

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN
GEOPOLÍMERO SINTETIZADO CON ARCILLA COMO MATERIAL
CEMENTANTE**

ANA KATHERINE MUÑOZ CASTRO

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

**EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE UN
GEOPOLÍMERO SINTETIZADO CON ARCILLA COMO MATERIAL
CEMENTANTE**

**Trabajo de grado para optar al título Profesional de:
Ingeniera Civil.**

Ing. Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres
Asesor disciplinar

Lic. Roy Waldhiersen Morales Pérez
Asesor metodológico

**UNIVERSIDAD LA GRAN COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2015**

DEDICATORIA

A mis padres Olga y William quienes siempre me apoyaron con mis estudios como su legado más fructífero.

A mi hermana Juliette quien siendo la menor siempre fue un ejemplo de carácter y constancia.

A mi tía Rosa por todo su gran afecto y consejos de vida, sin ellos no sería completamente quien soy.

A mi abuelita Ana María quien siempre será mi heroína, un modelo a seguir de una mujer sabia, independiente e intrépida.

AGRADECIMIENTOS

Al licenciado Roy Morales quien constantemente fue una guía y motivación siempre en pro de la investigación.

Al Ingeniero Arnold Gutiérrez quien acompañó el proceso formativo compartiendo su tiempo, dedicación e instrucción para el desarrollo óptimo de este proyecto.

Agradezco el patrocinio de la empresa Ladrillera Tilka S.A.S. quien suministro la arcilla empleada en esta investigación, a todos sus empleados quienes fueron muy atentos y en especial al Ingeniero Aldemar Sarmiento quien apoyó esta propuesta.

A Nydia Romero Geóloga de la Universidad Nacional de Colombia, quien brindó atentamente sus conocimientos profesionales en la materia.

A los laboratoristas grancolombianos de materiales José Luis Rozo, Martin Viatela y Alexander Padilla, quienes facilitaron el desarrollo de los ensayos con su disposición y experiencia, de igual manera al ingeniero Oscar Camelo quien apoyo la labor del mismo en los laboratorios de química.

Reconozco el aporte y colaboración de Julio Cesar Botia laboratorista de hidráulica de la Universidad Nacional, quien compartió sus estudios y experiencia respecto a diversas investigaciones análogas.

Gratifico los aportes del personal del laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional, en especial al Ingeniero Wilson Romero quien compartió sus saberes referentes al campo de estudio (XRF).

A la Universidad La Gran Colombia por facilitar los espacios académicos de investigación y en general a sus docentes quienes han participado en mi formación académica.

A Dios.

RESUMEN

Las investigaciones sobre nuevos materiales de construcción que suplan el uso de cemento portland surgen a partir de los altos índices de contaminación del medio ambiente, especialmente por los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO₂) del cual el 7% es generado en la producción del cemento convencional y cada año este porcentaje se incrementa en la industria. Por cada 1.000 kilogramos de cemento producido, se emiten 900 kilos de CO₂, mientras que la producción de geopolímeros emite cantidades de CO₂ en un 80% menos que la del cemento común.

En el presente trabajo se expone la creación de un geopolímero sintetizado con arcilla como cementante, el objetivo principal es obtener una resistencia a la compresión similar a la del cemento portland, hallar una correlación entre los mejores activantes, respecto al elemento alcalino más apropiado, su molaridad y su concentración en la solución química. El éxito de la generación de un geopolímero se basa en los elementos que componen la materia prima del mortero, además de encontrar el punto óptimo entre la relación de la cantidad de agente hidratante y agregado, el tiempo de curado y la temperatura.

La metodología empleada se fundamenta en la experimentación, se basa en cuatro fases de investigación, la primera en reconocer diversas investigaciones referente al tema, la segunda en caracterizar los materiales seleccionados, la tercera en realizar los diferentes ensayos de laboratorio y finalmente analizar los valores de la resistencia a la compresión que para este caso el más alto fue de 8.77 Mpa a los 28 días, con un agregado de arena de río, a una temperatura de 120°C; y aunque este valor es la tercera parte del valor indicado en la NTC 220, es preciso seguir indagando en los factores que influyen tanto en la mezcla del mortero como en el curado para encontrar mejores resultados.

PALABRAS CLAVES

Geopolímeros, morteros, activación alcalina, arcillas activadas álcali-sílice, resistencia a la compresión.

SUMMARY

Research on new building materials that replace the use of Portland cement emerging from the high levels of pollution, especially greenhouse gases like carbon dioxide (CO₂) of which 7% is generated in conventional cement production each year and this percentage increases in the industry. Per 1,000 kilograms of cement produced, 900 kilos of CO₂ are emitted, while production of geopolymer amounts of CO₂ emitted 80% less than that of ordinary concrete.

In this work the creation of a geopolymer synthesized with clay as cementitious material, have the main objective of to obtain a compression strength similar to that of Portland cement, find a correlation between the best activators, regarding the most appropriate alkaline element, its molarity and its concentration in the chemical solution. The success of generating a geopolymer is based on the elements of the raw material mortar, in addition to finding the optimum relationship between the amount of moisturizing and aggregates, the curing time and temperature.

The methodology is based on experimentation, it is based on four phases of research, the first to recognize various investigations concerning the subject, the second to characterize the materials selected, the third in performing various laboratory tests and finally analyze values the compressive strength for this case the highest was 8.77 MPa at 28 days, with an aggregate of river sand at a temperature of 120 ° C; and although this value is one third of the value specified in NTC 220, it is necessary to continue work on the factors that influence both the mortar mix and curing to find better results.

KEYWORDS

Geopolymers, mortar, alkali activation, activated clays alkali-silica, compressive strength.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	13
2.	ANTECEDENTES	16
3.	JUSTIFICACIÓN	18
4.	OBJETIVOS.....	19
4.1	GENERAL.....	19
4.2	ESPECÍFICOS.....	19
5.	MARCO CONCEPTUAL	20
5.1	SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL	20
5.2	MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO.....	21
5.2.1	Cemento	22
5.2.2	Pasta.....	24
5.2.3	Mortero	24
5.2.4	Agregados.....	25
5.2.5	Agua	26
5.2.6	Aire	26
5.2.7	Aditivos	26
5.3	GEOPOLÍMEROS.....	27
5.3.1	Metacaolín	28
5.3.2	Microsílice.....	28
5.3.3	Escorias de Alto Horno	28
5.3.4	Cenizas De Incineración de Residuos Sólidos	29
5.3.5	Ceniza Volante.....	29
5.3.6	Activadores Químicos	29
5.4	ARCILLA.....	30
5.5	DISEÑO MEZCLA DE MORTERO.....	33
5.6	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS	34

