras de cubos de mortero activados alcalinamente a edades de 1, 3, 7 y 28 días



Fuente: Elaboración propia

7.2.3 Definir la dosificación del material óptimo

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente, se escoge la muestra M10, con una concentración de Na_2O de 12%, una solución alcalina de NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3 y un porcentaje en peso de la masa cementante de 95%CV - 5%MK, debido a que su comportamiento en la resistencia fue aumentando a medida que pasaba el tiempo contrario lo que sucedió con la muestra M8 que a los siete (7) días de edad disminuye su resistencia pasando de 9.45 MPa a 8.83 MPa a los tres (3) días de edad. Aunque a edad temprana la muestra que mejor se comportó fue M5, se aclara que esta investigación está orientada en el reemplazo total del cemento Portland con la mezcla de los dos (2) precursores Ceniza Volante Tipo F y Metacaolín.

7.2.4 Realizar viguetas de mortero y someterlas a ensayo de flexión con la dosificación de material óptimo de los cubos de mortero.

Definida la dosificación de material en cubos de morteros, donde presentó un mejor comportamiento en la resistencia a la compresión, se elaboran doce (12) prismas de 40x40x160 mm de mortero, de acuerdo a la norma *INV E 324-07 Resistencia a la Flexión de Morteros de Cemento Hidráulico*⁸². Se tomaron tres (3) puntos por cada edad de curado de las viguetas, para la correcta ejecución del ensayo se debe tener en cuenta las recomendaciones expuestas en la norma, se utilizó una luz entre apoyos de 119 mm y se cargó a la mitad, es decir a 80 mm de los extremos, como se observa en la siguiente imagen.

Ilustración 15. Ensayo de flexión en viguetas con 95% CV - 5% MK activadas alcalinamente con una solución de NaOH (8 mol) - Na₂SiO₃



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 19 se presenta el valor promedio de la resistencia a flexión de los tres (3) puntos tomados. Se observa que la resistencia a flexión a 28 días disminuye en un 62% respecto a la resistencia a 7 días.

Tabla 19. Resistencia a la flexión en viguetas de morteros activados alcalinamente

Resistencia a Flexión (MPa)			
1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
0.12	0.21	0.26	0.10

Fuente: Elaboración propia

⁸² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. INV-E 324. Bogotá D.C. 2007. p. 1.

7.3 COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y A FLEXIÓN DEL MORTERO ELABORADO CON GEOPOLÍMEROS ACTIVADOS ALCALINAMENTE Y EL MORTERO CONVENCIONAL

Esta fase se compararon las propiedades mecánicas: resistencia a compresión y flexión, de morteros activados alcalinamente y morteros convencionales. Una vez se selecciona el porcentaje en peso del material cementante y la concentración de la solución en el mortero activado alcalinamente se determina si las resistencias obtenidas se encuentran cercanas o superiores a las resistencias del cemento convencional.

7.3.1 Comparación de los morteros elaborados con geopolímeros y cemento convencional

7.3.1.1 Resistencia a Compresión

Para la comparación de los datos de morteros elaborados con los geopolímeros y morteros elaborados con cemento Portland, se elabora inicialmente una tabla con los resultados del ensayo a compresión para poder proceder a la realización de la gráfica correspondiente. Como se muestra a continuación:

Tabla 20. Resistencia a compresión de muestras elaboradas con CV-MK y CP

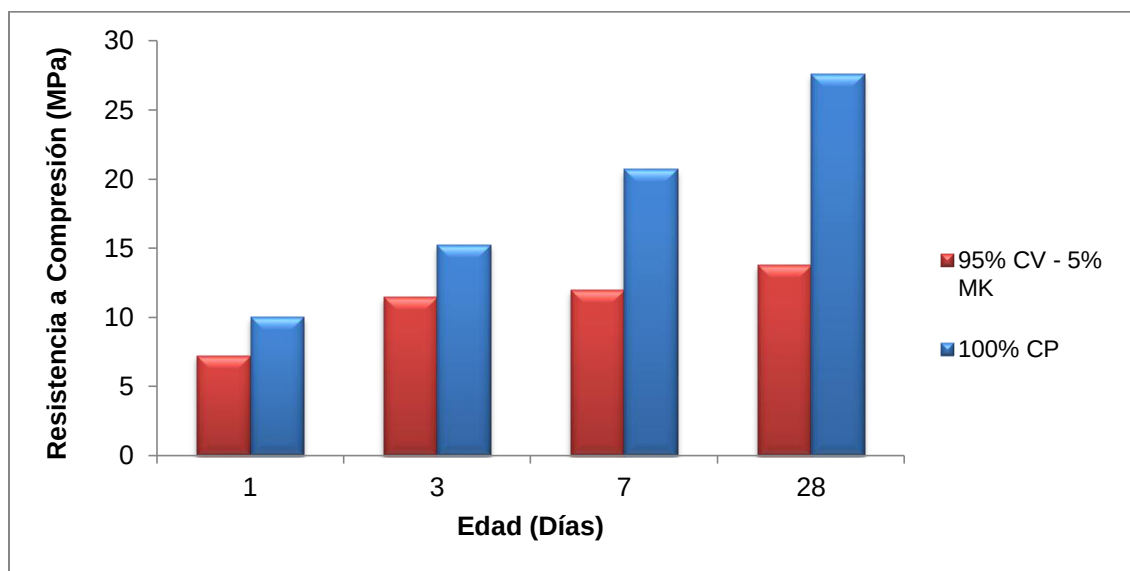
Mezcla	Activador	Concentración	Resistencia a compresión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
95% CV 5% MK	NaOH (8 mol) - Na_2SiO_3	12%	7.26	11.47	11.97	13.79
100% CP	-	-	10.04	15.24	20.71	27.64

Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 12, se observa que el mortero activado alcalinamente no supera la

resistencia a compresión frente al mortero convencional a los 28 días de edad, siendo 13.79 MPa y 27.64 MPa, respectivamente.

Gráfica 12. Resistencia a Compresión de CV-MK y CP



Fuente: Elaboración propia

7.3.1.2 Resistencia a Flexión

En este caso se elaboraron probetas de cemento portland además de las realizadas con el porcentaje de material cementante, para lograr una comparación y así determinar si el comportamiento del material cementante trabajado en esta investigación poseen mejores capacidades a la flexión. Los datos obtenidos en las dos mezclas realizadas se dan a conocer en la siguiente tabla.

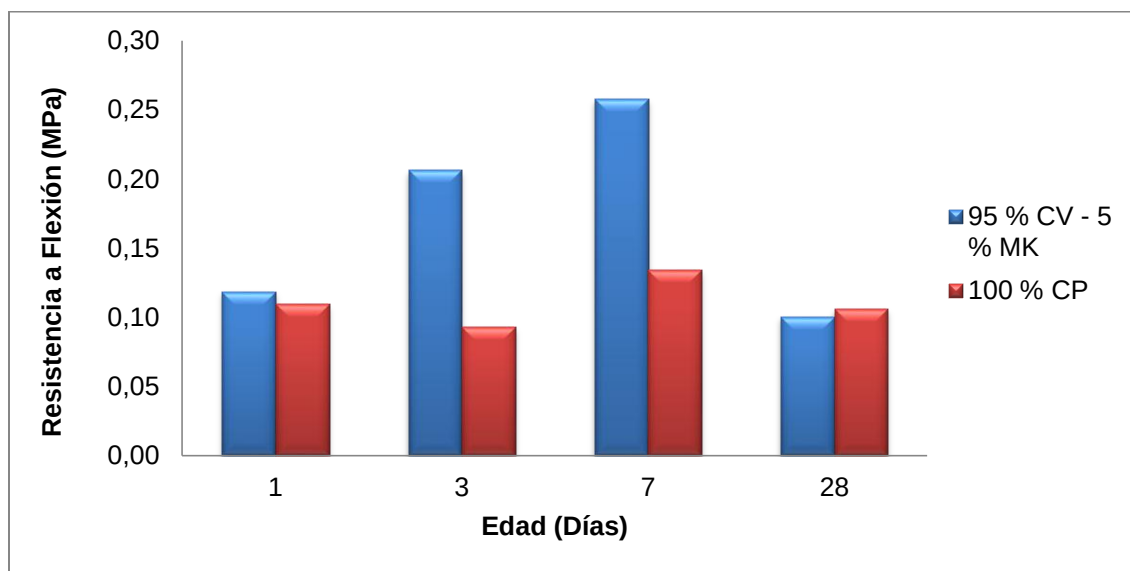
Tabla 21. Resistencia a Flexión en CV-MK y CP

