

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN
MORTEROS ACTIVADOS ALCALINAMENTE CON CENIZA VOLANTE SIN LA
UTILIZACIÓN DE CEMENTO PORTLAND.**

JEFFERSON NORVEY LOZANO LOZANO

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2017-II**

**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN EN
MORTEROS ACTIVADOS ALCALINAMENTE CON CENIZA VOLANTE SIN LA
UTILIZACIÓN DE CEMENTO PORTLAND.**

JEFFERSON NORVEY LOZANO LOZANO

**Trabajo de grado como opción para optar al título de:
Ingeniero civil**

**MSc. ARNOLD GUTIÉRREZ
Asesor Disciplinar**

**Lic. SHELLEY VELASQUEZ
Asesora Metodológica**

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BOGOTÁ D.C
2017-II**

AGRADECIMIENTOS

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 Shelley Velázquez por apoyarnos y darme ánimos en los momentos difíciles y por su constancia en todo este proceso y por todo el apoyo brindado.

Jefferson Norvey Lozano

TABLA DE CONTENIDO

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	10
2. ANTECEDENTES	13
3. JUSTIFICACIÓN.....	18
4. OBJETIVOS	21
4.1 OBJETIVO GENERAL	21
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
5. MARCO TEÓRICO.....	22
5.1 MARCO CONCEPTUAL.....	22
5.1.1 Materiales Cementantes	22
5.1.2 Conglomerantes y Aglomerantes.	23
5.1.3 Geopolímeros	23
5.1.4 Cemento Portland	24
5.1.5 Cementos Adicionados	25
5.1.6 Cementos Activados Alcalinamente	25
5.1.7 Activador Alcalino	26
5.1.7.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)	27
5.1.8 Puzolana	27
5.1.9 Mortero	29
5.1.9.1. Propiedades del mortero	29
5.1.10 CENIZA VOLANTE	33
5.2 MARCO LEGAL	34
5.2.1 NTC 3493 “Ingeniería civil y arquitectura. Cenizas volantes y puzolanas naturales, calcinadas o crudas, utilizadas para el concreto”	34
5.2.2 NTC 220 “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8 mm de lado”	35
5.2.3 NV-E 324-07 “Resistencia a la Flexión de Morteros de Cemento Hidráulico”.	35

5.2.4 RILEM (Unión internacional de laboratorios y expertos en materiales de construcción, sistemas y estructuras)	35
6. DISEÑO METODOLÓGICO	36
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	36
6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	36
6.3 POBLACIÓN Y MUESTRA	36
6.3.1 POBLACIÓN	36
6.3.2 MUESTRA	36
6.4 DEFINICIÓN Y OPERATIZACIÓN DE VARIABLES.....	37
6.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	38
6.6 FASES DE INVESTIGACIÓN	38
6.6.1 FASE 1: Diseñar la dosificación apropiada para la obtención del mortero activado con ceniza volante.	38
6.6.2 FASE 2: Determinar las propiedades de flexión y compresión de un mortero activado con ceniza volante a través de ensayos experimentales.	38
6.6.3. FASE 3: Construir una matriz comparativa entre mortero activado alcalinamente con ceniza volante y mortero con cemento portland. (Ilustración 5)	40
7. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	45
7.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS.	45
7.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A FLEXIÓN.....	51
7.3 RECONOCIMIENTO DE LA MOLARIDAD ÓPTIMA DE LOS ACTIVADOR ALCALINOS Y EL PORCENTAJE DE COMBINACIÓN ENTRE LOS GEOPOLÍMEROS.	55
7.3.1 Caracterización de la materia prima a utilizar en la elaboración de pastas de cementos.	55
7.3.1.1 Material cementante	55
7.3.1.2 Activadores alcalinos	59
7.3.2 Realizar pastas con geo polímeros	61
8. CONCLUSIONES.....	63
9. RECOMENDACIONES.....	65

10.	REFERENCIAS	66
-----	-------------------	----

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Diagrama de fase $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$. Localización de materiales puzolánicos.....	28
Ilustración 2 Resistencia a la flexión en tres y cuatro puntos.....	32
Ilustración 3 Diagrama del diseño metodológico. Fase 1	41
Ilustración 4 Diagrama del diseño metodológico. Fase 2	42
Ilustración 5 Diagrama del diseño metodológico. Fase 3	43
Ilustración 6 Matriz De Ensayos Mecánicos.	44

LISTA DE GRÁFICAS

Grafica 1 Fluides de Morteros 6 Mol, 8 Mol y Cemento Portland.....	45
Grafica 2 resistencia a compresión de cubos de ceniza volante activados con NaOH y cemento portland.....	49
Grafica 3 Resistencias a Flexión en Viguetas de Mortero.....	54

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores típicos de las propiedades de cemento portland tipo I	24
Tabla 2 Definición de operaciones de variables.....	37
Tabla 3 Fluidez de Morteros 6 Mol, 8 Mol y Cemento Portland	45
Tabla 4: Cálculo de Esfuerzo de compresión	46
Tabla 5 Fuerzas y esfuerzos de la compresión.....	47
Tabla 6 Resistencia a compresión cubos de mortero de ceniza volante activados con NaOH 6 Mol ,8 Mol y Cemento Portland	48
Tabla 7 Resultados de la falla a la compresión de cubos morteros.....	50
Tabla 8 Lectura de Fuerzas y Flexiones.....	51
Tabla 9 Resistencia a Flexión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 6 Mol ,8 Mol y Cemento Portland.....	52
Tabla 10 Resultados a Falla a Flexión de viguetas de Mortero.....	53
Tabla 11 Caracterización química de la ceniza volante - FRX	56

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En el desarrollo de la sociedad en los últimos años ha traído consigo un efecto en el sector de la industria, que ha generando una gran cantidad de residuos industriales, que se utilizan en sectores como la minería e hidrocarburos basados en la explotación de recursos minerales como el carbón¹, esta alta producción en esta industria ha sido influenciada por el desarrollo exponencial del sector de la construcción, que ha demandado la utilización de materiales en su mayoría generados por procesos industriales.

En la generación de energía en centrales termoeléctricas el carbón es una fuente importante para su producción y derivado de este proceso industrial que permiten una historia térmica que lo hacen a forma y le da las propiedades cementantes, que se genera un residuo denominado ceniza volante, que es un material con alto contenido de aluminio y sílice denominado aluminosilicatos², que por su composición química no tienen características similares porque estos son bajos en CaO que el cemento portland utilizado para la fabricación de concretos.

Por lo tanto se ha desarrollado en el área de la construcción 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 calcinación para obtener el Clinker —principal ingrediente del cemento; dicha calcinación es la que está afectando el medio ambiente por las altas temperaturas que alcanza, 1450 °C³. 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 (CO₂) al año, siendo esta cantidad un poco superior al 5% de las emisiones totales, y se

¹ UPME, U. Unidad de Planeación Minero Energética UPME. [En línea].09 mayo de 2012 <http://www1.upme.gov.co/>. [Consultado 28-03-2017].

² DAVIDDOVITS, J. Solid phase synthesis of a mineral block polymer by low temperature polycondensation of aluminosilicate polymers. IUPAC International Symposium on Macromolecules Stockholm. New Polímero of high stability, September de 1976.

³ MANNAN. M. A., B. H. Effect of curing conditions on the properties of OPS concrete. Building Env, .37, 1167-1171. 2002.

espera que para el año 2050 las emisiones sean de 5×10^9 toneladas el cual es uno de los principales gases que producen el efecto invernadero que afectan el medio ambiente promoviendo los cambio climático conocido actualmente⁴.

Por otro lado la fabricación del cemento es el 5% de toda la producción mundial de CO₂ se debe a la fabricación del cemento, y este es un porcentaje que en años sucesivos no solo se mantendrá sino que se incrementará conforme se activen las economías emergentes asiáticas. Teniendo en cuenta que el cemento es el elemento fundamental del hormigón, y este es junto con el acero y el aluminio los productos más consumido mundialmente en la construcción. Para cuantificar de una manera sencilla la aportación de cemento a la producción de CO₂ basta con echar un vistazo a los siguientes datos: Cada tonelada de cemento producida por el sistema convencional produce una tonelada de CO₂; si en vez de cemento convencional, se produce cementos especiales se puede llegar a reducir la cifra de emisiones de CO₂ a 0,4 toneladas por tonelada producida.

Un punto importante es el proceso de producción de cemento es cuestionarse si se necesitan o solamente el triturado de los elementos que constituyen el cemento, sino que es necesario someter estos productos a una temperatura de entre 1400 °C y 1500 °C, y para ello, es necesario, por un lado energía eléctrica, del orden de 100 kwh por tonelada producida y por otro entre 80 y 110 Kg de combustible. La energía eléctrica cada vez es más costosa en su producción y aun en Colombia las fuentes de energía eléctrica mediante centrales térmicas y nucleares se encuentra en fases iniciales. Otro punto de acción sería sustituir los combustibles convencionales por combustibles que no aporten CO₂, como es el caso de la biomasa, sin embargo el problema principal de esta es la discontinuidad del suministro y el almacenamiento de grandes volúmenes, por lo no resulta eficiente en las dinámicas actuales del país

Para fabricar el cemento tradicional partimos de la piedra caliza (CaCO₃); lo que realmente se necesita el Calcio, por lo que en el proceso de fabricación se debe eliminar ese carbono emitiendo en consecuencia una gran cantidad de CO₂. En este proceso se muele la caliza que mezclada con arcilla y sometida la mezcla a una temperatura entre 1400 °C y 1500 °C nos produce el Clinker⁵.

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.

⁴ ASOCCEM, A. Asociación De Productores De Cemento. [En línea]. 22 mayo de 2012 <http://www.asocem.org.pe/productos-a> [Consultado 28-03-2017].

⁵ DOMOTERRA, S.A. Construcción Ecológica y Formación. [En línea]. 27 de marzo de 2014 <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/> [Consultado 28-03-2017].

Teniendo en cuenta esta problemática, se pretende dar respuesta al siguiente cuestionamiento: ¿Cómo evaluar el comportamiento mecánico de los morteros activados alcalinamente con ceniza volante, es óptimo para el uso alternativo del cemento portland?

2. ANTECEDENTES

Durante la década de los 40 se realizaron estudios con materiales alternativo aluminio – silicatos el profesor Purdon descubrió que al añadir como aditivo un álcali este producía un endurecimiento rápido como ligante activada con hidróxido de sodio (NaOH) con lo cual se alcanzaron resistencias de 27 MPa en un día y 72 MPa para un estimado de 5 años y se les denominó cementos de escoria, posteriormente el científico Víctor Glukhovsky estudio más a fondo las escorias de alto horno encontrando por experimentación química su alto contenido de Calcio y los denominó concretos de suelos de silicato. En el ámbito internacional las cenizas volantes son utilizadas en grandes cantidades, especialmente en la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, muros de contención, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, como acondicionador de suelos y, en algunos casos, en los pavimentos rígidos⁶.

El estudio y utilización de la ceniza volante como material cementante fue objeto de estudio para ser activada alcalinamente fue desarrollada por Joseph Davidovits, como uno de los pioneros de la polimerización, quien empezó a hablar en los años 70 sobre el concepto de geo polímeros es el resultado de la reacción entre los aluminosilicatos el activante que es el hidróxido de sodio (NaOH) inorgánicos para hacer referencia a los polímeros sintéticos que viene de procesos químicos conocidos como geo polimerización el cual forma un material que se caracteriza por sus excelentes propiedades ligantes y propiedades mecánicas⁷.

En la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional Rosario de Argentina se evaluaron las posibilidades de reutilización de un residuo industrial, producto de la calcinación incompleta de carbón en usinas de generación eléctrica, denominado ceniza volante, como relleno en mezclas asfálticas y agente estabilizante de suelos. La metodología del estudio comprendió la evaluación de la ceniza volante como agente modificador de la resistencia al envejecimiento del asfalto durante la elaboración de la mezcla en planta, colocación in situ y la valoración de la aptitud de este producto para actuar como agente estabilizante de suelos cuantificada a partir de distintos

⁶ 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.

⁷ KRIVENKO, P.V., K. Directed synthesis of alkaline alumino silicate minerals in a geocement matrix. J. Mater Sci. 2007 p.14

ensayos de resistencia, de caracterización elástica, de su comportamiento a la fatiga y de su deformación permanente, con el fin de determinar contenidos recomendados y campo de aplicación.

Se debe tener en cuenta que, para el caso de Colombia, las vías deben cumplir los criterios de diseño de acuerdo con las especificaciones del artículo 450 de las técnicas de construcción de carreteras, además de evaluar la rigidez en la mezcla asfáltica, ya que la figuración prematura de las capas asfálticas depende de la estabilidad y el flujo.