6.	MARCO LEGAL	35
7.	DISEÑO METODOLÓGICO	36
7.1	FASES DE INVESTIGACIÓN.....	38
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	41
8.1	EQUIPOS y HERRAMIENTAS.....	41
8.2	CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.....	45
8.2.1	Agente Cementante	45
8.2.1.1	Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arcillas.....	45
8.2.1.2	Preparación del Material	46
8.2.2	Agregado	48
8.2.2.1	Arena de peña	48
8.2.2.1.1	Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arena de Peña.....	48
8.2.2.1.2	Análisis Granulométrico área de peña.....	49
8.2.2.2	Agregado Arena de río.....	49
8.2.2.2.1	Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arena de río.....	50
8.2.2.2.2	Análisis Granulométrico área de río	50
8.2.3	Agente Activador:.....	51
8.2.3.1	Soluciones Activantes.....	51
8.3	ENSAYOS DE LABORATORIO	53
8.3.1	Ensayo de Activación Piloto.....	53
8.3.2	Ensayo de Fluidéz.....	54
8.3.3	Ensayo de alcalinidad a la arcilla.....	57
8.3.4	Ensayo de Densidad o Peso específico.....	58
8.3.5	Ensayo de Relación de Activante/Cementante.....	59
9.	CONCLUSIONES	75
10.	RECOMENDACIONES	77
11.	BIBLIOGRAFÍA.....	78

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Producción de Cemento en el Mundo.	13
Ilustración 2 Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)	14
Ilustración 3 Resistencia a la compresión de un concreto geopolímero basado en Metacaolín y un concreto basado en cemento.	17
Ilustración 4 Procesos de meteorización química en un perfil del suelo.	31
Ilustración 5 Localización Arcillas Ladrillera Tikal.	32
Ilustración 6 Mapa conceptual de la metodología empleada para las probetas a fallar. ...	39
Ilustración 7 Arcilla natural sin procesar.	45
Ilustración 8 Molienda de Arcilla Maquina de los Ángeles.	47
Ilustración 9 Molienda de Arcilla Equipo Triturador	47
Ilustración 10 Arcilla natural, sin humedad y pasa tamiz 200.	47
Ilustración 11 Soluciones Químicas.	52
Ilustración 12 Activación de arcilla - prueba piloto.	53
Ilustración 13 Curación de Arcilla muestra piloto a 24 horas.	53
Ilustración 14 Ensayo de Fluidez	54
Ilustración 15 Prueba de alcalinidad de la arcilla.	57
Ilustración 16 Ensayo de Gravedad específica de la arcilla.	58
Ilustración 17 Prueba geopolimerización relación 1:1 Activante/Cementante.	59
Ilustración 18 Prueba Relación Arcilla/Arena.	60
Ilustración 19 Moldes en acrílico para morteros	61
Ilustración 20 Ensayos de Resistencia a la Compresión	62
Ilustración 21 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Potasio (7días)	63
Ilustración 22 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Sodio (7días) 63	
Ilustración 23 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Sodio con Silicato de Sodio (7 días)	64
Ilustración 24 Resistencia a la compresión Geopolímero con Silicato de Sodio (7 días) ..	64
Ilustración 25 Resistencia a la compresión con Silicato de Sodio y arena de peña.	67
Ilustración 26 Resistencia a la compresión con Silicato de Sodio y arena de río.	68
Ilustración 27 Mapa conceptual de matriz de resultados final	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Composición química y de los compuestos de los cemento.....	22
Tabla 2 Aplicaciones del mortero.....	25
Tabla 3 Caracterización Química de Arcillas.....	46
Tabla 4 Caracterización Química de la Arena Silícea.....	48
Tabla 5 Granulometría de Arena Silícea.....	49
Tabla 6 Caracterización de Arena de Río.....	50
Tabla 7 Granulometría arena de río.....	50
Tabla 8 Matriz de Soluciones Activantes.....	51
Tabla 9 Matriz Primeros cubos de Ensayo a la Resistencia a la Compresión7 días.....	65
Tabla 10 Matriz final de Activación del Geopolimero.....	66
Tabla 11 Primer Resistencia a la compresión arena de rio a 10M (7dias).....	69
Tabla 12 Resistencia a la Compresión Arena de Peña.....	70
Tabla 13 Resistencia a la Compresión Arena de Río.....	71

GLOSARIO

Cemento Pórtland (CP): Producto que se obtiene por la pulverización del clinker pórtland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker. (NTC 31)

Gravedad específica: Es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura. (INV E 128)

Hidróxido de potasio (KOH): Conocido como potasa cáustica, es un compuesto químico inorgánico usado como base fuerte la mayoría de las aplicaciones explotan la reactividad con ácidos y la corrosividad natural, el contacto con la humedad o el agua puede generar desprendimiento de calor. (Se estima de 700.000 a 800.000 toneladas de producción de KOH en 2005 y del NaOH se producen unas cien veces más).

Hidróxido de Sodio (NaOH): también conocido como soda cáustica, A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo.

Puzolanas: son materiales silíceos o aluminosos que por sí mismos poseen poca o ninguna actividad hidráulica, pero que finamente divididos y en presencia de agua pueden reaccionar con Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2) a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes (ASTM 618-78).

Silicato de Sodio (Na_2SiO_3): Es una sustancia inorgánica, que se encuentra en soluciones acuosas y también en forma sólida en muchos compuestos, entre ellos el cemento. Los silicatos de sodio también conocidos como vidrios solubles, son sustancias compuestas primordialmente por óxido de silicio (SiO_2) y óxido de sodio (Na_2O). El silicato de sodio es estable en soluciones neutras y alcalinas; en soluciones ácidas, los iones de silicato reaccionan con los iones de hidrógeno para formar ácido silícico, el cual al calentarlo forma gel de sílice, el cual es una sustancia dura, vidriosa.

1. INTRODUCCIÓN

El hombre desde sus inicios siempre ha buscado resguardo ya sea para protegerse de sus enemigos, de depredadores o de condiciones climatológicas adversas, hasta satisfacer sus necesidades básicas y de confort. Es por ello que a través de la historia se evidencia el desarrollo que la humanidad ha logrado mediante diferentes técnicas y materiales que con el pasar del tiempo el empleo de estos conocimientos se extienden a diversas áreas, en busca de obtener cada vez más mayores beneficios que suplan la funcionalidad de los elementos de su entorno.

El cemento es uno de los materiales que el hombre ha descubierto en pro de responder a tales condiciones, algunas sociedades en donde se resaltan estos logros son por ejemplo el pueblo egipcio en donde emplearon morteros de yeso y de cal en sus construcciones monumentales; otra muestra se ve en los griegos quienes usaron piedras unidas por arcilla para construir muros; pero, realmente el hormigón confeccionado con un mínimo de técnica aparece en unas bóvedas construidas cien años antes de Cristo, posteriormente los romanos dieron un paso importante al descubrir un cemento fabricado a partir de la mezcla de cenizas volcánicas con cal viva, conocido como Pozzuoli "cemento de puzolana".