Material cementante	Concentración de Na ₂ O	Activador	Resistencia a Flexión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
95 % CV 5 % MK	12%	Na ₂ SiO ₃ - NaOH (8 mol)	0.12	0.21	0.26	0.10
100 % CP	-	-	0.11	0.09	0.13	0.11

Fuente: Elaboración propia

Si se observa la Gráfica 13, se evidencia que las viguetas realizadas con el material cementante empleado en esta investigación tiene un mejor comportamiento en las edades tempranas (1,3 y 7 días) en comparación de las realizadas con CP, al cabo de los 28 días de edad la resistencia de las viguetas elaboradas con geopolímeros decae y ésta a su vez es inferior en un 9% en comparación con las viguetas elaboradas con cemento convencional.

Gráfica 13. Comparación de la Resistencia a Flexión



Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Comparación de la resistencia a compresión de los morteros elaborados con geopolímeros y cemento convencional en curado en agua salada

Para comparar los resultados de los dos tipos de morteros se realizaron nuevos cubos con la mezcla óptima establecida en la fase 2 de esta investigación y con cemento convencional, se sumergieron en agua salada artificial. A continuación, se presenta la tabla con los resultados obtenidos en laboratorio.

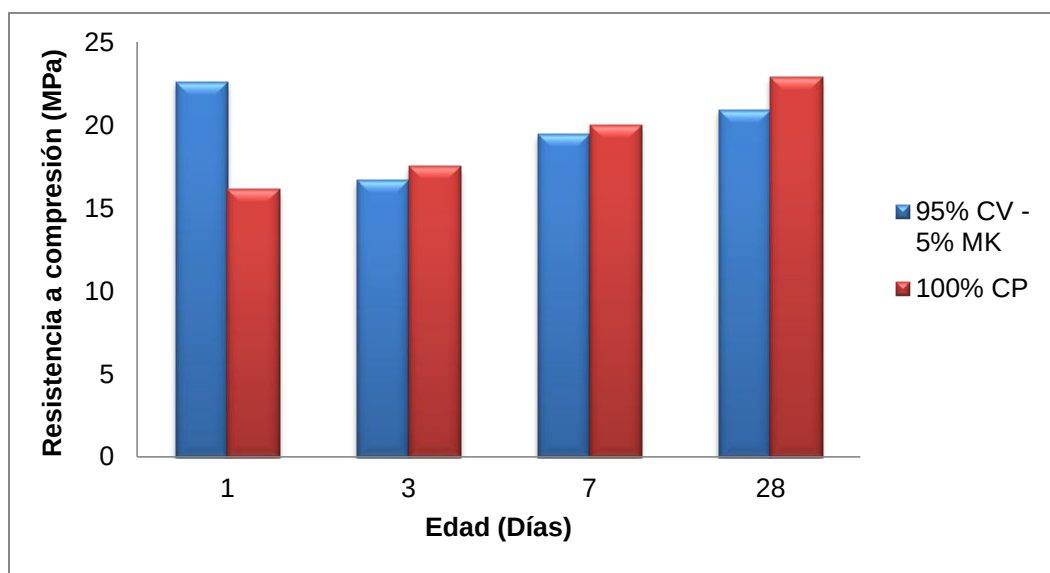
Tabla 22 Resistencia a compresión en CV-MK y CP curadas en agua salada

% en peso	Concentración de Na ₂ O	Activador	Resistencia a Compresión (MPa)			
			1 Día	3 Días	7 Días	28 Días
95% CV - 5% MK	12%	Na ₂ SiO ₃ - NaOH (8 mol)	22,61	16,68	19,45	20,92
100% CP	-	-	16,14	17,51	20,01	22,89

Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 14, se evidencia que el mortero elaborado con la mezcla óptima de geopolímero a un día de curado en agua salada supera la resistencia tanto del mortero convencional como al valor mínimo requerido en la NTC 121, que a tres días, edad mínima de referencia, es de 8 MPa, pero aumentado la edad la resistencia decae considerablemente y va aumentando linealmente sin superar la resistencia del primer día, por otro lado, los morteros elaborados con cemento convencional tiene un crecimiento de la resistencia lineal a medida que aumentaba la edad de los morteros.