La utilización de las cenizas volantes en la construcción de carreteras se realiza en la estabilización de bases y sub-bases, pero se han desarrollado estudios en los cuales se evalúe el comportamiento de las cenizas volantes en la mezcla asfáltica, el cual es objetivo de esta investigación.

Una de las primeras aplicaciones constructivas se desarrollaron por el científico Davidovits en 1972-1976, en el cual utilizó geo polímeros para paneles de virutas de madera resistentes al fuego, constituido por un núcleo de madera y dos revestimientos de geo polímeros, durante la fabricación de estos paneles se observó una característica inusual, el endurecimiento del material orgánico, se produjo simultáneamente con el ajuste del mineral silicoaluminato, al aplicar los mismos parámetros termo-endurecibles, de 150-180 °C de temperatura. Este desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín y Meta caolín, la mezcla de este aluminosilicato sólido con una solución cáustica altamente alcalina constituida con hidróxidos y/o silicatos produce un material sintético, identificando que las propiedades ligantes de los geo polímeros son atribuidas a que las especies disueltas tras la activación alcalina son polimerizadas, de manera que se produce una red tridimensional amorfa de los aluminosilicatos, que endurece rápidamente y presenta buenas propiedades mecánicas⁸.

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 geo polímeros, pero fue Davidovits y Sawyer quienes desarrollaron los primeros aglomerantes geo polímeros de alta resistencia y cementos basados en química de cemento geo polimérico e hidráulico. Pero en 1984, en la industria Lone Star, Richard Heitzmann y James Sawyer mezclaron cemento Portland con geo polímero, en el cual su principal propósito fue aprovechar las buenas propiedades

⁸ 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.

del cemento geo polimérico 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 geo poliméricos, los cuales tienen un bajo contenido de CO₂. En 1990, Joseph Davidovits comenzó con la aplicación de ese geo polímero, el cual generaba 0.180 toneladas de CO₂ con la producción de 1 tonelada de cemento geo polímero 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 CO₂⁹.

En este sentido, el aprovechamiento de residuos de como humo de sílice, escorias de alto horno, cenizas volantes, en la elaboración de materiales alternativos de construcción se ha venido contemplando como una de las alternativas de sustitución del cemento convencional, se han llevado a cabo estudios de investigaciones para la evaluación de las distintas propiedades de los materiales¹⁰. Por otro lado, en Indonesia y Australia, tres investigadores, Wardhono, Law y Strano 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 propiedades¹¹.

La Universidad del Valle, Cali junto con el Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España, desarrolló un proyecto sobre la resistencia química al ataque por sulfatos y agua de mar a morteros de cementos alcalinos, concluyendo que hay una elevada estabilidad química frente al ataque por sulfatos y agua de mar de los morteros de escoria activada alcalinamente y de los morteros de mezcla de escoria y ceniza activados alcalinamente, los factores que más influyen en dicha durabilidad son el régimen de curado y el tipo de cemento, (S. D. Wang, 1995) se pudo demostrar que la impermeabilidad de los morteros y concreto de escoria activada alcalinamente resulta mucho mayor que la de los cementos portland

⁹ 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. 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.

¹⁰ Davidovits, J. Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland cement. (P. C. Association, Ed.) Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment, Marzo de 1993. P. 15

¹¹ 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.

convencionales, realizando probetas de escoria activada con Waterglass, escoria activada con Hidróxido de Sodio y escoria con ceniza volante, determinando durabilidad por dos métodos distintos: ASTM C1012 en el que las probetas se conservaron en cámara húmeda durante 28 días y posteriormente se colocaron en un solución acuosa de Sulfato de Sodio en concentración 50 g/l durante 200 días, evaluando cambio dimensional y resistencia a la compresión; mediante el método de Kock-Steinegger. Se mantenían las probetas en cámara húmeda durante 21 días, sumergiéndolas luego en disolución acuosa de Na_2SO_4 al 4.4% en peso, disolución de agua de mar artificial (ASTM D114 86) y agua desionizada/destilada, como medio de referencia, posteriormente se ensayaron a flexo-tracción. Obteniendo resultados 29 favorables para edades largas y con variaciones pequeñas para las probetas expuestas a soluciones sulfatadas frente a las se conservan en el medio de referencia. Empleando una temperatura de 60 °C en geo polímeros sintetizados con ceniza volante y ceniza de cascarilla de arroz dando resultados de resistencias favorables, Robayo, E¹². con una temperatura empleada de 85 °C en geo polímeros sintetizados con MK y donde los resultados no fueron favorables, Millán, G¹³. Profundizando en el tema anterior, el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC) Madrid, llevan a cabo un estudio sobre algunas de las propiedades tecnológicas de los materiales cementantes elaborados por activación alcalina de aluminosilicatos, sobre las propiedades de morteros y hormigones elaborados con cenizas volantes activadas, de forma que, en función del tipo de activador alcalino empleado y tras un curado térmico previo, el material resultante presenta propiedades y características que incluyen: elevadas resistencias mecánicas iniciales (a flexión y a compresión), baja retracción al secado, y una muy buena adherencia matriz-acero, así como una excelente resistencia al ataque ácido y un excelente comportamiento frente al fuego, implementando Ceniza Volante, un cemento comercial y como activadores alcalinos utilizaron dos disoluciones: N = NaOH 8 Mol y W= mezcla del 15% de silicato sódico + 85% NaOH 12.5 Mol¹⁴.

En este sentido, se tiene como idea utilizar puzolanas naturales, las cuales son subproductos provenientes de procesos industriales, como la ceniza volante, la

¹² 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, p71.

¹³ MILLAN CORRALES, Guadalupe. Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geo polimerización 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. p13.

¹⁴ Moreno, N. Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña. Marzo de 1991. p.250

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 cosas¹⁵.

¹⁵ ARIAS PRIETO, Angie. BECERRA AYALA, Juan. Análisis de la resistencia a compresión y a flexión en morteros elaborados con geo polímeros a base de ceniza volante y metacaolín activados alcalinamente. Trabajo de grado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Universidad La Gran Colombia. Facultad de Ingeniería Civil. 2013, 11 p.

3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se presentan problemáticas ambientales por la indebida disposición final de residuos sólidos, calentamiento global, ubicación de rellenos sanitarios, entre otros. Además de esto en nuestro entorno existen deficiencias de vivienda y espacio público, por lo que es necesario investigar sobre compuestos constructivos que sean sostenibles.

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 toneladas, lo que equivale aproximadamente a 0.98 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂)¹⁶, que por cada tonelada de cemento producido se emite 0.95 toneladas de CO₂; 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 existentes¹⁷.

Los nuevos materiales inorgánicos, para la sustitución parcial o total de cementos tradicionales, en este caso se hablan de las cenizas volantes como sustituyente, que esto puede contribuir de manera positiva a la reducción de la contaminación a nivel global y ayuda al crecimiento del desarrollo sostenible, en la actualidad Colombia produce más de 80.000 millones de toneladas de carbón térmico, este carbón térmico que se produce en el interior del país para abastecer el mercado doméstico, que es destinado a la generación eléctrica, como fuente de energía primaria y secundaria en la industria. El carbón que en el interior del país en su mayoría es implementado en sectores industriales. Se considera que anualmente se queman más de 830 millones de toneladas de carbón que generan unos 75 millones de toneladas de residuos de combustión que se forman principalmente cenizas volantes, por lo cual se dice que cada tonelada de carbón utilizado segneran 0,8 toneladas de cenizas volantes como residuos⁹.

Las cenizas de carbón son un residuo generado en grandes cantidades y por diferentes sectores. A nivel nacional se producen millones de toneladas de este

¹⁶ DAVIDOVITS, Joseph, "Global warming impact on the cement and aggregates industries", World Resources Review, Vol 6, p 264, 1994.

¹⁷ MINAMBIENTE. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. [En línea]. 19 junio de 2012. <http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf> [Consultado 28-03-2017].

residuo debido a la demanda energética industrial y doméstica, como se puede observar en la grandes ciudades del eje cafetero se puede estimar una producción de cenizas superior a 26.852 toneladas anuales con base en el consumo de carbón de las minas de Amaga, suponiendo en la mayoría de los casos un porcentaje de ceniza de tan solo el 2% de acuerdo a las características ofrecidas por los yacimientos de carbón¹⁸.

La búsqueda de materiales cementantes que se han sostenibles se basa en los lineamientos del desarrollo sostenible los cuales pueden resumirse en el desarrollo de productos que tengan como prioridad la justicia social, la calidad ambiental y el bienestar económico para mejorar la calidad de vida de las personas.

Para efecto de esta investigación se utilizará como precursor la Ceniza Volante Tipo F, residuo industrial procedente de la termoeléctrica TERMODORADA, estos materiales se activarán alcalinamente y serán usados para sintetizar los geo polímeros, donde finalmente se empleará como alternativa del cemento Portland 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 expuesto, se busca fabricar una mezcla la cual posea propiedades mecánicas de compresión y flexión, que cumplan con los requisitos técnicos de la construcción pero que al mismo tiempo sea viable, competitivo, innovador y que pueda dar solución a los problemas actuales

Teniendo conocimiento de la alta producción de ceniza volante de algunas de las industrias colombianas, se hace aún más viable la intención de aprovechamiento de residuos en construcción, haciendo de la ceniza volante no un residuo si no un subproducto en la construcción, sustituyendo totalmente al cemento hidráulico.

Los concretos de alto desempeño son concretos que tienen un mejor comportamiento para una aplicación en particular. Este comportamiento se mide con características a diferentes edades del concreto, más allá de la resistencia, incide en propiedades del material, como es: módulo de elasticidad, densidad, permeabilidad, absorción, ion cloruros, coeficientes de difusión, carbonatación y abrasión. Esta clase de concretos en su mayoría no se alcanzan con el uso de materiales convencionales y sus requisitos involucran mejoras de colocación, compactación sin segregación, propiedades mecánicas a largo plazo, resistencia a edades tempranas, rigidez, estabilidad volumétrica, vida de servicio y durabilidad. Alguna diferencia de materiales que se utilizan para producir concretos de alto desempeño se encuentran primero el aumento de contenidos de cemento y

¹⁸ LAVERDE, L. F.-J.-J.-S.-M. Remoción de Carbón quemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón. Revista Energética. Diciembre de 2007. P.6.

aditivos reductores de agua y segundo el uso de otros aditivos químicos o minerales, tales como la micro sílice, ceniza volante y escoria de alto horno para producir concretos de alto desempeño deben existir actividades integradas con procesos estandarizados de calidad, desde la obtención de sus insumos, dosificación y precauciones durante los procesos de colocación y curado, ya que el manejo del concreto modifica su desempeño después de fraguado.

El comité del ACI encargado del concreto de alto desempeño lo define como aquel que satisface los siguientes requisitos especiales de comportamiento y uniformidad en cuanto a:

- Facilidad de colocación y acabado sin segregación.
- Propiedades mecánicas a largo plazo.
- Desarrollo de resistencia a edades tempranas.
- Ductilidad.
- Estabilidad volumétrica.
- Larga vida de servicio en condiciones ambientales severas.

Las propiedades típicas de los concretos de alto desempeño pueden involucrar alta resistencia a la compresión, alto módulo de elasticidad, así como manejabilidad y larga vida de servicio en condiciones medioambientales severas. No se puede afirmar que concretos con resistencias a la compresión inferiores a 42MPa tengan un mal desempeño; el alto desempeño identifica el incremento de cualidades que favorecen a un tipo de estructura, sometida a sollicitaciones específicas de diseño estructural y preservación en el tiempo.

En el medio colombiano las obras se construyen con concreto económico de resistencia a la compresión normal de 21MPa y equivocadamente se cree que éste satisface los requerimientos de cualquier tipo de obra, sin embargo, podría ser más rentable utilizar cementos de mejor resistencia que garanticen estructuras duraderas en el tiempo y que no requerirán mayor inversión en mantenimiento.

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 conocen 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 ceniza volante¹⁹.

¹⁹ BENAVIDEZ, Ricardo. Concreto de Alto Desempeño. Trabajo de postgrado Ingeniera Civil. Bogotá D.C. Escuela Colombiana Julio Garavito. Facultad de Ingeniería Civil. 2013, 71 p.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar la resistencia a la compresión y flexión en mortero activado alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar la dosificación apropiada para la resistencia mecánica de los morteros activado con ceniza volante.
- ✓ Evaluar las propiedades de flexión y compresión del mortero activado con ceniza volante a través de ensayos experimentales.
- ✓ Elaborar una matriz comparativa entre mortero activado alcalinamente con ceniza volante y mortero con cemento portland.