De todos los conglomerantes hidráulicos el cemento portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza, su precio es relativamente bajo en comparación con otros materiales y tiene unas propiedades muy adecuadas para los propósitos que debe alcanzar

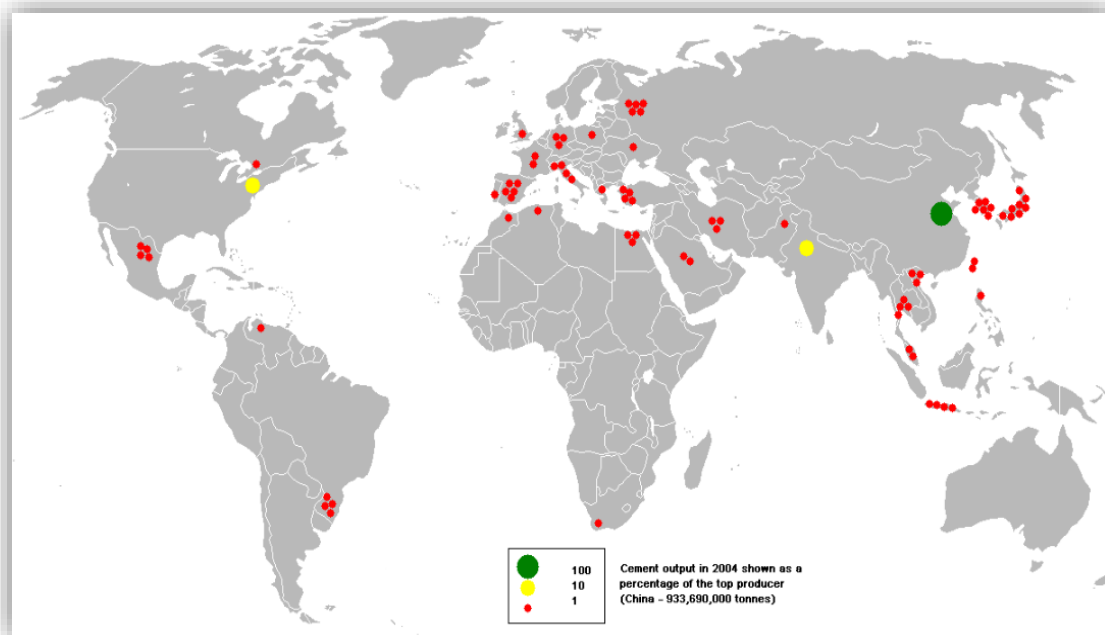
Los cementos se emplean para producir morteros y hormigones cuando se mezclan con agua y áridos, naturales o artificiales, obteniéndose elementos constructivos prefabricados o contruidos "in situ". Pero en la actualidad la humanidad ha percatado que no toda la producción de cemento conlleva beneficios para el mundo; pues la producción del cemento se deriva de la calcinación de la piedra caliza, la cual conlleva a la emisión de uno de los gases que contribuyen al efecto invernadero, el dióxido de carbono (CO₂). Es por ello que se busca reemplazar y/o minimizar el empleo de este material, realizando nuevas investigaciones en donde se utilicen otros materiales que con ayuda de los avances tecnológicos y científicos, se creen cementos amigables con el medio ambiente; y es aquí en donde nos enfocamos a la creación de cementos con geopolímeros.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La industria del cemento necesita grandes cantidades de energía en todas sus formas, siendo éste el coste principal de su fabricación. Para mejorar las propiedades de las materias primas, se utilizan hornos a altas temperaturas para que reaccionen químicamente, donde se pueden consumir combustibles sólidos como lignitos, hullas, turbas o carbones, líquidos como el combustible y gaseosos como el gas natural, entre otros, que contaminan el medio ambiente con gases de efecto invernadero y posteriormente con la acidificación de las fuentes de agua.

En el sector de la construcción el cemento es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo y su producción es responsable de la emisión del 7% aproximadamente de dióxido de carbono. Por cada 1.000 kilogramos de cemento producido, se emiten 900 kilos de CO₂.¹ Es decir que tiene una relación aproximada de 1:1000 referente a la cantidad de producción del material y la generación de dicho gas. A continuación se muestran los países con mayores índices de producción de CO₂ debido a la producción de cemento.

Ilustración 1 Producción de Cemento en el Mundo.



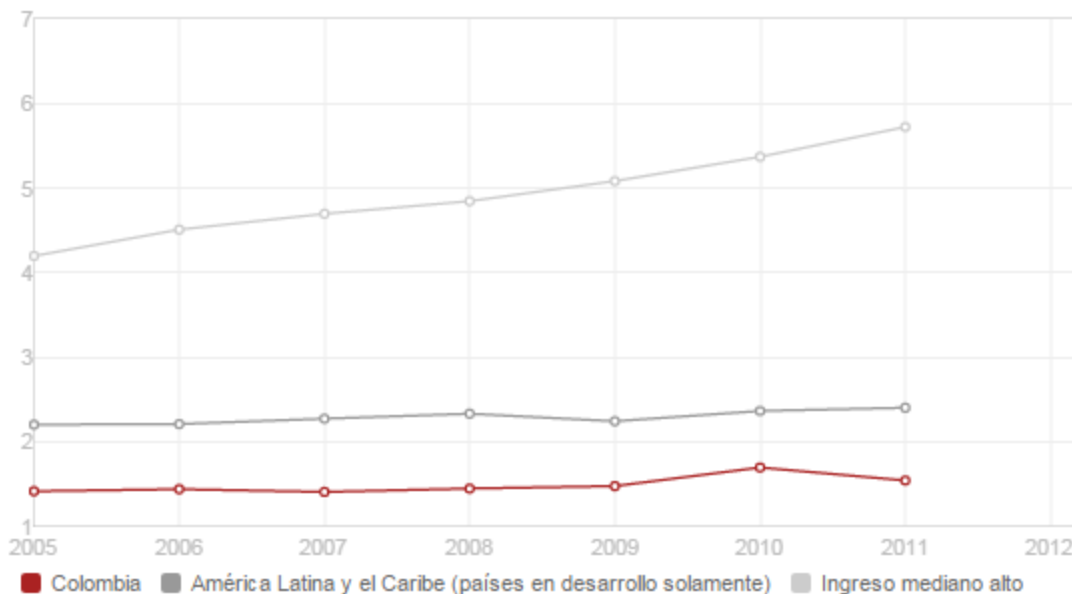
Fuente: Fair Companies, Cultura sustentable²

¹ REVISTA CIENCIA Y DESARROLLO, Geopolímeros para un desarrollo sustentable, Febrero de 2001. En línea: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/249/articulos/articulos-en-linea.html> Consultado el 1 de mayo de 2015.

² BULLOSA, Nicolás, Fair Companies, Sobre el impacto cotidiano de la extracción y uso de cemento, 2010. En línea: <http://www.faircompanies.com/blogs/view/sobre-el-impacto-cotidiano-la-extraccion-y-uso-cemento/> Consultado el 1 de mayo de 2015.

China encabeza la lista como el mayor productor de CO₂ con un aporte mayor al 45%, seguido de India con un 6.35% y Estados Unidos con un 4.4%, evidentemente se observa que Europa es el continente con mayores índices de emisión de este gas y aunque Colombia no se evidencia en la estadística mundial, su emisión de CO₂ para el año 2011 estaba alrededor de 1.5 Toneladas , según el Banco mundial BEARF.

Ilustración 2 Emisiones de CO2 (toneladas métricas per cápita)



Fuente: El Banco Mundial BIRF-AIF³

En Colombia el sector de la construcción en los últimos años según el informe de CAMACOL 2010, ha sido una industria clave para el desarrollo económico del país, gracias a su dinamismo se constituye como uno de los sectores más importantes y de mayor incidencia en el avance industrial.

El DANE realizó una estadística de la producción de Cemento Gris en lo corrido del año 2015 hasta octubre, mostrando que los despachos al mercado nacional aumentaron 6,9 % al acumular 10.632,3 mil toneladas; mientras que la producción alcanzó las 10.838,6 mil toneladas, lo que representó un incremento de 6,4 % con relación al mismo período del año anterior.