Gráfica 14 Resistencia a compresión en CV-MK y CP curadas en agua salada



Fuente: Elaboración propia

8. CONCLUSIONES

- La caracterización de la Ceniza Volante mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X fue vital para el análisis del comportamiento de los morteros, ya que en él se pudo constatar el tipo de ceniza que se estaba empleando, en cuanto al Metacaolín se evidencio que no contenía el compuesto CaO , lo que se puede concluir por qué el material no tuvo un comportamiento aceptable.
- Se observa que al utilizar un mayor porcentaje de Ceniza Volante en peso del material cementante, la resistencia a compresión aumenta en comparación con mayor porcentaje de Metacaolín, por otro lado, emplear Na_2SiO_3 como único activador de los precursores de las pastas realizadas presentan un mejor comportamiento en la resistencia a compresión pero evaluándolo en los morteros éste activador no se comporta de la misma forma. Como ya se había mencionado anteriormente, este trabajo de grado tenía como lineamiento emplear como activador alcalino la mezcla de Na_2SiO_3 y NaOH y se concluye en este apartado que con mayor contenido de silicato de sodio y baja molaridad de hidróxido de sodio, el comportamiento tiende a ser positivo en la resistencia. Esto tiene concordancia con las investigaciones que se han realizado a este material, ya que las propiedades mecánicas de los geopolímeros son mejoradas a través del incremento en la concentración de silicatos solubles.
- Para obtener un mejor comportamiento en las propiedades de los geopolímeros se debe emplear los activadores alcalinos en función de la concentración de Na_2O presente en el material cementante a activar. El porcentaje de concentración que mejor comportamiento tuvo frente a

porcentajes de CV - MK fue el de 12%, se evidenció que al aumentar dicho porcentaje las resistencias tendían a disminuir.

- Entre los dos materiales empleados en esta investigación, el material que mejor se comporta es la ceniza volante Tipo F, ya que al disminuir el porcentaje de Metacaolín a un 5% y 10% en peso de la masa cementante las resistencias aumentan considerablemente que cuando se utilizaron porcentajes de 50% y 70% en peso de la masa cementante, lo que concuerda con los antecedentes encontrados, ya que se demuestra que la Ceniza Volante Tipo F posee un mejor comportamiento que el Metacaolín. Y aunque la mezcla que mejor se comportó, 95% CV - 5% MK con concentración del 12% y activación de Na_2SiO_3 y 8 mol de NaOH, donde obtuvo a los 28 días de edad del mortero 13,79 MPa, no supera en los resultados del mortero elaborado con cemento convencional, ya que estuvo por debajo en un 50%, a edades tempranas tiende a comportarse positivamente.
- Como conclusión final, se define que la mezcla óptima establecida no se recomienda para uso estructural, ya que al compararla con los valores de la norma NTC 121, estos resultados no cumplen con las resistencias mínimas establecidas allí, ya que especifica que a los 28 días debe tener un valor mínimo de 24 MPa y el valor obtenido en la investigación fue de 13,79 MPa, estando por debajo en un 43%.

RECOMENDACIONES

Por los bajos resultados que se obtuvieron en las muestras realizadas, se recomienda la implementación de un Metacaolín de diferente procedencia para combinarlo con la Ceniza Volante de la termoeléctrica TERMOPAIPA, ya que ésta obtuvo un mejor comportamiento a compresión individualmente que cuando se realizaron las combinaciones con los porcentajes utilizados.