5. MARCO TEÓRICO

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 Materiales Cementantes

Los componentes cementantes en los cementos activados alcalinamente, pueden ser tanto materiales cementantes como materiales puzolánicos. Uno de los rasgos más importantes en la tecnología de la activación alcalina, es que tanto materias primas naturales (por ejemplo arcillas o feldespatos) como subproductos industriales (escorias, cenizas volantes, lodos de papel, etc) pueden ser usados como materias primas. Xu y Van Deventer investigaron la activación alcalina de 15 minerales naturales fundamentalmente compuestos por sílice y alúmina (granates, micas, arcillas, feldespatos, zeolitas...etc.).

Hacia el año 500 a. C., los griegos utilizaban en sus construcciones una mezcla de materiales provenientes de depósitos volcánicos, con caliza, agua y arena. Este mortero ofrecía entonces los mejores niveles de resistencia. Tiempo después, para el siglo II a. C., en la región de Puzzoli (cerca del Vesubio), los romanos desarrollaron el llamado cemento romano o puzolánico a partir de la mezcla de caliza calcinada con finas arenas de origen volcánico o cenizas volcánicas (lo que hoy llamamos puzolana). La puzolana contiene sílice y alúmina, que al combinarse químicamente con la cal da como resultado el cemento puzolánico; material que ha demostrado tener un gran desempeño, tanto respecto a su resistencia como a su durabilidad. Un par de ejemplos de construcciones en donde se empleó este material, son el Coliseo Romano edificado en el año 82 a. C, y el Teatro de Pompeya, edificado hacia el año 75 a. C.

Sin embargo la mayoría de los estudios realizados en torno a los cementos alcalinos están basados en la activación alcalina de subproductos industriales tales como las escorias de horno alto, las escorias de fósforo, las escorias de acería, las cenizas volantes, el metacaolín...etc. Las características de estas materias primas. También, a veces se pueden incorporar pequeñas cantidades de humo de sílice al componente cementante para modificar la distribución del tamaño de particular del sistema y así conseguir estructuras menos porosas y por

lo tanto mejores comportamientos mecánicos a primeras edades. También pequeñas cantidades de cemento Pórtland pueden ayudar a incrementar el comportamiento mecánico-resistente inicial a temperatura ambiente. Estudios más recientes, muestran que pequeñas cantidades de cemento de aluminato de calcio (CAC) también pueden usarse en la mezclas cementantes como fuente de aluminio²⁰.

5.1.2 Conglomerantes y Aglomerantes.

Se denomina conglomerante al material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas en su masa que originan nuevos compuestos. Los conglomerantes son utilizados como medio de ligazón, formando pastas llamadas morteros o argamasas.

Los aglomerantes son materiales capaces de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por métodos exclusivamente físicos; en los conglomerantes es mediante procesos químicos²¹.

5.1.3 Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales elaborados a partir de fuentes de aluminosilicatos y se han investigado desde hace más de 30 años. Joseph Davidovits define los polímeros como polisialatos, estos materiales se pueden elaborar a partir de diferentes materias primas pero los comúnmente trabajados son metacaolines (obtenidos por la calcinación de caolines) y las cenizas de carbón mineral.

A pesar de que ambos materiales tienen composiciones ricas en aluminosilicatos las formas en que se activan son de manera distinta debido a la composición química que presentan es necesario activarlos con diferentes activantes.

Las cenizas hacen parte de los materiales denominados puzolanas las cuales pueden ser de dos tipos según su origen, de origen natural como las cenizas volcánicas o de una manera industrial como la ceniza volante que se produce a

²⁰ 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.

²¹ TECNOLOGÍA 3°. ESO [en línea]: 24 de Abril de 2007 <http://esoytecnoblogspot.com.co/2014/04/materiales-aglomerantes-conglomerantes.html>. [consultado 03-01-2017]

partir del proceso de calentamiento a altas temperaturas del carbón²².

5.1.4 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 requiera.

El cemento Portland tipo I es el que está destinado a obras de hormigo en general y ha este no se le exige propiedades especiales, por lo cual se encuentra compuesto finalmente por los siguientes materiales:

Tabla 1 Valores típicos de las propiedades de cemento portland tipo I

Cemento	Composición química en %				Finura Blaine cm ² /g	Resistencia a la compresión		
Tipo I	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		1 día	28 días	90 días
	48	27	12	8	Min 2800	100	100	100

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero²³.

²² ARQHYS. Geopolímeros [en línea]: 14 de Abril de 2008 <http://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>. [consultado 03-01-2017]

²³ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá D.C.: Bhandar Editores, 1996, p 49.

5.1.5 Cementos Adicionados

Los cementos adicionados se investigan desde hace bastante tiempo; realmente, poco después del descubrimiento del cemento Pórtland, sobre todo en lo referente a la adición de escoria de alto horno y puzolana. Sin embargo, en ese tiempo la demanda totalmente abastecida no propicia su utilización de modo alguno

Los cementos adicionados están compuestos por una mezcla de clinker + yeso + adiciones minerales en distintas proporciones. Las adiciones minerales utilizadas varían entre puzolanas, fillers y escorias de alto horno, las cuales agregan ciertas propiedades de valor agregado al cemento, manteniendo sus propiedades. Además, estos cementos utilizan menores cantidades de clinker en su fabricación lo cual resulta en una menor emisión de gases contaminantes²⁴.

5.1.6 Cementos Activados Alcalinamente

Durante las últimas décadas, se ha desarrollado una gran variedad de cementos activados alcalinamente. Basándonos en la naturaleza de los componentes cementantes los sistemas alcalinos se podrían clasificar, principalmente, en tres categorías:

5.1.6.1. Cementos con base escoria

Los cementos con base escoria pueden incluir componentes cementantes como escoria de horno alto, escoria de fósforo, sistemas escoria de horno alto-ceniza volante, sistemas escoria de horno alto-escorias de acería, sistemas escoria de horno alto-MgO y sistemas de múltiples componente y base escoria de horno alto.

5.1.6.2. Mezclas que incluyen cemento Portland

Los materiales cementantes suplementarios tales como las escorias de horno alto, las escorias de fósforo, las cenizas volantes y las puzolanas naturales se emplean habitualmente en mezclas con cemento Pórtland o como sustitutos de parte del cemento Pórtland en los hormigones. Generalmente, el uso de estos materiales incrementa los tiempos de fraguado y produce un descenso en el comportamiento mecánico a edades tempranas en los cementos y hormigones. Diversos estudios han indicado que la adición de activadores alcalinos puede potenciar las propiedades puzolánicas o cementantes de estos materiales suplementarios y mejorar las propiedades de los sistemas, especialmente a primeras edades.

²⁴ PASCAMAYO. Cementos [en línea]: 28 de mayo de 2008
<http://www.cementospacasmayo.com.pe/productos-y-servicios/cementos/adicionado/>. [consultado 04-17-2017]

Entre los sistemas cementantes más frecuentemente investigados son de destacar las mezclas de:

- cemento Pórtland-escorias de horno alto
- cemento Pórtland-escorias de fósforo
- cemento Pórtland-cenizas volantes
- cemento Pórtland-escorias de acería y escorias de horno alto
- cemento Pórtland-cenizas volantes- escorias de horno alto
- cemento multicomponente

5.1.6.3. Cementos puzolánicos.

A finales de los años 50 y principios de los 60, Glukhovsky descubrió los principios básicos que le permitieron producir mezclas hidráulicas por activación alcalina de materiales silicoaluminosos, en particular los minerales de la arcilla, incluyendo el metacaolín, los cuales en el proceso de reacción y endurecimiento podían llegar a formar zeolitas. Dicho autor llamo a este tipo de materiales “*soil cements*”. Años mas tarde Krivenko denominó “*geo cementos*” a este tipo de materiales cementantes; de este modo subrayaba analogías con los minerales naturales. Davidovits llamó “*geo polímeros*” a estos conglomerantes puesto que poseen una estructura polimérica. Otros autores han escogido otros nombres para denominar a estos materiales: *hydroceramics* (Grutzeck), *polímeros inorgánicos* (Van Deventer) y *zeocementos* (Palomo).

Los cementos puzolánicos activados alcalinamente incluyen los siguientes sistemas cementantes:

- Cementos de metacaolín activado alcalinamente
- Cementos de cenizas volantes activadas alcalinamente
- Cementos de vidrios sódico-cálcicos activados alcalinamente²⁵.

5.1.7 Activador Alcalino

El activador alcalino se define como la solución responsable de acelerar la reacción de la fuente de aluminosilicatos, favorecer la formación de hidratos

²⁵ 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.

estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos hidratos. Los activantes pueden ser compuestos alcalinos o alcalinotérreos, tales como hidróxidos (ROH , $\text{R}(\text{OH})_2$), sales de ácido débil (R_2CO_3 , R_2S , RF), sales de ácido fuerte (Na_2SO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y sales silícicas del tipo $\text{R}_2\text{O}(\text{n})\text{SiO}_2$ donde R es un ion alcalino del tipo Na, K o Li. Los activadores comúnmente usados son el hidróxido de sodio o potasio, silicatos y carbonatos.

La activación alcalina de cenizas volantes es un proceso químico por el que el componente vítreo de este subproducto industrial es transformado en un material cementoso compacto también conocido como Geo polímero²⁶.

5.1.7.1 Hidróxido de Sodio (NaOH)

El NaOH también conocido como soda cáustica, es una sustancia química la cual está compuesta por sodio, hidrogeno y oxígeno 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.

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

Se debe tener en cuenta que los geo polímeros 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 CO_2 atmosférico²⁷.

5.1.8 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 cementantes.

²⁶ PURDON, O. The action of alkalis on blast-furnace slag, J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun. December 1940. pp191–202.

²⁷ 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.

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 Horno; 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 material. 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 localización²⁸.

Ilustración 1 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.

²⁸ GIBBONS, PAT. Puzzolans for lime mortars. Aticles from building conservation, Citado por OP. cit., p. 132.

5.1.9 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 similares a las del concreto.

Existen diferentes dos tipos de morteros dependiendo de su composición:

Morteros Calcareos: 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 seco²⁹.

5.1.9.1. 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 fresco. A continuación, se menciona las propiedades relevantes de los dos estados.

a. Estado Fresco

Por una parte la manejabilidad 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 fresco.

Por otra parte la 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

²⁹ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 3 ed. Bogotá D.C.: Bhandar Editores, 1996, p 303.

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 compresión³⁰.

b. Estado Endurecido

En este caso la 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 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 compactos.

Dentro de este concepto se evalúa de forma experimental dos propiedades mecánicas importantes para evaluar el comportamiento estructural de los morteros³¹.

Pérez y Merin define la resistencia a compresión como 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: Megapascuales (MPa).

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 progresiva³².

³⁰ *Ibíd.*, p 303-304.

³¹ *ibíd.*, p 309-310.

³² PÉREZ, J y MERINO, M. Compresión [en línea], [Consultado 10-06-2017]. Disponible en Internet: <http://definicion.de/compresion>

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:

$$\sigma_c = F/A$$

Dónde:

F = carga máxima con la que se produce rotura.

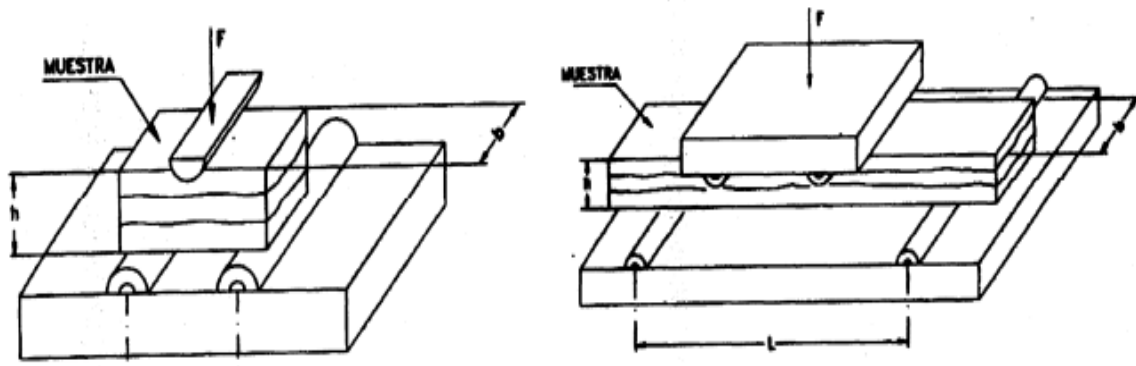
A = área de la sección de la probeta donde se aplica la carga.

Además la Flexión Mecánica es 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 tracción³³.

El esquema de aplicación de carga por tres y cuatro puntos se muestra a continuación:

³³ PROPIEDADES MECÁNICAS: Ensayos [Anónimo] [en línea], [consultado 10-07-2017]. p. 1. Disponible en Internet: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/TEMAII.2.8.MECANICAS.Ensayos.pdf>

Ilustración 2 Resistencia a la flexión en tres y cuatro puntos.