³ BANCO MUNDIAL BIRF-AIF, Emisiones de CO₂, 2011. En línea: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC/countries/CO-XJ-XT?display=graph> Consultado el 1 de mayo de 2015.

Según el DANE los principales despachos fueron a destinos como: Antioquia con 10,0%, Bogotá y municipios aledaños 6, 3%, Cesar 28,2%, Bolívar 12,6%, Nariño 36,7% y otros departamentos 22,7% sumaron 5,4 puntos porcentuales a la variación total. En contraste se encontraron los departamentos de Santander con -7,0 %, Cundinamarca con -1,1 %, Casanare con -5,0 % y Caldas con -2,4 % restaron en conjunto 0,8 puntos porcentuales a dicha variación⁴.

Es así como surge la necesidad de investigar sobre materiales que puedan innovar el sector de la construcción y la industria del cemento al suplir el uso del cemento convencional, disminuir la huella de contaminación ambiental y mejorar la calidad de vida del hombre y la sostenibilidad de su entorno. Por tanto, este proyecto busca conocer el comportamiento de un geopolímero sintetizado a partir de la arcilla para ser implementado como agente cementante.

1.1 PREGUNTA

¿Cuál es la variación de la resistencia a la compresión de un mortero geopolímero sintetizado con arcilla en comparación con un mortero elaborado con cemento portland?

⁴ DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE), Construcción - Estadísticas De Cemento GRIS-ECG, 2015. En línea: <http://www.dane.gov.co/index.php/construccion-alias/estadisticas-de-cemento-gris-ecg>
Consultado el 28 de Noviembre de 2015

2. ANTECEDENTES

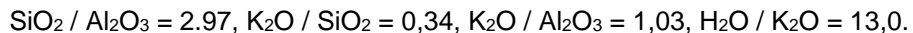
Desde 1978 el investigador francés Joseph Davidovits, ha desarrollado minerales tridimensionales de aluminosilicatos, a los cuales denominó geopolímeros. La geopolimerización implica una reacción química entre varios óxidos de aluminio-silicatos con silicatos en condiciones altamente alcalinas.

La producción de geopolímeros emite cantidades de CO₂ en un 80% menos que la del cemento común. Este material posee una gran resistencia térmica, química, y cuenta con buenas propiedades mecánicas. Davidovits en la década del 80, habría formulado la hipótesis de que las pirámides egipcias habrían sido construidas con una clase de geopolímeros formados por piedra caliza, esto se desprende de un análisis realizado mediante rayos X y de un estudio microscópico de las muestras⁵.

A partir de las investigaciones de éste químico se empezaron a desarrollar diversos estudios de otros minerales alternativos que cumplieran la función de conglomerante orgánico e inorgánico sintetizado, para suprimir parte de la cal como materia principal en la conformación del cemento estándar.

Aunque aún faltan más investigaciones respecto al tema, en América ya se han llevado a cabo algunos trabajos de los cuales a continuación se relaciona una breve descripción de dos trabajos, uno desarrollado con metacaolín y otro con cenizas volantes.

El primero es un estudio realizado en la universidad de Querétaro⁶, México, donde se describe la síntesis y caracterización de un concreto basado en geopolímero con Metacaolín. Estas pruebas de laboratorio se formularon con las siguientes relaciones molares de óxidos:



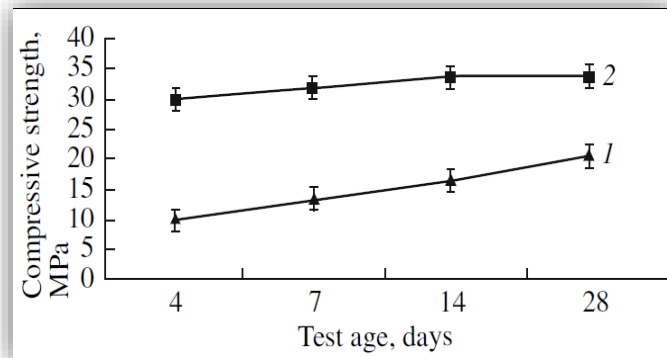
En la siguiente gráfica se muestran los valores más altos de compresión para la resistencia del concreto basado en geopolímero con metacaolín (2), comparado con una mezcla de concreto convencional (1), obteniendo un valor de resistencia mecánica de 35MPa, estos resultados dependen de las propiedades mecánicas y térmicas, que obedecen en gran parte a la naturaleza de los materiales aglutinantes además de otros factores tales como el contenido de agua, el tipo de agregado o la densidad.

⁵ COMUNICA Y CONSTRUYE. Las pirámides de Egipto...geopolímeros? Enero de 2010. En línea:

<https://reformasyobras.wordpress.com/2010/01/10/las-piramides-de-egipto-geopolimeros> Consultado el 1 de mayo de 2015.

⁶ TCHAKOUTE H.K., ELIMBI A., YANNE E., C.N. Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature. Djangang Laboratoire de Physico chimie des Matériaux Minéraux, Université Yaoundé1, Faculté des Sciences, B.P. 812 Yaoundé, Cameroon. Consultado el 1 de mayo de 2015.

Ilustración 3 Resistencia a la compresión de un concreto geopolímero basado en Metacaolín y un concreto basado en cemento.



Fuente: Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature⁶.

El segundo trabajo fue realizado para una investigación de tesis de la universidad Javeriana de Bogotá, realizada por Robayo⁷, quien mostró los siguientes resultados del comportamiento mecánico de los morteros a base de cenizas volantes activadas alcalinamente:

- La resistencia a compresión fue de 25.025 MPa a 28 días. Cumpliendo con los parámetros establecidos en la NTC 121.
- El comportamiento a flexión alcanzó resistencias de hasta 6.28 MPa, lo cual está dentro del rango de la NTC 120.
- En cuanto a la temperatura manejada a 700°C para la pasta con ceniza volante activada con NaOH mejoró en un 59 y 40% el desempeño mostrado por las pastas de cemento Tipo I y Tipo III respectivamente.
- Finalmente, al ataque de ácido sus resistencias a compresión disminuyeron un 3.6% lo cual indica que de todas formas, se encuentra por encima de la resistencia mínima requerida por la NTC 121 para 28 días.

Como estos dos casos se encuentran otros ejemplos de éxito en cuanto a la utilización de distintos tipos de geopolímeros en el concreto, por lo general el cemento tiene una mayor vida útil, alcanzando los niveles óptimos de resistencia a la compresión con mayor celeridad que el cemento portland, presentando una excelente manejabilidad, e ideal para diseños de arquitectura sostenible.

⁷ ROBAYO NÚÑEZ, Estefanía. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas alcalinamente, Universidad Javeriana de Bogotá, 2013. En línea: <http://repository.javeriana.edu.co/bitstream/10554/11159/1/RobayoNunezEstefania2013.pdf> Consultado el 1 de mayo de 2015.

3. JUSTIFICACIÓN

La producción de cemento en el sector de la construcción es responsable de la emisión del 7% aproximadamente de CO₂. En Colombia según el DANE las estadísticas sobre el cemento gris mostraron que la producción de los diez primeros meses del año en curso alcanzó las 10.838,6 mil toneladas, lo que significó un incremento de 6.4% con relación al año precedente.