Para la elaboración de futuras investigaciones, se recomienda un análisis más detallado en la caracterización tanto química como física de los materiales, para poder determinar si en la parte química sucede algún proceso el cual puede disminuir las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la presente, además de que se puede obtener un conocimiento más amplio y así entender a más detalle todo lo que se puede estar presentando en los materiales.

También se recomienda la implementación de otro tipo de Ceniza Volante y de distinta procedencia, es decir, de otra termoeléctrica, para determinar el comportamiento estructural y que a su vez logre estar en los estándares establecidos por la norma. O en su defecto, comparar simultáneamente estos tipos de materiales con los de otras procedencias en Colombia, esto hace más interesante la investigación debido a que se podría definir cuál industria elabora los mejores precursores para el reemplazo total del cemento Pórtland.

Finalmente, se recomienda realizar ensayos de durabilidad más detallados, ya que estos geopolímeros se comportan a nivel mecánico positivamente a edades tempranas.

BIBLIOGRAFÍA

- ARENAS CABELLO, Francisco J. Los materiales de construcción y el medio ambiente [en línea], [Consultado 08-09-2016]. Disponible en Internet: http://huespedes.cica.es/gimadus/17/03_materiales.html
- ARIAS JARAMILLO, Yhan Paul. Incidencia de la temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de cenizas de carbón. Tesis Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Departamento de Materiales y Minerales. 2013. 69 p.
- ARQHYS. Geopolímeros [en línea], 2012 [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>
- ASOCIACIÓN DE FABRICANTES DE CEMENTO PORTLAND (AFCP). Proceso de fabricación [en línea], [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://www.afcp.org.ar/index.php?IDM=21&>.
- BONILLA AGUDELO, Julián David y NIÑO SOTELO, Sindy Paola. Estudio de la resistencia mecánica a compresión, tensión y durabilidad, en morteros elaborados con geopolímeros sintetizados a partir de metacaolín. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bogotá D.C. Universidad La Gran Colombia. 2017. 90 p.
- CEMENTO PORTLAND [Anónimo]. Componentes del Cemento Portland. [en línea], [consultado 03-06-2017]. Disponible en Internet: <http://ing.unne.edu.ar/pub/quimica/cemento.pdf>
- CEMEX S.A.B. ¿Cómo hacemos cemento? [en línea], [consultado 08-09-

- 2016]. Disponible en Internet: <http://www.cemex.com/ES/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx>.
- CEMEX S.A.B. Productos y servicios: Cemento [en línea], [consultado 13-07-2017]. Disponible en Internet: <http://archive.cemex.com/ES/ProductosServicios/Cemento.aspx>
 - CENIZA VOLANTE. Antecedentes [Anónimo] [en línea], [consultado 03-06-2017]. Disponible en Internet: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capitulo2.pdf>.
 - DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE). Estadística de Cemento Gris – ECG [en línea], [consultado 10-07-2017]. Disponible en Internet: www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris
 - DAVIDOVITS, Joseph. Polymers and Geopolymers. Introduction. En: Geopolymer Chemistry and Applications. 3 ed. Saint-Quentin: Institut Géopolymère, 2011. p. 3-17.
 - FERNÁNDEZ JIMENEZ, A., PALOMO, A. y CRIADO, M. Activación alcalina de cenizas volantes. Estudio Comparativo entre activadores sódicos y potásicos. Madrid: Materiales de construcción, 2006. Vol. 56 (281). p. 51-65. ISSN 0465-2746.
 - HEADWATERS CONSTRUCTION MATERIALS [en línea], [consultado 10-07-2017] Disponible en Internet: <http://flyash.com/about-fly-ash/>
 - INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN.

Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado. NTC 220. Bogotá D.C: ICONTEC, 2004. p. 1-9.

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería civil y Arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto. NTC 3493. Bogotá D.C: ICONTEC, 2017. p. 1-9.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones Físicas Y Mecánicas. NTC 121. Bogotá D.C: ICONTEC, 1982. p. 1-7.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. INV-E 324. Bogotá D.C. 2007. p. 1-9.
- KEYTE, L.M. Fly ash glass chemistry and inorganic polymer cements. En: PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 15-36.
- MARTÍNEZ LÓPEZ, Carolina et al. Evaluación de las características de toxicidad de dos residuos industriales valorizados mediante procesos de geopolimerización. Medellín: [s.n.], 2015. DYNA 82 (190). p. 74-81. ISSN 2346-2183.
- MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de pb–zn. Trabajo de grado Maestría en Ciencias con

orientación en Materiales de Construcción. Monterrey. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Civil. 2015. 106 p.