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

Factores que influyen en la resistencia

Fraguado es 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 afectar la manejabilidad ni las resistencias de la mezcla. 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 mezcla.

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 días.

Curado es 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 cemento.

Temperatura es 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 edad.

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 durabilidad³⁴.

5.1.10 CENIZA VOLANTE

La ceniza volante a utilizada en la presente investigación, proveniente de la industria textilera fabricate, Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de carbón bituminoso.

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 pulverizados. 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 quema³⁵.

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 concreto³⁶.

Actualmente, la normativa americana ASTM C618-12 / NTC 3493 (ASTM C150,

³⁴ *Ibíd.*, p 310.

³⁵ 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.

³⁶ CENIZA VOLANTE [Anónimo]. Antecedentes [en línea], [consultado 03-06-2017]. Disponible en Internet: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/8788/Capitulo2.pdf>

2012) (Coal Fly ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete) clasifica la ceniza volante de acuerdo a su composición química:

Clase N: Puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan 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 arcillas y lutitas.

Clase F: Este tipo de Ceniza posee propiedades puzolanica, son Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita, carbón bituminoso, a partir de carbón sub-bituminoso y lignito.

Clase C: Esta clase de Ceniza además de tener propiedades puzolanicas, posee propiedades cementantes, Cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub-bituminoso o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas.

El grado de reactividad y composición de la ceniza volante depende fundamentalmente del tipo de carbón empleado, del proceso de transformación durante su combustión, tipo de horno o caldera, velocidad de enfriamiento y sistema de captación (húmedo o seco). Para la clasificación de las diferentes cenizas se revisan lineamientos mencionados en las siguientes tablas³⁷.

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.

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

³⁷ PROVIS J.L. Y VAN DEVENTER J.S.J. (2007) Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling, Chem. Eng. Sci. 62 (9). Pp. 2318–2329.

atribuidas a las cenizas volantes o a las puzolanas; o cuando se quieran lograr ambos objetivos³⁸.

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. Por lo cual se hicieron 9 especímenes para cada día y así obtener el número de muestras como lo dice la norma. También contiene especificaciones para la compactación del material evitando una mayor cantidad de vacíos y que varíe su resistencia uno de otro³⁹.

5.2.3 NV-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 resistencia⁴⁰.

5.2.4 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 segura⁴¹.

³⁸ 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

³⁹ 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.

⁴⁰ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. INV-E 324. Bogotá D.C. 2007. p. 1.

⁴¹ 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.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

La presente investigación es de un carácter netamente cuantitativo puesto que los instrumentos, técnicas y demás recursos utilizados acordes a los objetivos planteados, se fundamentan en la recolección y el análisis de datos de las muestras de concreto obtenidas directamente en laboratorio de la facultad de ingeniería, todo esto para determinar las variables de la compresión y la flexión para concretos activados alcalinamente con ceniza volante y concretos con cemento portland.

6.2 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Este tipo de investigación busca el análisis de lo individual y específico, teniendo como una gran herramienta el análisis estadístico. Por eso se considera una investigación de tipo EXPERIMENTAL – CORRELACIONAL, en la cual se realizará la recolección de datos de forma sistemática y comparada en cada uno de los grupos para obtener finalmente las características mecánicas de dichos especímenes.

6.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

6.3.1 POBLACIÓN

La población de en esta investigación será estadística ya que se analizarán unos tipos de mortero activados alcalinamente con ceniza volante y otros morteros activados con cemento portland.

6.3.2 MUESTRA

Se desarrollarán unos tipos de muestras probabilísticos ya que el objeto de la investigación consiste en seleccionar las muestras de estudio respecto a los ensayos que se harán para así tener un muestreo por cuotas donde se van analizar los diferentes especímenes de morteros sometidos a las pruebas de laboratorio.

6.4 DEFINICIÓN Y OPERATIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 2 Definición de operaciones de variables.

	Variable	Indicador	Medición
Independientes	Incorporación de ceniza volate.	Cantidad de ceniza volante en un mortero.	Peso gramos
	Incorporación de cemento portland	Cantidad de cemento portland en un mortero.	Peso gramos
	Incorporación de agua	Cantidad de agua que contiene el mortero activado con cemento portland.	Volumen ml
	Incorporación de NaOH	Cantidad de NaOH que contiene el mortero activado con ceniza volante	Volumen ml
Dependientes	Comportamiento mecánico de los morteros activados de diferente forma.	Resistencia a la compresión.	Kg/cm ²
		Resistencia a la flexión.	N/mm ²
Intervinientes	Curado del concreto	Tiempo que dura curándose el concreto	7, 14 y 28 días
	Agregado grueso	Tamaño de la arena que se le agrega al mortero con cemento portland.	N° 30 Diámetro (mm): 0.66

Fuente: Propia.

6.5 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS 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, el activador NaOH, temperaturas de curado y fraguado. Entendiendo esto como el conocimiento base para el desarrollo posterior de los ensayos.

También se realizarán una serie de experimentos de los cuales se realizará recolección y categorización de información como dosificaciones de cada material, temperaturas óptimas de curado y fraguado, entre otras pruebas relevantes que permitan analizar la resistencia a la compresión y flexión en mortero activado alcalinamente con ceniza volante.

6.6 FASES DE INVESTIGACIÓN

6.6.1 FASE 1: Diseñar la dosificación apropiada para la obtención del mortero activado con ceniza volante.

Actividad 1.1 Se realizó la dosificación para obtener la molaridad del NaOH de (6 Mol y 8 Mol).

Actividad 1.2 Se le hizo el tamizaje a 80 g de ceniza volante para obtener su granulometría y finura.

Actividad 1.3 Se realizó la mezcla entre la ceniza volante y NaOH con diferentes molaridades para obtener la pasta de cemento y meterlos al horno a una temperatura de 60 °C.

Actividad 1.4 Observación y análisis del endurecimiento de la pasta de cemento dependiendo de la molaridad del NaOH.

6.6.2 FASE 2: Determinar las propiedades de flexión y compresión de un mortero activado con ceniza volante a través de ensayos experimentales.

Actividad 2.1 Se realizó la mezcla entre ceniza volante, arena N° 30 y el NaOH con 6 Mol que consiste en una relación de $(ml_{NaOH} / g_{ceniza\ volante}) = 0.4$ donde la

ceniza = 1000 g y se multiplica por el factor 0.4 para obtener la cantidad de NaOH que es igual 400 ml. Teniendo ésta cantidad se hace uso de la por la norma I.N.V.E. 323 – 07, que indica que por 1 parte de material de ceniza tenemos 2.75 de arena, en tanto la cantidad de arena a utilizar será 2750 g.

Actividad 2.2 Después de calcular las cantidades de cada material se agregan en la batidora en un tiempo de 10 minutos para obtener la mezcla de mortero eficiente y compactado que se requiere.

Actividad 2.3 Por consiguiente después de tener la mezcla de mortero las compactos en los moldes con 2 capas, que cada capa tendrá 32 golpes para su compactación.

Actividad 2.4 Después de realizar el proceso en los moldes se lleva las muestras al horno con una temperatura de 60 °C por 24 horas.

Actividad 2.5 Se realiza el mismo procedimiento de las cuatro actividades anteriores pero con Hidróxido de sodio de 8 Mol.

Actividad 2.6 Se realiza el mismo procedimiento de las primeras cuatro actividades pero utilizando agua en vez de la solución de hidróxido de sodio.

Actividad 2.7 Por consiguiente después de tener la mezcla de mortero procedo a compactarlas en los moldes con 2 capas, que cada capa tendrá 32 golpes para su compactación.

Actividad 2.8 Después de realizar el proceso en los moldes se lleva las muestras al horno con una temperatura de 60 °C por 24 horas.

Actividad 2.9 Se realizó la mezcla entre ceniza volante, arena N° 30 y el NaOH con 6 Mol que consiste en una relación de $(\text{ml}_{\text{NaOH}} / \text{g}_{\text{ceniza volante}}) = 0.4$ donde la ceniza = 1000 g y se multiplica por el factor 0.4 para obtener la cantidad de NaOH que es igual 400 ml. Teniendo ésta cantidad se hace uso de la por la norma I.N.V.E. 323 – 07, que indica que por 1 parte de material de ceniza tenemos 2.75 de arena, en tanto la cantidad de arena a utilizar será 2750 g.

Actividad 2.10 Después de calcular las cantidades de cada material se agregan en la batidora en un tiempo de 10 minutos para obtener la mezcla de mortero eficiente y compactado que se requiere.

Actividad 2.11 Por consiguiente después de tener la mezcla de mortero procedo a compactarlas en los moldes con 2 capaz, que cada capa tendrá 32 golpes para su compactación.

Actividad 2.12 Después de realizar el proceso en los moldes se lleva las

muestras al horno con una temperatura de 60 °C por 24 horas.

Actividad 2.13 Se va realizar después de obtener las muestras del horno un curado de 3, 7, y 28 días teniendo en cuenta la activación de cada uno de ellas.

Actividad 2.14 Después del curado 7, 14 y 28 días de las muestras se procede a realizar el ensayo de compresión a los dos morteros activados con ceniza volante con NaOH y al activado cemento portland con agua.

6.6.3. FASE 3: Construir una matriz comparativa entre mortero activado alcalinamente con ceniza volante y mortero con cemento portland. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

Actividad 3.1 Por consiguiente coloque los cubos de morteros 50x50 mm en la maquina en la parte inferior del molde, para que la parte superior de la prensa ejerce la fuerza respectiva sobre el espécimen, este ensayo se hizo a cada uno de los morteros y los analice cual fue el que tuvo mejor resultado en la compresión dependiendo de la norma N.T.C 220. (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.)

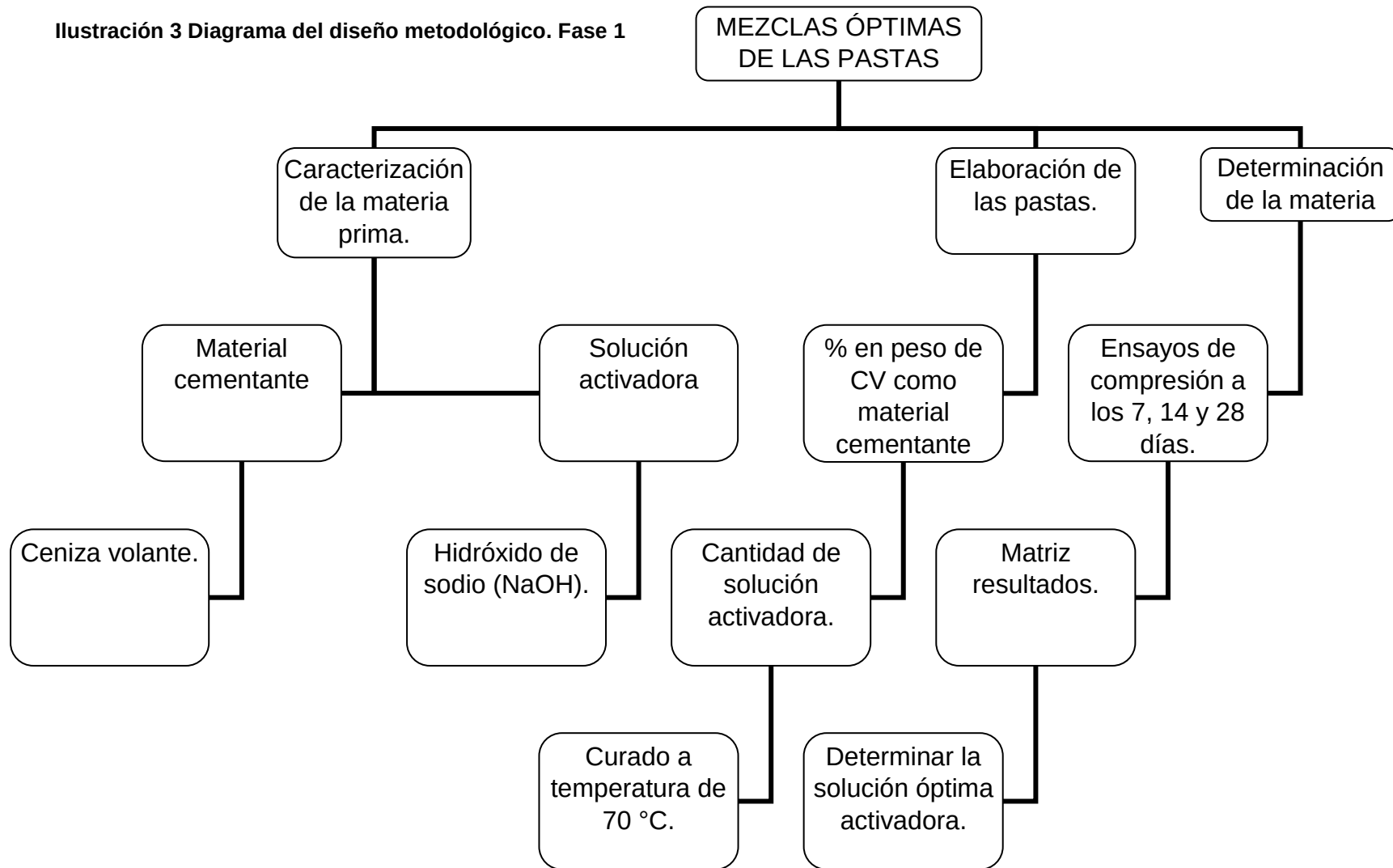
Actividad 3.2 Por lo tanto procede a colocar las viguetas de 40x40x16 mm donde se colocan dos moldes en la inferior de la máquina y encima de estos moldes se coloca el espécimen, luego un tercer molde en la parte superior ejerce una fuerza sobre el espécimen hasta que falle, este ensayo se realiza a cada uno de los morteros y después de obtener los resultados se analiza cual fue el que tuvo mejor desempeño en la flexión dependiendo de la norma I.N.V.E. 324 – 07.