Es evidente que la producción de cemento en el país está creciendo y por ende la contaminación al medio ambiente generada del proceso de elaboración del mismo; es por ello, que en esta investigación pretende indagar sobre los valores de la resistencia a la compresión de una arcilla procedente del sur de Bogotá D.C., como un material cementante alternativo al cemento gris Portland, pues este es un material que contiene altos porcentajes de silicio y aluminio (Elementos fundamentales para la Geopolimerización) y se encuentra fácilmente en diversas locaciones de Colombia.

Los geopolímeros obtenidos a partir de la activación alcalina de un aluminosilicato pueden resultar ventajosos como agente cementantes alternativos, al aprovechar los recursos naturales que tienen una baja contaminación en su proceso de sintetización, la tecnología de los geopolímeros está generando cada vez más, un mayor interés a nivel internacional, sobre todo en el campo de la ingeniería, ya que no solo contribuye a la disminución de dióxido de carbono, sino que también ofrece una alternativa económicamente variable del cemento Portland con excelentes propiedades químicas y físicas, tales como resistencia al fuego y a los ácidos⁸

El fin de este proyecto es conocer las características físicas y químicas del mortero elaborado con cementos generados con geopolímeros sintetizados a partir de la arcilla y sus posibles usos para las nuevas obras de ingeniería, en donde la tecnología y los avances demandan el uso de nuevas materias primas ecológicas que aportan en la sustentabilidad del medio ambiente.

⁸ VAN DEVENTER. Advanced Materials for Construction of Bridges, Buildings, and Other Structures III, et al 2003, En línea: http://dc.engconfintl.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1008&context=advanced_materials. Consultado el 1 de mayo de 2015.

4. OBJETIVOS

4.1 GENERAL

Evaluar la resistencia a la compresión de un cemento elaborado con geopolímeros sintetizados a partir de arcilla.

4.2 ESPECÍFICOS

- Sintetizar por activación alcalina un geopolímero a partir de una arcilla natural.
- Caracterizar la arcilla y su efecto en la síntesis del geopolímero.
- Optimizar la relación de material cementante con su respectiva hidratación y su relación con el agregado, para obtener un mortero con características equivalentes al Cemento Portland.
- Establecer la resistencia a la compresión de geopolímeros sintetizados a diferentes temperaturas de curado.
- Comparar los resultados de resistencia a la compresión obtenidos con el geopolímero vs el mortero tradicional.

5. MARCO CONCEPTUAL

Esta investigación está orientada en una de las líneas de la Ingeniería Civil, relacionada con las Estructuras y la sub-línea de Materiales de Construcción; se enfoca específicamente en el aporte del conocimiento proveniente de las experiencias obtenidas mediante el desarrollo de diversos ensayos de laboratorio implícitos en el diseño de una mezcla de mortero, a partir de un nuevo material basado en un cemento inorgánico generado a partir de la sintetización química de una arcilla creando cementos geopolímeros.

Este marco lo componen tres ejes temáticos básicos correspondientes en primer lugar a la sostenibilidad ambiental, en segundo a la composición de un mortero que es el objetivo en especial de esta investigación, para posteriormente según los resultados obtenidos tomar los datos como base e implementarlos en otro trabajo de investigación para desarrollar un diseño de mezcla para un concreto y el tercer eje fundamental es tener como base algunas investigaciones desarrolladas sobre geopolímeros.

5.1 SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Para entender mejor el concepto de sostenibilidad, se debe definir primero el término, el cual, según la Organización de las Naciones Unidas - ONU, el desarrollo sostenible puede ser definido como "un desarrollo que satisfaga las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades"⁹Esta definición fue empleada por primera vez en 1987 en la Comisión Mundial del Medio Ambiente de la ONU, creada en 1983.

Según el Banco Mundial de Washington D.C. de 2008, define la sostenibilidad como la garantía de que la productividad global del capital físico y humano acumulado gracias a las iniciativas del desarrollo, compensará con creces la pérdida o degradación indirecta del medio ambiente. Para efectos de esta investigación la sostenibilidad ambiental consiste en el sistema que tenga la capacidad de auto-sostenerse con el transcurso del tiempo, sin comprometer la satisfacción de las necesidades futuras de las siguientes generaciones, manteniendo un equilibrio entre todas las especies y los recursos de su entorno.

⁹ CENTRO DE INFORMACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. En línea: <http://www.cinu.mx/temas/medio-ambiente/> Consultado el 1 de mayo de 2015.

5.2 MATERIALES PARA LA ELABORACIÓN DEL CONCRETO.

Si bien la elaboración de un concreto no es el objetivo primordial de este proyecto, es importante reconocer su composición y todos los factores que lo afectan para comprender la función del mortero dentro del mismo. Es por ello que es importante describir los elementos utilizados como base en un concreto convencional, para poder hacer una correspondencia a la composición de un geopolímero sintetizado con arcilla, por lo cual es fundamental reconocer que:

“El concreto, uno de los principales materiales de construcción en todo el mundo, es particularmente contaminante. Para producirlo se necesita mezclar piedra caliza y arcilla a temperaturas que rondan los 1.500 °C. El consumo de combustibles, y por supuesto de energía, es enorme: se requieren alrededor de 100 kg de carbón para producir sólo una tonelada de concreto.¹⁰”

La palabra concreto viene del latín “concretus” que significa compuesto. Es una piedra artificial elaborada por el hombre que a diferencia de las rocas naturales se diseña para resistir altos esfuerzos de compresión, bajo esfuerzos de tracción y flexión. Los componentes del concreto son:

- El cemento que es el agente aglutinante, contiene piedra caliza triturada y otros elementos de mezcla.
- La arena en combinación con otros agregados que adicionan volumen y fortaleza.
- El agua que activa el cemento, para luego evaporarse permitiendo que el concreto se solidifique.

Para efectos de esta investigación el mortero consiste en una mezcla de agregados pétreos unidos con una pasta de cemento y agua; que al variar las dosificaciones de cada uno de los anteriores o agregar otros elementos se obtienen diversos tipos de concreto para diferentes usos en la construcción. Es aquí en donde se remplazará el cemento por arcilla, el agua por un reactante álcali-sílice y en vez de realizar un concreto convencional se realizará un geopolímero, con una cantidad de arena muy similar a los morteros convencionales.

¹⁰ SOY ECOLOMBIANO, Fascículo Vivienda Y Construcción Sostenible, En línea: http://www.soyecolombiano.com/site/Portals/0/documents/biblioteca/A_PUBLICACIONES/I_FASCICULOS_COLECCIONABLES_EL_ESPECTADOR/Fasciculo_9_Soy%20Ecolombiano_FINAL_BAJA_65-72.pdf, (pág. 66). Consultado el 1 de mayo de 2015.

5.2.1 Cemento

Es el material de mayor importancia en una mezcla de concreto, pues es el elemento que proporciona resistencia. Argos describe el cemento como un polvo fino que se obtiene al poner en temperaturas muy altas una mezcla de piedra caliza, arcilla y otras sustancias; es un material que reacciona con el agua y presenta propiedades de adherencia y cohesión.¹¹ Holcim empresa suiza de cementos, define este material como el ingrediente principal del concreto que le da su adhesión, siendo un polvo resultado de un proceso de transformación de calizas y arcillas sometidas a altas temperaturas.