- PADIAL, J. ¿Qué es el hidróxido de sodio o soda cáustica? [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <https://curiosoando.com/que-es-el-hidroxido-de-sodio-o-sosa-caustica>
- PALOMO, A. et al. A review on alkaline activation: new analytical perspectives. En: Materiales de Construcción. 2014. Vol. 64. N° 315. ISSN 0465-2746. 24 p.
- PÉREZ, J y MERINO, M. Compresión [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en: <http://definicion.de/compresion/>.
- PÉREZ, J y MERINO, M. Flexión [en línea], [consultado 10-06-2017]. Disponible en: <http://definicion.de/flexion/>.
- POCHTECA. Silicato de sodio. [En línea]. [Consultado 10-06-2017]. Disponible en: <http://www.pochteca.com.mx/silicato-de-sodio/>
- PROPIEDADES MECÁNICAS: Ensayos [Anónimo] [en línea], [consultado 10-07-2017]. p. 1-19. Disponible en Internet: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAIL.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf>
- PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.) Introduction to geopolymers. En: Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 1-7. ISBN 978-1-84569-638-2.
- PROVIS, John; YONG, S y DUXSON, P. Nanostructure/microstructure of

metakaolin geopolymers. En: PROVIS, John. L. y VAN DEVENTER, Jannie. S. (eds.). Geopolymers. Structure, processing, properties and industrial applications. Australia: CRC y Woodhead Publishing Limited, 2009. p. 72-88. ISBN 978-1-84569-638-2

- RADA, James. ¿Por qué se ponen cenizas en el concreto? [en línea], [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: http://www.ehowenespanol.com/ponen-cenizas-concreto-como_88095/
- RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo; RESTREPO BAENA, Oscar Jaime y TOBÓN, Jorge Iván. Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Portland. Medellín: DYNA, 2006. Vol. 73 (150). p. 131-141. ISSN 0012-7353.
- RICHARDSON I.G. et al. La hidratación de agua y álcali-activa pastas de cementos Portland blanco y se mezcla con pulverizado baja en calcio ceniza de combustible. En: Cemento y hormigón de investigación. 2016. Vol. 83. p. 1-18.
- RILEM. International Union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures [en línea], [Consultado 12-07-2017]. Disponible en Internet: http://rilem.org/docs/2011171137_flyer-es.pdf.
- ROBAYO NUÑEZ, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería. 2013. 79 p.
- RODRÍGUEZ MARTÍNEZ, Erich David. Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas

geopoliméricos de ceniza volante. Trabajo de investigación. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. 2009. 77 p.

- SALAZAR JARAMILLO, A. ¿Qué es una puzolana? ECOINGENIERIA S.A.S. (en línea), 2015, [consultado 12-07-2017] Disponible en Internet: <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>
- SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá D.C.: Bhandar Editores Ltda., 1996. 349 p. ISBN 958-9247-04-0
- SANTALLA, Luis. Teoría de construcción. Metacaolín [en línea], [consultado 14-09-2016]. Disponible en Internet: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/metacaolin-definicion-y-ensayos/>
- SINGH S.P. et al. Una investigación experimental sobre características de Resistencia de cenizas volantes activadas alcalinamente. En: Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 11. p. 402-409.
- QUIMINET. ¿Cuáles son los usos y aplicaciones del silicato de sodio líquido y sólido? [en línea]. [consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-silicato-de-sodio-liquido-y-solido-27872.htm>
- VILLAMOR LORA, Álvaro. Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz. Trabajo de grado Ingeniero en Tecnologías Industriales. Sevilla. Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. 2016. 114 p.

- WARDHONO, Arie et al. La fuerza de escoria activada alcalinamente / Cenizas volantes de mortero se mezcla a temperatura ambiente. En: Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. P. 650 – 656.