Actividad 3.4 Después de obtener la información de cada uno de los morteros, se analiza cual tiene mejor vida útil en su mecanismo y se procede a seleccionar el mejor para la construcción.

Actividad 3.5 Al obtener los resultados se hace un análisis comparativo sobre los dos morteros que se activaron con ceniza volante y el que se activo con cemento portland.

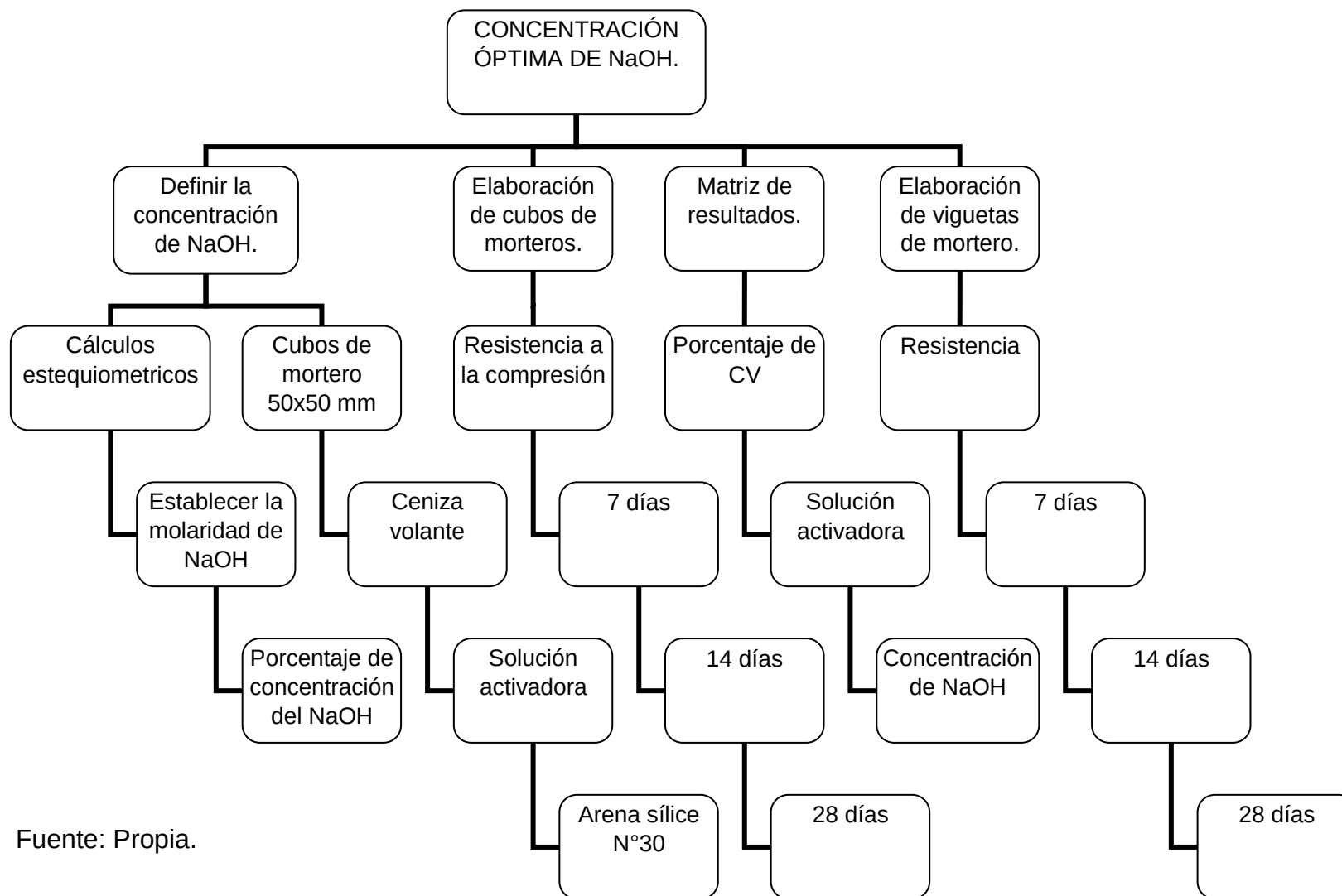
En las ilustraciones 3, 4, 5 y 6 se resume cada fase de acuerdo a la organización en paralelo que se mantuvo en la investigación, esto para razonar mejor del proceso y la relación de las ideas de cada sub-fase.

Ilustración 3 Diagrama del diseño metodológico. Fase 1



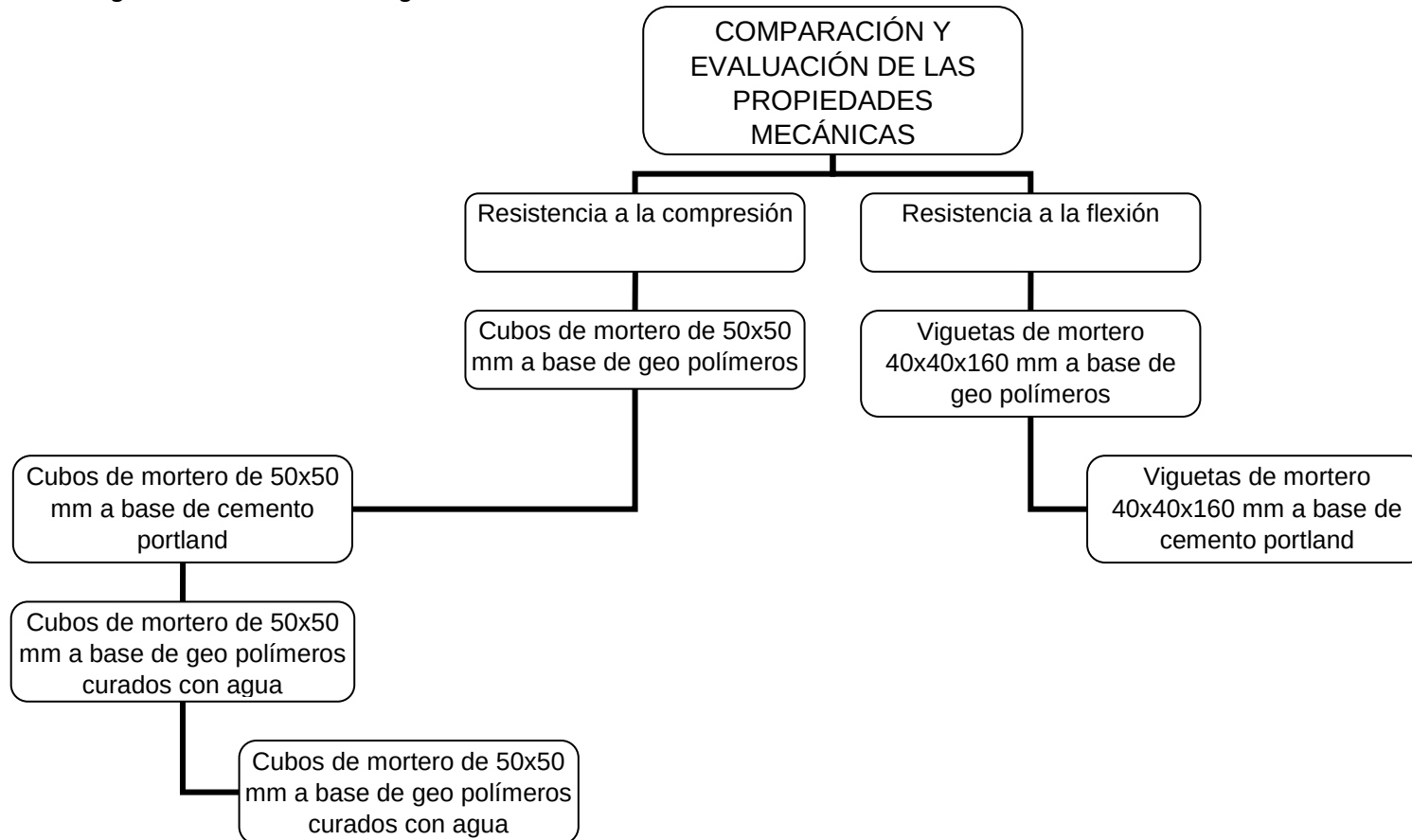
Fuente: Propia.

Ilustración 4 Diagrama del diseño metodológico. Fase 2



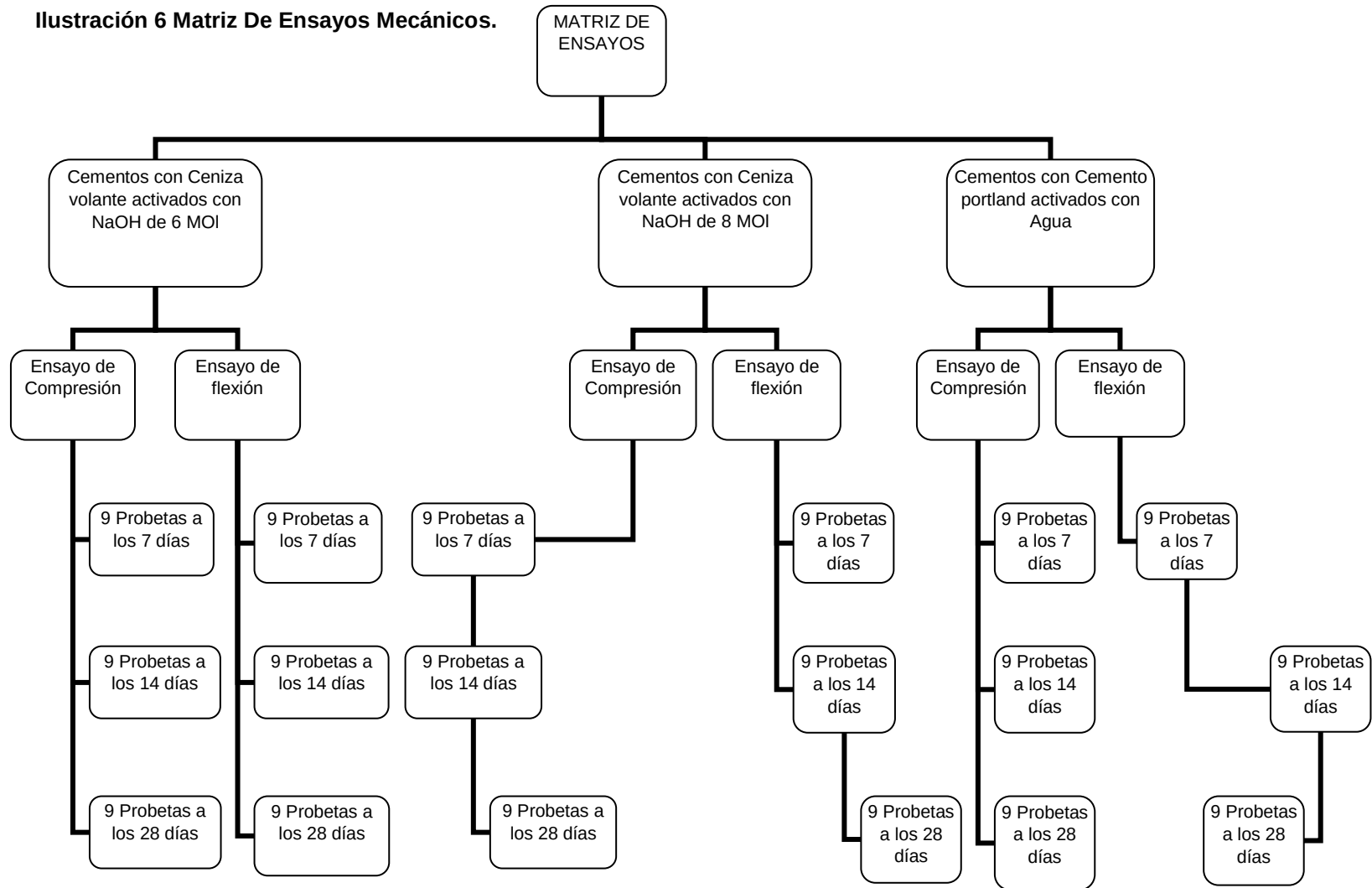
Fuente: Propia.