El cemento tiene propiedades cohesivas y adhesivas, que le dan capacidad de aglutinar los agregados o áridos; propiedades que dependen de su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar¹². El tipo más usado es el cemento Portland, llamado así por su semejanza con una piedra de la isla de Portland en Gran Bretaña. Es un material estandarizado a nivel mundial el cual varía sus características según sus requerimientos de uso, contiene del 15 al 25% de hidróxido de calcio y 50% de silicato de calcio, este último del cual recibe sus principales características como la resistencia¹³.

Tabla 1 Composición química y de los compuestos de los cemento

TIPOS DE CEMENTO PORTLAND						
		TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V
Composición Química %	SiO₂	18.7-22	20-23.2	18.6-22.2	21.5-22.8	20.3-23.4
	Al₂O₃	4.7-6.3	3.5-5.5	2.8-6.3	3.5-5.3	2.4-5.5
	Fe₂O₃	1.-4.4	2.4-4.8	1.3-4.9	3.7-5.9	3.2-6.1
	CaO	60.6-66.3	60.2-65.9	60.6-65.9	62-63.4	61.8-66.3
	MgO	0.7-4.2	0.6-4.8	0.6-4.6	1-3.8	0.6-4.6
	SO₃	1.8-4.6	2.1-4	2.5-4.6	1.7-2.5	1.8-3.6
Composición Compuestos %	C₃S	45-55	40-50	50-65	37-49	40-50
		40-63	37-68	46-71		43-70
	C₂S	20-30	25-35	15-25	27-36	25-35
		9-31	6-32	4-27		11-31
	C₃A	8-12	5-7	8-14	3-4	0-4
		6-14	2-8	0-13		0-5
	C₄AF	6-10	6-10	6-10	11-18	10-20
		5-13	7-15	4-14		10-19

Fuente: KOSMATKA, Steven H, et al. Diseño y control de mezclas de concreto. p. 55.

¹¹ ARGOS, Cemento. En línea: <http://www.cemexcolombia.com/SolucionesConstructor/Cemento.aspx>. Consultado el 1 de mayo de 2015.

¹² SANCHEZ DE GUZMAN Diego, Tecnología del Concreto y del Mortero. Bhrandan Editores Ltda, 2001. En línea: Google libros. Consultado el 1 de mayo de 2015.

¹³ MACHUCA GIL, Eduardo. Evaluación y estudio del efecto en las propiedades físico, mecánicas y químicas derivadas de la interacción álcali-agregado con el cemento portland puzolánico norma astm c-1157, Universidad de San Carlos, Guatemala, 2013, Pág.:39. En línea: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3596_C.pdf Consultado el 1 de mayo de 2015.

A continuación se describen las principales propiedades del cemento¹⁴:

Finura: Se refiere al tamaño de los granos de cemento comprendido por lo general entre 2 y 100 micrones. Estos son más activos cuando su tamaño está comprendido entre 3 y 30 micrones. Los granos menores a 3 micrones se hidratan casi instantáneamente al entrar en contacto con el agua, mientras que los superiores a 60 micrones son prácticamente inertes, ya que su hidratación es extremadamente lenta.

Peso específico Absoluto o Densidad Real: Es la relación entre el peso del cemento y el volumen real que ocupan los granos, En los cementos Portland, el peso específico debe ser igual o superior a 3 g/ml y en los cementos con adiciones puede ser menor o mayor según la adición empleada, pero siempre será cercano a 3 g/ml (3 kg/l). La densidad aparente suelta es del orden de 1 kg/litro.

Tiempo de curado: Es el tiempo que transcurre entre el instante en que el cemento se mezcla con el agua para formar una pasta y el momento en que la pasta pierde su plasticidad. El principio de curado en los cementos de alta resistencia no puede ser inferior a 45 minutos y en los cementos corrientes debe ser a lo menos de 1 hora.

Consistencia Normal: Es la cantidad de agua expresada como porcentaje del peso del cemento, que confiere a la pasta una plasticidad determinada. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando la sonda se detiene a 6 mm del fondo.

Resistencias Mecánicas: Los cementos deben ser capaces de conferir resistencias iguales o superiores a las indicadas por las normas, en probetas preparadas con un mortero cuyos componentes, fabricación, conservación y ensayos están normalizados. Los cementos van adquiriendo resistencia progresivamente con el tiempo. A este fenómeno se le conoce como curva de resistencia del cemento.

Calor de Hidratación: El endurecimiento de los cementos se produce por reacciones químicas entre los compuestos mineralógicos del cemento y el agua de amasado. Estas reacciones químicas transforman a los componentes anhídridos inestables en compuestos hidratados estables. Las reacciones químicas se producen con desprendimiento de calor. Según la proporción en que esté presente cada uno de los compuestos principales del clínker, será el calor resultante desprendido por el cemento, de tal forma que habrá cementos de bajo calor de hidratación, mediano calor de hidratación o de alto calor de hidratación.

¹⁴ CEMENTOS BIO BIO. Cementos, fabricación y clasificación. Chile, Pág.: 20. En línea: file:///C:/Users/Ana/Downloads/576096_CEMENTO%20FABRICAC.pdf Consultado el 1 de mayo de 2015.

Resistencia al ataque químico: Los cementos pueden ser atacados por ciertos productos químicos, entre los cuales, los de mayor interés de analizar son:

- Ataque por aguas ácidas: en general los ácidos disuelven a los cementos, con mayor o menor velocidad, según sea el ácido y su concentración.
- Ataque de sulfatos: atacan el C_3A formando sales expansivas que destruyen el hormigón.
- Ataque de aguas puras: las aguas muy puras son ávidas de sales y disuelven principalmente el hidróxido de calcio generado por el clínker durante su hidratación.
- Reacción álcalis-áridos: algunos áridos contienen sílice reactiva que se combina con el álcalis del cemento, provocando una expansión del hormigón.
- Permutación de cationes: cationes tales como el del magnesio (M^{++}) que contienen algunas aguas, se intercambian con los cationes de calcio, dando origen a una acción destructiva.
- Carbonatación: el hidróxido de calcio generado por el clínker durante su hidratación se puede transformar en carbonato de calcio ($CaCO_3$), por acción del anhídrido carbónico (CO_2) del aire.

5.2.2 Pasta

Se compone de materiales cementantes, agua y aire atrapado. La pasta constituye aproximadamente el 25% hasta el 40% del volumen total del concreto. La selección de los agregados es muy importante ya que constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto.

5.2.3 Mortero

En su forma más general está constituido por un material fino y un aglomerante, que con la adición de agua reacciona y adquiere resistencia. Se pueden clasificar en cuatro tipos:

- Morteros estructurales: tienen suficiente resistencia y pueden soportar cargas a compresión, como sucede en la mampostería estructural.
- Morteros de pega: mantienen unidos los elementos en la posición deseada, debe tener cualidades especiales, diferentes a los morteros usados para otros fines porque está sometido a las condiciones del sistema constructivo, absorbiendo esfuerzos de tensión y compresión.
- Morteros de relleno: se utilizan para llenar las celdas de los elementos en la mampostería estructural, y debe tener una adecuada resistencia.
- Morteros de recubrimiento: estos son los morteros de revestimiento y revoque, o la de proporcionar una superficie lisa y uniforme, no requieren una resistencia determinada; la plasticidad juega en ellos un papel muy importante.