Ilustración 5 Diagrama del diseño metodológico. Fase 3



Fuente: Propia.

Ilustración 6 Matriz De Ensayos Mecánicos.



Fuente: Propia.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A LA COMPRESIÓN DE LAS PROBETAS.

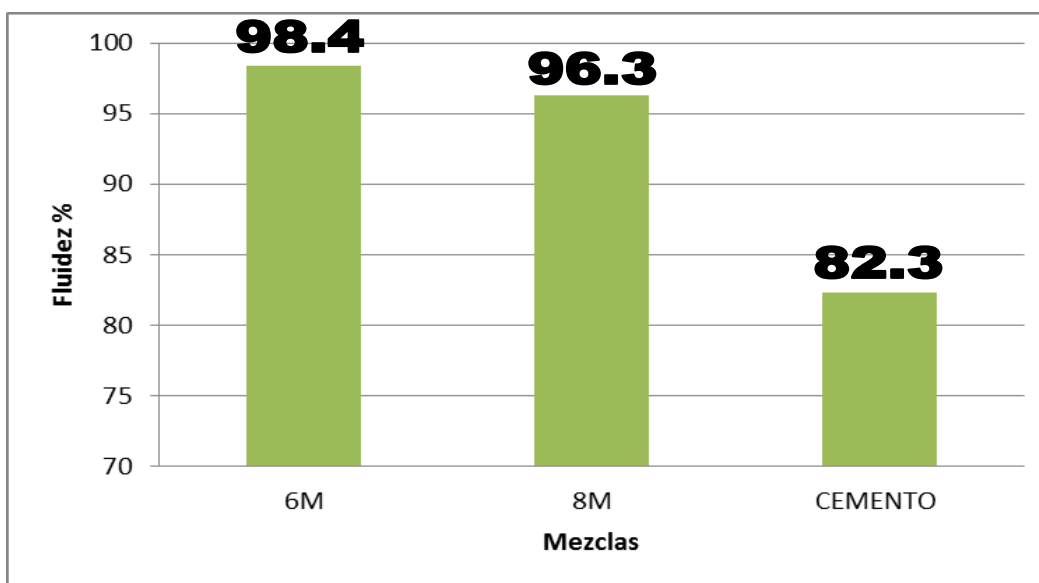
Con el fin de encontrar y seleccionar la molaridad óptima para la cual el hidróxido de sodio se comporta de la mejor forma, se realizan dos mezclas con distintas molaridades del NaOH (6 Mol y 8 Mol) y una mezcla de cemento portland, para evaluar la resistencia a compresión de los morteros, en estado de fluidez y en estado endurecido.

De esta forma se encontró que para la molaridad de 8 la fluidez se reducía con respecto a la mostrada por la mezcla de 6 Mol, que fue la que obtuvo una mayor fluidez de las dos mezclas, como se puede observar en la Gráfica 1.

Tabla 3 Fluidez de Morteros 6 Mol, 8 Mol y Cemento Portland

MEZCLA	RELACION A/C	FLUIDEZ
6M	0.4	98,4%
8M	0.4	96,3%
CEMENTO PORTLAND	0.4	82,3%

Grafica 1 Fluidez de Morteros 6 Mol, 8 Mol y Cemento Portland.



Fuente: Propia

Para preparar las mezclas de los cubos de morteros se calcularon de acuerdo con lo planteado en la norma I.N.V.E. 323- 07, en la que se dice que por 1 parte de material cementante el intervalo son 2.75 de arena, entonces para 1000 g de ceniza volante se necesita 2750 g de arena sílice N° 30, ya obteniendo estos valores de la ceniza, se hace la relación de NaOH con ceniza volante para obtener la solución necesaria para los cubos de mortero.

NaOH/Ceniza= 0.4 que al despejar NaOH que da de la siguiente manera

Solución de NaOH= 0.4 * Ceniza esto es igual

Solución de NaOH = 0.4 g/mL* 1000 g = 400 mL.

Teniendo en cuenta las cantidades a utilizar, se procedió a realizar las probetas y someterlas al ensayo de resistencia, para cada mezcla se prepararon 27 probetas, de las cuales se fallaron nueve en cada día de ensayo.

El esfuerzo de compresión se calculó con la fórmula ($\sigma_c = F/A$), teniendo en cuenta que los valores arrojados por la maquina son en KN (como se presentan en la

Tabla 5), se procede a cambiarlos a la unidad de N para el respectivo calculo. El desarrollo de éste cálculo se presenta en la Tabla 4 y los resultados obtenidos en la

Tabla 5.

Tabla 4: Cálculo de Esfuerzo de compresión

probeta	Fuerza de compresión		Esfuerzo a la compresión	Esfuerzo promedio a la compresión
	Directo de la maquina en KN	Valor en N		
1	43.6	43 600	$\sigma_c = 43600\text{N}/2500\text{mm}^2 = 17.44\text{N}/\text{mm}^2 = \mathbf{17.44\ MPa}$	17.49 MPa
2	43.7	43 700	$\sigma_c = 43700\text{N}/2500\text{mm}^2 = 17.48\text{N}/\text{mm}^2 = \mathbf{17.48\ MPa}$	$\approx 17.5\ \text{MPa}.$

3	43.9	43 900	$\sigma_c = 43900\text{N}/2500\text{mm}^2 = 17.56\text{N/mm}^2 = \mathbf{17.56\text{ MPa}}$	
---	------	--------	---	--

Fuente: Propia

Tabla 5 Fuerzas y esfuerzos de la compresión.

Variables		Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla de Cemento	
Días	Muestras	Ceniza volante activada con NaOH 6M a 60°C		Ceniza volante activada con NaOH 8M a 60°C		Cemento portland activado con 0.4% de agua a 60°C	
		Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)	Fuerza (KN)	Esfuerzo (MPa)
7	1	31.1	12.4	43.8	17,5	33.8	13,5
	2	23.5	9.4	42.0	16,8	37.0	14,8
	3	28.5	11.4	43.7	17.4	33.5	13.4
	4	28.1	11.2	41.5	16.5	33.0	13,2
	5	24.3	9.7	40.8	16.3	36.5	14,6
	6	30.8	12.3	43.8	17.5	32.8	13.1
	7	30.3	12.1	40.5	16.2	34.0	13,6
	8	24.0	9.6	41.3	16.9	36.3	14,5
	9	30.5	12.2	44.0	17.6	34.5	13.8
14	1	33.8	13.5	51.3	20.5	48.8	19.5
	2	32.0	12.8	49.5	19.8	46.8	18.7
	3	33.5	13.4	48.5	19.4	48.5	19.4
	4	30.5	12.2	51.5	20.6	48.3	19.3
	5	33.3	13.3	48.0	19.2	48.0	19.2
	6	31.8	12.7	50.5	20.2	46.3	18.5
	7	31.0	12.4	48.8	19.5	46.5	18.6
	8	32.9	13.1	49.3	19.7	47.8	19.1
	9	31.5	12.6	50.3	20.1	46.0	18.4
28	1	48.3	19.3	63.5	25.4	53.5	21.4
	2	47.0	18.8	63.3	25.3	50.8	20.3
	3	46.0	18.4	61.1	24.4	56.0	22.4
	4	46.8	18.7	64.0	25.6	53.0	21.2
	5	48.0	19.2	60.8	24.3	51.0	20.4
	6	48.5	19.4	63.3	25.3	56.3	22.5
	7	46.3	18.5	61.1	24.4	53.1	21.3
	8	48.0	19.2	62.5	25.0	53.8	21.5

	9	46.5	18.6	60.5	24.2	56.0	22.4
--	---	------	------	------	------	------	------

Fuente: Propia.

Como se mencionó previamente, de los valores de la Tabla 5 se toman las tres mejores valores, los cuales se presentan en la Tabla 6.

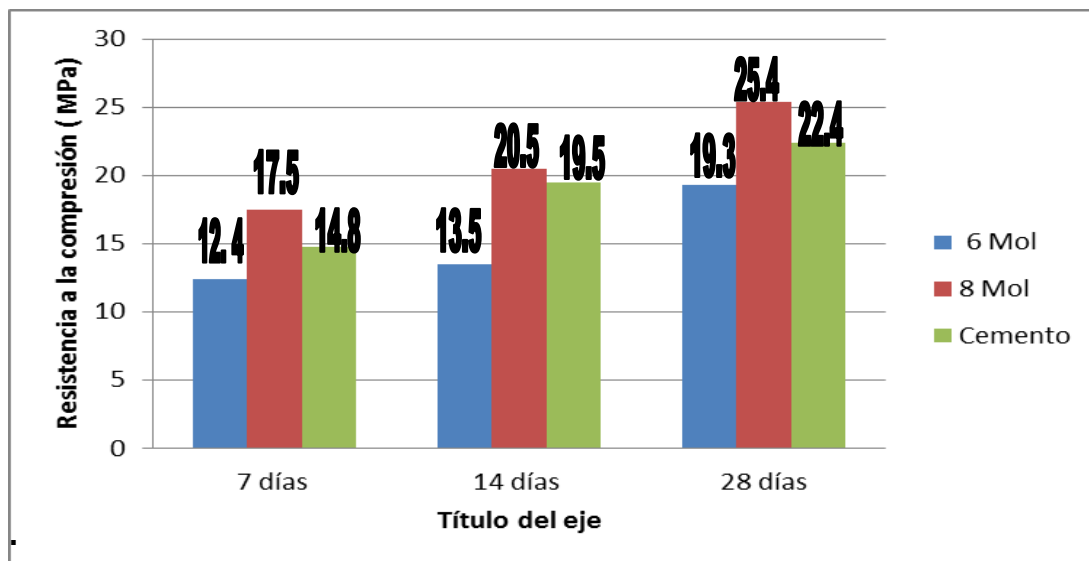
Tabla 6 Resistencia a compresión cubos de mortero de ceniza volante activados con NaOH 6 Mol ,8 Mol y Cemento Portland

Variables	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla de Cemento
Días	Ceniza volante activada con NaOH 6M a 60°C	Ceniza volante activada con NaOH 8M a 60°C	Cemento portland activado con 0.4% de agua a 60°C
7	12.4 (Mpa)	17,5 (Mpa)	13,5 (Mpa)
	9.4 (Mpa)	16,8 (Mpa)	14,8 (Mpa)
	11.4 (Mpa)	17.4 (Mpa)	13.4 (Mpa)
14	13,5 (Mpa)	20,5 (Mpa)	19,5 (Mpa)
	12,8 (Mpa)	19,8 (Mpa)	18,7 (Mpa)
	13.4 (Mpa)	19.4 (Mpa)	19.4 (Mpa)
28	19,3 (Mpa)	25,4 (Mpa)	21,4 (Mpa)
	18,8 (Mpa)	25,3 (Mpa)	20,3 (Mpa)
	18.4 (Mpa)	24.4 (Mpa)	22.4 (Mpa)

Fuente: Propia

En la Tabla 6, se evidencia que independientemente de la fluidez la mezcla 8 Mol, ésta mostro mayor resistencia a la compresión respecto a la mezcla 6 Mol y la mezcla de cemento Portland. En los días de 7 y 14 las mezclas 6 Mol y 8 Mol obtienen resistencias cercanas, sin embargo, para los 28 días la 8M la supera a las otras dos en mayor proporción.