Al tipo de morteros estructuras es el grado al que se quiere llegar en este proyecto.

Tabla 2 Aplicaciones del mortero.

MORTERO	USOS	OBSERVACIONES
1:1	Mortero muy rico para impermeabilizaciones. Rellenos	Son morteros de gran resistencia y deben hacerse con arena limpia.
1:2	Para impermeabilizaciones y pañetes de tanques subterráneos. Rellenos	
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos	
1:4	Pega para ladrillos en muros y baldosines. Pañetes finos	Se deben hacer con arena limpia o semilavada.
1:5	Pañetes exteriores. Pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy finos.	
1:6y 1:7	Pañetes interiores: pega para ladrillos y baldosines, pañetes y mampostería en general. Pañetes no muy fino	
1:8 y 1:9	Pegas para construcciones que se van a demoler pronto. Estabilización de taludes en cimentaciones.	Se puede usar arena sucia, pues estos morteros tienen muy poca resistencia

Fuente: Tabla de usos de los morteros de cemento, según su relación de agente cementante y arena.¹⁵

En el marco de esta propuesta las relaciones a las que se pretende llegar son de 1:1 a 1:3, dentro de las propiedades relevantes del mortero plástico se aprecia: la manejabilidad, la retención de agua, la fluidez y la velocidad de endurecimiento; mientras que en estado de endurecimiento se examina: la retracción, la adherencia, la resistencia, la durabilidad y la apariencia. Estas propiedades se evaluarían en la etapa de experimentación, presentada más adelante.

5.2.4 Agregados

Son derivados de la trituración de diferentes rocas, grava y arena; generalmente se clasifican en dos tipos: finos y gruesos. Los agregados finos son las arenas que pueden ser naturales o productos de trituración cuyas partículas tienen menos de ¼ de pulgada de tamaño; los agregados gruesos son los que tienen más de ¼ de pulgada; Para hacerlo más resistente se mezcla con acero, y se transforma en hormigón armado¹⁶.

La razón principal de los agregados es actuar como material de relleno, agregando la resistencia del grano a la compresión, además controlan los cambios volumétricos evitando el agrietamiento por retracción plástica, haciendo más económica la mezcla.

¹⁵GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia (2003) El concreto y otros materiales para la construcción. Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. ISBN 958-9322-82-4 - En línea: <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/#sthash.SgHWTelh.dpuf> Consultado el 1 de mayo de 2015.

¹⁶ GARCÍA LANDA, Carlos. "Características mecánicas de concretos reciclados fabricados con desechos sólidos de construcción". <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32861/1/garcialanda.pdf>. Consultado el 1 de mayo de 2015.

5.2.5 Agua

Los cementos hidráulicos reaccionan químicamente con el agua, de tal manera que se hidratan las partículas, obteniéndose una pasta manejable según la cantidad de agua que se agregue, Según la NTC 3459 El agua utilizada en la elaboración del concreto debe ser limpia, clara sin colores ni olores libre de sustancias como aceites, ácidos, sustancias alcalinas y materias orgánicas.

Para este caso la reacción química se desarrolla a partir de hidróxido de sodio, silicato de sodio y una mezcla entre los mismos variando tanto la molaridad de cada solución como en la relación de concentración, con las cuales se pretende desarrollar las propiedades aglutinantes en el geopolímero sintetizado con arcilla.

5.2.6 Aire

Al mezclar los componentes del concreto es normal que se quede el aire dentro de la misma, el cual es liberado cuando se vibra la pasta y es sometida a compactación, aunque en algunos casos a través de los aditivos se incluyen burbujas con fines específicos como por ejemplo para mejorar la resistencia a congelación-deshielo de concretos expuestos al agua y a los descongelantes.¹⁷

5.2.7 Aditivos

Son sustancias químicas sólidas o líquidas, que se pueden agregar a la mezcla del concreto antes o durante el mezclado, ya sea para mejorar la durabilidad del concreto, o para reducir el contenido del agua y aumentar o disminuir el tiempo de curado.¹⁸

¹⁷CHEMA. Incorporadores de aire. En línea: <http://www.chema.com.pe/productos/aditivos-para-concreto/incorporadores-de-aire.html> Consultado el 1 de mayo de 2015.

¹⁸ SIKA, Aditivos. consultado el 1 de mayo de 2015, desde http://col.sika.com/es/solutions_products/Construccion/aditivos-concreto.html

5.3 GEOPOLÍMEROS

“Los geopolímeros son polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos provenientes de la geopolimerización, que es una reacción química. Estos compuestos fueron desarrollados en la década del 50 en la Unión Soviética, conocidos como cementos de suelo.”¹⁹ Estos aluminosilicatos inorgánicos tienen el potencial de ser utilizados en diversos campos, pero su uso principal es como sustitutos del cemento portland.

La gran ventaja de estos productos es que su producción tiene bajas emisiones de dióxido de carbono, una gran resistencia química, térmica y buenas propiedades mecánicas, a temperatura ambiente o bajo temperaturas extremas. La geopolimerización ocurre en condiciones altamente alcalinas, entre una solución activadora (basada en una mezcla de hidróxido y silicato sódico) en condiciones de curado a temperaturas menores a los 200°C.

Algunas de las características de los Geopolímeros obtenidos en otras investigaciones frente a los resultados normalizados del cemento estándar, son:

- Más rápidas y mayores resistencias mecánicas.
- Menor calor de hidratación.
- Mejor impermeabilidad.
- Mejor comportamiento frente a la carbonatación.
- Mayor resistencia al hielo-deshielo.
- Mayor resistencia a altas temperaturas.
- Mayor resistencia al ataque químico.
- Mayor resistencia de la interface árido-matriz.
- Mayor protección de las armaduras metálicas.
- Resistencia bacteriológica y biocida.
- Menor costo y mayor ahorro de energía.
- Curado más rápido.
- Mayor retracción y formación de microfisuras.
- Posibilidad de que se produzca mayor reacción árido- álcali.
- Mayor formación de eflorescencias.

Este proceso requiere mínimo de dos componentes básicos, la materia prima de tipo aluminosilicato preferiblemente de naturaleza amorfa o vítrea, y un compuesto alcalino. El aluminosilicato puede ser de tipo natural como el metacaolín o subproductos industriales como la ceniza volante, la escoria siderúrgica de alto horno, lodos de aguas residuales, cenizas de bagazo de caña, entre otros.

¹⁹ Revista CONSTRUIR, Geopolímeros. Consultado el 1 de mayo de 2015, desde <http://issuu.com/ingcarloscolman/docs/construir1>, (Pág. 56).

A continuación se presentan los materiales reconocidos y recomendados, ricos en aluminio y sílice, para la sintetización química de la producción de Geopolímeros.