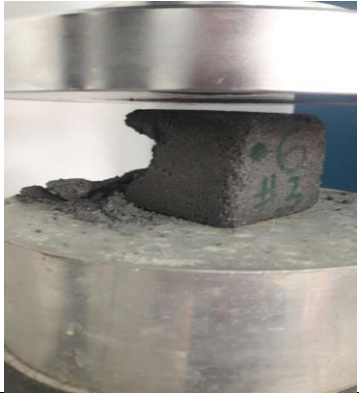
Grafica 2 resistencia a compresión de cubos de ceniza volante activados con NaOH y cemento portland



Fuente: propia

La resistencia a compresión evalúe en cubos de morteros de 50x50 mm, donde obtuve resultados de distintas edades evaluadas, que se presentan en la Tabla 4. De acuerdo con los resultados alcanzados por las mezclas, se puede observar el desarrollo de la resistencia en el tiempo, dejando ver que para la probeta de control Mezcla 1 (**6 Mol**) se obtienen a los 7 Días, 14 Días y 28 Días resistencia a Compresión de cubos de NaOH a edades iniciales, por consiguiente para la mezcla de control que obtiene una resistencia de 9.44 MPa a edad de 7 días, y que para la Mezcla 2 (**8 Mol**) muestra mejor resultado en esta misma edad, que obtiene a los 7 días una resistencia de 17.5 MPa, pero sin embargo para edades intermedias y finales la Mezcla de cemento portland logra resistencias de hasta 19.3 MPa estando a la par con la Mezcla 2 con 25.4 MPa. En el caso de la Mezcla 1 se obtiene bajas resistencias en las edades iniciales, sin embargo, sus resistencias aumentan en función del tiempo hasta alcanzar 19.3 Mpa

Tabla 7 Resultados de la falla a la compresión de cubos morteros.

TIPOS DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN RESULTADOS	IMAGEN
Mezcla 1 (6 Mol NaOH)	Cuando sometí el cilindro al ensayo de compresión obtuve una falla en la parte de atrás del espécimen donde se dio una fisura ya que debido a la junta de compactación del probeta no fueron constantes.	
Mezcla 2 (8 Mol NaOH)	Por consiguiente le hice el ensayo de compresión a la otra muestra, donde note que tenía buenos resultado en comparación a la anterior muestra, además de eso ocurrió el mismo problema de las juntas frías que esto se da al momento de la compactación.	
Mezcla de cemento	Por último pase hacer el ensayo al espécimen de cemento donde obtuve la falla en una punta del cubo.	

Fuente: Propia

Es representativo, que para las mezclas con Ceniza Volante que fueron activadas alcalinamente con NaOH en su totalidad o en su mayor parte, obtuvieron mejores desempeños a compresión. De igual forma, respecto a los resultados se puede inferir que la interacción del NaOH, fue buena debido a que presenta eficientes resistencias, cabe mencionar que, durante el proceso de los ensayos de las probetas, los cubos de la Mezcla 1 **(6 Mol)** y Mezcla 3 Cemento, presentaban desmejoramiento, luego de ser retirados de la cámara de curado, donde esto ocurre en todas sus edades que se sometieron a la compresión.

7.2 COMPORTAMIENTO MECÁNICO A FLEXIÓN

La resistencia a flexión se evaluó en probetas rectangulares de 4x4x16 cm, con luz libre de 12cm, y una carga en la mitad de la luz de la vigueta, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8. Se evaluaron 3 especímenes por etapa a edades de 7, 14 y 28 días. Evaluados de acuerdo a la metodología enunciada en la I.N.V.E 324 -07.

Tabla 8 Lectura de Fuerzas y Flexiones.

Variables		Mezcla 1		Mezcla 2		Mezcla de Cemento	
Días	Muestras	Ceniza volante activada con NaOH 6M a 60°C		Ceniza volante activada con NaOH 8M a 60°C		Cemento portland activado con 0.4% de agua a 60°C	
		Fuerza (KN)	Flexión (MPa)	Fuerza (KN)	Flexión (MPa)	Fuerza (KN)	Flexión (MPa)
7	1	0.0126	3.5	0.0204	5.6	0.0173	4.8
	2	0.0115	3.2	0.0195	5.4	0.0155	4.3
	3	0.0119	3.3	0.0184	5.1	0.0151	4.2
	4	0.0112	3.1	0.0206	5.7	0.0162	4.5
	5	0.0113	3.6	0.0195	5.4	0.0155	4.3
	6	0.0119	3.3	0.0204	5.6	0.0151	4.2
	7	0.0115	3.2	0.0195	5.4	0.0173	4.8
	8	0.0126	3.5	0.0206	5.7	0.0148	4.1
	9	0.0119	3.3	0.0195	5.4	0.0151	4.2
14	1	0.0191	5.3	0.0281	7.8	0.0223	6.2
	2	0.0177	4.9	0.0267	7.4	0.0220	6.1
	3	0.0173	4.8	0.0249	6.9	0.0231	6.4
	4	0.0187	5.2	0.0263	7.3	0.0234	6.5
	5	0.0169	4.7	0.0249	6.9	0.0223	6.2
	6	0.0191	5.3	0.0267	7.4	0.0231	6.4
	7	0.0169	4.7	0.0281	7.8	0.0234	6.5
	8	0.0173	4.8	0.0249	6.9	0.0220	6.1
	9	0.0177	4.9	0.0267	7.4	0.0231	6.4

28	1	0.0187	5.2	0.0259	7.2	0.0213	5.9
	2	0.0195	5.4	0.0267	7.4	0.0220	6.1
	3	0.0204	5.6	0.0263	7.3	0.0223	6.2
	4	0.0184	5.1	0.0270	7.5	0.0231	5.9
	5	0.0204	5.6	0.0267	7.4	0.0220	6.1
	6	0.0187	5.2	0.0259	7.2	0.0223	6.2
	7	0.0195	5.4	0.0267	7.4	0.0220	6.1
	8	0.0184	5.1	0.0263	7.3	0.0231	5.9
	9	0.0204	5.6	0.0270	7.5	0.0220	6.1

Como en el ensayo anterior, se seleccionan los mejores tres valores y se contruyé la Tabla 9.

Tabla 9 Resistencia a Flexión Cubos de Mortero de Ceniza Volante Activados con NaOH 6 Mol ,8 Mol y Cemento Portland

Variables		Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla Cemento
Día	Muestras	Ceniza volante activada con NaOH 6M a 60°C	Ceniza volante activada con NaOH 8M a 60°C	Cemento portland activado con 0.4% de agua a 60°C
7	1	3.54 (Mpa)	5.6 (Mpa)	4.8 (Mpa)
	2	3.2 (Mpa)	5,4 (Mpa)	4.3 (Mpa)
	3	3.3 (Mpa)	5.1 (Mpa)	4.2 (Mpa)
14	1	5.3 (Mpa)	7.8 (Mpa)	6.2 (Mpa)
	2	4.9 (Mpa)	7,4 (Mpa)	6.1 (Mpa)
	3	4.8 (Mpa)	7.2 (Mpa)	6.4 (Mpa)
28	1	5.2 (Mpa)	7.4 (Mpa)	5.9 (Mpa)
	2	5.4 (Mpa)	7.2 (Mpa)	6.1 (Mpa)
	3	5.6 (Mpa)	7.3 (Mpa)	6.2 (Mpa)

Elaboración: Propia.

En este sentido en las tablas siguientes representan la secuencia realizada en el laboratorio y la debida descripción.

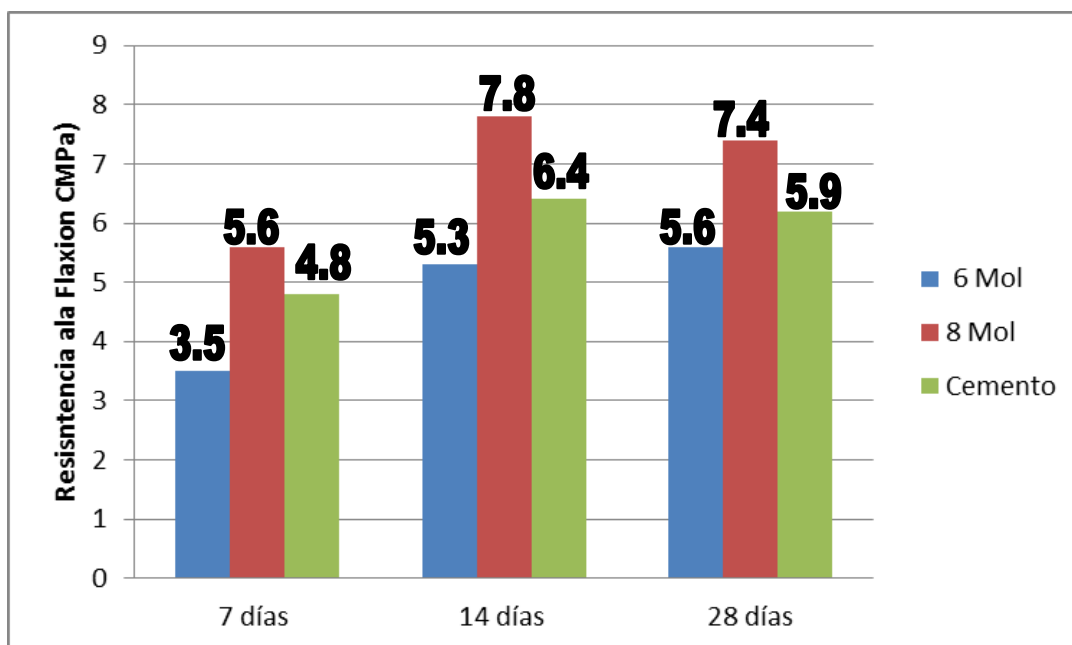
Tabla 10 Resultados a Falla a Flexión de viguetas de Mortero.

TIPOS DE MUESTRA	DESCRIPCIÓN RESULTADOS	IMAGEN
Mezcla 1 (6 Mol NaOH)	Cuando sometí la vigueta al ensayo de flexión obtuve una rotura rápidamente de la probeta arrojando unos resultados mínimos en comparación de los otros dos especímenes.	
Mezcla 2 (8 Mol NaOH)	Por consiguiente le hice el ensayo de flexión a la otra muestra, donde obtuve demora en la rotura y así me arrojó un buen resultado en comparación a la anterior muestra.	
Mezcla de cemento	Por último pase hacer el último ensayo de flexión al espécimen de cemento donde también obtuve demora en la rotura, donde los resultados no fueron mejores que la mezcla 2 pero tampoco peores como la mezcla 1.	

Elaboración: Propia.

Se evidencian resistencias entre 3.2 y 7.8 MPa, en el cual la mayor resistencia la obtuvo la Mezcla 2 (**8 Mol**). Para este caso las viguetas con cenizas volante activadas alcalinamente con NaOH obtuvieron similares resistencias iniciales, sin embargo, para edades de 7 días en adelante la resistencia de la mezcla 1 (**6 Mol**), Mezcla 2 (**8 Mol**) Y la mezcla 3 Cemento activada 100% con NaOH, aumentaron considerablemente, mejorando la resistencia mostrada por la mezcla de control con cemento Tipo I. Se reitera en similitud con los resultados a compresión que para los geo polímeros activados con Na_2SiO_3 , no se presentó buena trabajabilidad que es de gran importancia para un mezclado homogéneo y para el moldeado de las muestras a lo que se le puede atribuir sus bajo desempeños mecánicos. Para mezclas geo poliméricas el mejor desempeño lo obtuvo la mezcla de ceniza volante activada alcalinamente cien por ciento con NaOH con 5.234 MPa para 28 días, lo que demuestra un desempeño aceptable por los requisitos de la I.N.V.E 324 - 07 que estipula un mínimo de 5.0 MPa, para prismas a flexión. En cuanto al restante de las pastas con cenizas volante alcanzaron resistencias para la misma edad entre 3.62 MPa, encontrándose por debajo de la norma.

Grafica 3 Resistencias a Flexión en Viguetas de Mortero.



Se evidencia que para las mezclas 1 y 3, no obtuve resultados favorables a lo largo de los periodos las resistencias en este geo polímeros tienden a permanecer constantes, en contraste con las demás mezclas que aumentan su resistencia gradualmente.

7.3 RECONOCIMIENTO DE LA MOLARIDAD ÓPTIMA DE LOS ACTIVADOR 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 de cementos, 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.

7.3.1 Caracterización de la materia prima a utilizar en la elaboración de pastas de cementos.

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.

7.3.1.1 Material cementante

- **Ceniza Volante**

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

Ilustración 7 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 11 Caracterización química de la ceniza volante - FRX

Nombre Elemento	Elemento y/o Compuesto	% en peso
Silicio	SiO_2	61.57
Aluminio	Al_2O_3	24.70
Hierro	Fe_2O_3	5.18
Azufre	SO_3	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.

- **Contenido de Humedad:**

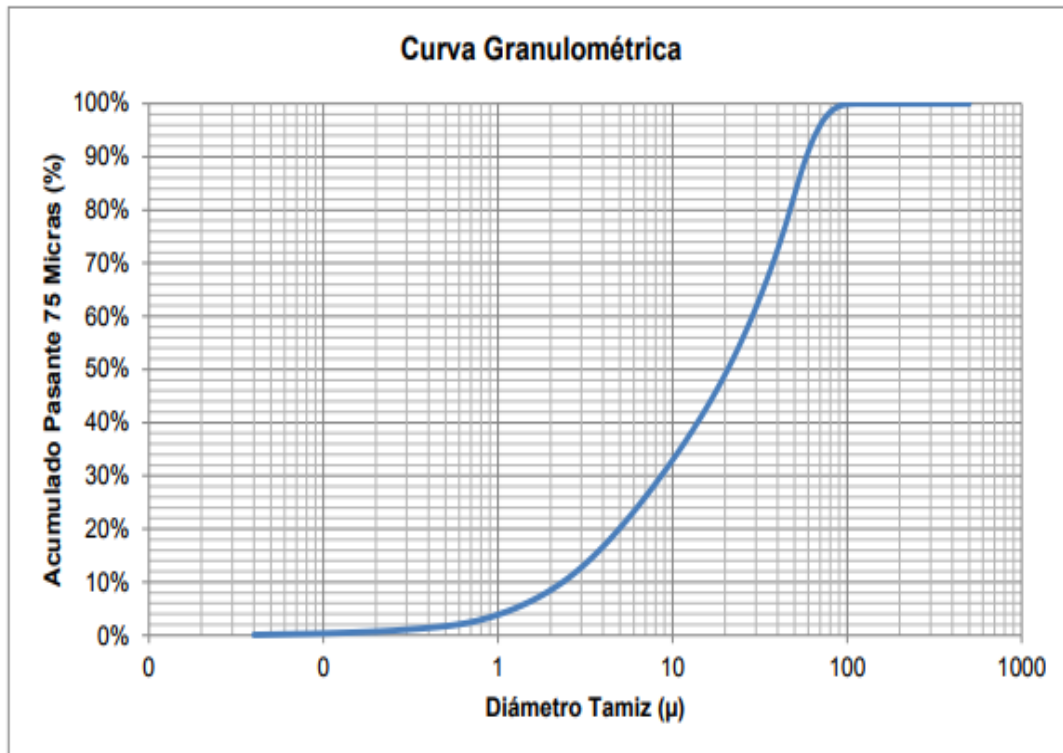
Se determinó el contenido de humedad de la muestra de ceniza volante, por medio del método descrito en la Norma ASTM C311-11b (ASTM C150, 2012)

$$w = \frac{\text{Peso perdido}_{105^{\circ}\text{C}}}{\text{Peso Inicial Humedo}} \times 100 = \frac{149,94 - 149,52}{149,94} \times 100 = 0,28\%$$

- **Requerimientos Físicos.**

Granulometría: Se realizó la granulometría de las cenizas volantes. Por medio del método Laser. Con el fin de conocer la distribución granulométrica.

Grafica 4 de Granulometría



Fuente: Propia.

Finura:

Se determina la finura de la ceniza por medio del método descrito en la norma NTC 3493 y ASTM c311. Pasante 45μ (Tamiz No 325) la ceniza evaluada cuenta con una finura de 77.79%. La finura resulta ser un parámetro significativo para aumentar la capacidad de reacciones con efecto puzolánico en la ceniza volante, debido a que al tener un mayor nivel de finura las áreas superficiales de la estructura silíceá de la ceniza volante pueda reaccionar en mayor porcentaje. En este caso se supera el porcentaje límite de material pasante 45μ que se encuentra según la norma NTC 3493 en máximo 34%.

7.3.1.2 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 (Ilustración 6).

De acuerdo a lo especificado en las fases de investigación, se realiza diferentes molaridades para la activación de los precursores, las cuales son: 6 y 8 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:

$6 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 240 \text{ gramos de NaOH.}$

$8 \text{ mol} * 39,997 \text{ g/mol} \approx 320 \text{ gramos de NaOH.}$

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

Ilustración 8 Muestra original de hidróxido de sodio



Fuente: Propia

Ilustración 9 Elaboración de la solución del Hidróxido de Sodio.



Fuente: Propia

7.3.2 Realizar pastas con geo polímeros

Inicialmente, se realizaron pastas con 100% Ceniza Volante, las cuales fueron activadas con Hidróxido de Sodio (NaOH) (ver Ilustración 8), las molaridades utilizadas en las soluciones de los activadores alcalinos para la fabricación de las pastas fueron: NaOH con concentraciones de 4, 6 y 8 mol.

Ilustración 10 a) Mezcla de la pasta de CV y activador y, b) Pastas de CV activadas alcalinamente.



Fuente: 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 8 mol llegan a estado de endurecimiento, aunque no del 100% por lo que se dejan a curado en temperatura ambiente hasta edad de 14 días.

8. CONCLUSIONES

1. Una de las principales conclusiones que se puede extraer el presente estudio, es la estabilidad de la mezcla geo polimérica activada alcalinamente con Hidróxido de Sodio Mezcla 2 **(8 Mol)**, debido a que tuvo un desempeño sobresaliente en todos los aspectos evaluados, igualando y mejorando propiedades de las dos mezclas de control con cemento hidráulico.
2. En el aspecto mecánico, esta mezcla obtuvo una resistencia a compresión de 25.4 MPa a 28 días, cumpliendo con lo estipulado en la NTC 220 para la misma edad y mejorando las resistencias obtenidas para las probetas de mortero con cemento tipo I.
3. En cuanto al comportamiento a flexión alcanzo resistencias de hasta 7.8 MPa resultado que se encuentra por encima de lo estipulado por la I.N.V.E 324 - 07.
4. Así, para temperaturas de 60°C la pasta con ceniza volante activada con NaOH mejoro en un 59 y 40% el desempeño mostrado por los morteros del cemento Tipo I respectivamente. De igual forma se encuentra por encima de la resistencia mínima requerida por la NTC 3993 para 28 días.
5. Aunque la procedencia de la ceniza volante es de gran importancia para la definición de las propiedades de las pastas de mortero, se puede concluir que el tipo de activador alcalino influye contundentemente en el desarrollo de las propiedades en estado fresco y endurecido de los morteros geo poliméricos y de la mano de este factor se encuentra el tiempo y temperatura de curado, las cuales definen la estructura del geo polímero.
6. Estudios realizados también demuestran que las temperaturas de curado afectan de manera importante el comportamiento mecánico de la mezcla que a mayor temperatura de curado mejores comportamientos mecánicos se obtienen, sin embargo, el aumento excesivo de temperatura puede afectar la estructura cristalina de la mezcla geo polimérica, recomiendan temperaturas entre 60°C.
7. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la capacidad mecánica y durable mostrada por la mezcla geo polimérica activada con NaOH que fue la que alcanzó mejores desempeños, podría enfocarse el uso de este material hacia la fabricación de morteros premezclados y elementos prefabricados, campo en el que dicha pasta podría desempeñar un óptimo

trabajo, para morteros premezclados la NTC 3993 especifica una resistencia mínima a compresión de 17.5 MPa a 28 días y para adoquines en concreto la NTC 220 fija un mínimo de módulo de rotura de 5.0 MPa a 28 días.

8. Los resultados dejan ver el gran potencial con el que cuentan estos materiales geo poliméricos en una posible aplicación, sustituyendo al cemento hidráulico de uso general Tipo I, dando una idea del aprovechamiento constructivo que se le puede dar por su facilidad con la que se puede adecuar a las instalaciones existentes en la industria actualmente.
9. Se puede presentar un amplio campo para el desarrollo de nuevos proyectos de investigación, con el objeto de profundizar en el perfeccionamiento y manejo de la amplia gama de factores que afectan las propiedades de los geo polímeros, de esta forma pautar una guía hacia el desarrollo de materiales más competitivos técnica, económica y ambientalmente.

9. RECOMENDACIONES

Dado los bajos desempeños iniciales y finales en cuanto a comportamiento mecánico, de la mezcla activada alcalinamente con Hidróxido de Sodio (Mezcla 1), se recomienda mantener una temperatura adecuada para curado con el fin de que la reacción activadora, ceniza sea mayor, y esto pueda mejorar el comportamiento mecánico y durable de estos morteros.

Para estudios posteriores y futuras líneas de investigación, se podría investigar sobre el comportamiento de las mezclas geo polímeros con ceniza volante en mampostería, y funcionamiento como mortero premezclado, evaluando sus propiedades mecánicas y durables como prefabricado. Y de igual forma tener en cuenta como la variación de temperatura de curado afecta las propiedades de las probetas.

De igual forma se recomienda realizar estudios con otro tipo de ceniza volante, de distinta procedencia industrial, tomando como variable el tiempo de curado de las mezclas geo polímeros, aumentando la temperatura de curado, observando las variaciones en el comportamiento de las probetas.

En el desarrollo de investigaciones futuras, se recomienda para la manipulación y evaluación ante altas temperaturas (más de 60°C), del geo polímeros con hidróxido de sodio (NaOH), tener en cuenta los vapores emitidos por estos materiales cuando se exponen a temperatura mayores de 60°C, donde resulta pertinente la adecuación de un espacio con un sistema de extracción. En la concentración de hidróxido de sodio trabajada en este estudio, 8 molar se recomienda para la manipulación utilizar guantes, tapabocas y gafas de protección, ya que esta sustancia durante procesos de elaboración de especímenes, puede llegar a entrar en contacto con la piel y ojos causando irritación severa.

10.REFERENCIAS

UPME, U. Unidad de Planeación Minero Energética UPME. [En línea].09 mayo de 2012 <http://www1.upme.gov.co/>. [Consultado 28-03-2017].

DAVIDDOVITS, J. Solid phase synthesis of a mineral block polymer by low temperature polycondensation of aluminosilicate polymers. IUPAC International Symposium on Macromolecules Stockholm. New Polímero of high stability, September de 1976

MANNAN. M. A., B. H. Effect of curing conditions on the properties of OPS concrete. Building Env, vol.37, 1167-1171. 2002.

ASOCCEM, A. Asociación De Productores De Cemento. [En línea].22 mayo de 2012 <http://www.asocem.org.pe/productos-a> [Consultado 28-03-2017].

KRIVENKO, P.V., K. Directed synthesis of alkaline alumino silicate minerals in a geocement matrix. J. Mater Sci. 2007 p.14

Davidovits, J. Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland cement. (P. C. Association, Ed.) Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment, March de 1993. Pág. 15

Moreno, N. Valorización de cenizas volantes para la síntesis de zeolitas mediante extracción de sílice y conversión directa. Aplicaciones ambientales. Tesis doctoral de la Universidad Politécnica de Cataluña, Cataluña. March de 1991. Pág.250

DAVIDOVITS, Joseph, "Global warming impact on the cement and aggregates industries", World Resources Review, Vol 6, p 264, 1994.

¹MINAMBIENTE. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.[En línea].19 junio de 2012.<http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia17.pdf> [Consultado 28-03-2017].

LAVERDE, L. F.-J.-J.-S.-M. Remoción de Carbón quemado de las cenizas volantes producidas en el proceso de combustión de carbón. Revista Energética. Diciembre de 2007. p6.

ARQHYS. Geopolímeros [en línea]: 14 de Abril de 2008 <http://www.arqhys.com/construccion/geopolimeros.html>. [consultado 03-01-2017]

CECON. Concreto De 360 Grados [en línea]: 27 de Mayo de 2008 <http://blog.360gradosenconcreto.com/materiales-cementantes-en-el-concreto>. [consultado 23-04-2017].

PURDON.O.The action of alkalis on blast-furnace slag, J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun.December 1940. pp191–202.

PARCAN. Cemento Cemex [en línea]:<http://www.cemex.com/ES/ProductosServicios/Cemento.aspx>, [Tomado el 18-08-2016].

PALOMO A. Grutzeck M.W., Blanco M.T. (1999). Alkali-Activated fly ashes: A cement for the future. Cement and Concrete Research. V29. pp 1323-1329.

TURAN. Concretos [en línea]: <http://elconcreto.blogspot.com.co/search/label/El%20Agua%20del%20Concreto> [Tomado el 18-08-2016]

PROVIS J.L. Y VAN DEVENTER J.S.J. (2007) Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling, Chem. Eng. Sci. 62 (9). Pp. 2318–2329.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas De Ensayos de Materiales Para Carreteras. Manual. Diciembre 2013. P 9.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas De Ensayos de Materiales Para Carreteras. Manual. Diciembre 2007. P 32.

PARDON. Resistencia De Mortero [en línea]: <http://docslide.us/documents/ntc-220-determinacion-de-la-resistencia-de-morteros-de-cemento-hidraulico.html> [Tomado 17 de marzo de 2017]

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas De Ensayos de Materiales Para Carreteras. Manual. Diciembre 2007. P 32.

INSTITUTO NACIONAL DE VIAS. Normas De Ensayos de Materiales Para Carreteras. Manual. Diciembre 2013. P 9.

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.

89 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 90 volantes de mortero se mezcla a temperatura ambiente. En: Procedia Engineering. 2015. Vol. 125. P. 650 – 656.