5.3.1 Metacaolín

El metacaolín es un material cementante suplementario, dado que es un aluminosilicato activado térmicamente, que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500°C y 600°C; a esta temperatura se produce una transformación de su estructura cristalina. Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y hormigones, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. Además, tiene como gran ventaja su color blanco que le permite aplicaciones especiales e incluso ser utilizado en la producción de cemento blanco adicionado.²⁰

5.3.2 Microsílice

El Instituto Americano del Hormigón define a la microsílíce como "la sílice no cristalina muy fina, elaborada en hornos eléctricos como subproducto de la producción del silicio o de las aleaciones elementales que contienen el silicio". Es generalmente un polvo gris, utilizado por décadas, en un principio como material fino de relleno en el hormigón sin aportar mayor beneficio en sus propiedades. En los últimos años aparece la microsílíce químicamente activada muy superior a sus antecesoras cambiando tanto propiedades físicas como químicas en el concreto²¹.

5.3.3 Escorias de Alto Horno

Las escorias siderúrgicas de alto horno son el resultado de la combinación de la ganga ácida "arcillosa" del material de hierro y de las cenizas de azufre del coque (igualmente de carácter ácido), con la cal y la magnesia (ambos compuestos básicos) de las calizas más o menos dolomíticas utilizadas como fundentes²². Estos materiales son muy utilizados como adición activa para la elaboración de distintos cementos, que tienen algunas propiedades y características mejores que los del cementos Portland, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a los sulfates y al agua de mar, así como una reducción muy apreciable a la reacción árido-álcalis.

²⁰ RESTREPO GUTIÉRREZ, Juan Camilo, RESTREPO BAENA, Oscar Jaime, & TOBÓN, Jorge Iván. (2006). efectos de la adición de metacaolín en el cemento pórtland. *DYNA*, 73(150), 131-141. En línea: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000300012&lng=en&tlng=es Consultado el 30 de Julio 2015.

²¹ PEREZ BAHAMONDE, Manuel Heraldo (2008), Universidad Austral de Chile, "Caracterización de morteros con adición de combinaciones de microsílíce y nanosílíce", <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2008/bmfcp438c/doc/bmfcp438c.pdf> Consultado el 30 de Julio 2015.

²² PUERTAS, F. (1993) Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. En línea: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/55875/1/740.pdf> (Pág. 37). Consultado el 30 de Julio 2015.

5.3.4 Cenizas De Incineración de Residuos Sólidos

Fabricar materiales de construcción a partir de cenizas es una idea que se remonta a la antigüedad. Los chinos, 4000 años A.C. y los hindúes 2.500 A.C, con cenizas de la cáscara de arroz y arcilla calcinada, fabricaban cementos hidráulicos mezclando estos residuos con cal. Los griegos y los romanos lo hacían con base en cenizas volcánicas²³.

En la actualidad llegar a reemplazar parcial o totalmente los cementos convencionales para alcanzar una disminución perceptible en el impacto ambiental, requiere que se sigan haciendo cada vez más estudios de diversos materiales que conduzcan a profundizar el conocimiento del desempeño de nuevos agentes cementantes alternativos al CP, por lo cual aún queda mucho por indagar y abarcar nuevas variables.

5.3.5 Ceniza Volante

Las cenizas volantes provienen de los residuos que se producen por el uso del carbón como fuente principal generadora de energía. Actualmente, la normativa americana ASTM C618-12 / NTC 3493 (ASTM C150, 2012) (Coal Fly ash and Rawor Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete) las clasifica en tres grupos de acuerdo a su composición química. Por lo general se utilizan como adiciones para hormigón.

En este orden de ideas si la obtención de un geopolímero con arcillas extraídas directamente de la cantería, activadas y expuestas a temperaturas menores a los 200°C, es viable según esta investigación, se abriría un nuevo ítem en cuanto a los tipos de materiales cementantes alternativos a emplear en esta rama.

5.3.6 Activadores Químicos

El tipo de activante rico en contenido de Al_2O_3 (Oxido de Aluminio) y SiO_2 (Oxido de Silicio), su molaridad y la relación en contenido de diversas combinaciones, es la clave para que la geopolimerización se pueda dar con los materiales cementantes “arcilla” para la cual la velocidad de reacción es muy importante.

Los elementos químicos alcalinos con los que se ha trabajado en investigaciones similares son el litio (Li), el sodio (Na), el potasio (K), aunque dentro de esta gama también se encuentra el rubidio (Rb), el cesio (Cs), el francio (Fr); estos elementos presentan densidades bajas, son buenos conductores de calor y electricidad; reaccionan

²³ VACCA CASTAÑO, Paola. Los ecomateriales: una alternativa económica para la construcción. En línea: <https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CB0QFiAAahUKEwjh4PCS59HHAhUDqx4KHdqMDjY&url=http%3A%2F%2Faupec.univalle.edu.co%2Finformes%2F2003%2Ffebrero%2Fecomateri a.doc&ei=BH3jVeHOF4PWetqZurAD&usg=AFQjCNFhaeFDuAS24tHAoOjJ3FFCT5XUow> Consultado el 1 de Julio de 2015.

de inmediato con el agua, el oxígeno y otras sustancias químicas; y nunca se encuentran como elementos libres (no combinados) en la naturaleza.

El silicio por su parte es un elemento relativamente inerte y resiste la acción de la mayoría de los ácidos, reacciona con los halógenos y álcalis diluidos.

Los productos obtenidos en la activación alcalina son materiales inorgánicos no combustibles, se forman a bajas temperaturas (inferiores a 200 °C), alcanzan resistencias mecánicas a corto plazo, son resistentes al fuego y a los ataques ácidos, demostrando el amplio potencial de aplicación de estos materiales en la ingeniería.²⁴

Los compuestos más utilizados como fuente complementaria de sílice en este tipo de sistemas activados alcalinamente son el grupo de los silicatos sódicos y potásicos hidratados y en cuanto al compuesto alcalino generador del pH se han trabajado con hidróxidos alcalinos fuertes como el hidróxido de sodio e hidróxido de potasio o sales como el sulfato de sodio (Na_2SO_4).¹⁸

Con base a todos los documentos e información consultada que se relaciona con los geopolímeros los elementos alcalinos más utilizados han sido el sodio y el potasio por lo cual en esta investigación se tomara el hidróxido de sodio - NaOH (soda caustica), hidróxido de potasio - KOH (potasa cáustica) y el silicato de sodio - $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si}$ (metasilicato de sodio), como base para las matrices en diferentes combinaciones, concentraciones y molaridades.

Cabe resaltar que el manejo de todos y cada uno de estos componentes químicos se debe manejar en las mejores condiciones dentro de un laboratorio de química, con la mayor seguridad y precaución posible, con el uso de elementos de protección personal y contar con la pericia de un profesional experto en el manejo de los mismos.

5.4 ARCILLA

Es un producto natural originario de la meteorización de las rocas sedimentarias, cuyas partículas generalmente tienen un tamaño inferior a 2 μ (0,002 mm), sus componentes principales son la alúmina “óxido de aluminio” (Al_2O_3) y la sílice “dióxido de silicio” (SiO_2), confiriéndoles resistencia y aumentando su temperatura de maduración.

Otros componentes en porcentajes menos relevantes son el hierro y el magnesio procedentes de los ciclos de oxidación y reducción; además del potasio y calcio. Presenta

²⁴ MEJIA, J.M. ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente. En línea: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/90128/1/Materiales%20de%20Construcci%C3%B3n%2063\(311\)%20361-375%20\(2013\).pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/90128/1/Materiales%20de%20Construcci%C3%B3n%2063(311)%20361-375%20(2013).pdf) Consultado el 1 de Julio de 2015.

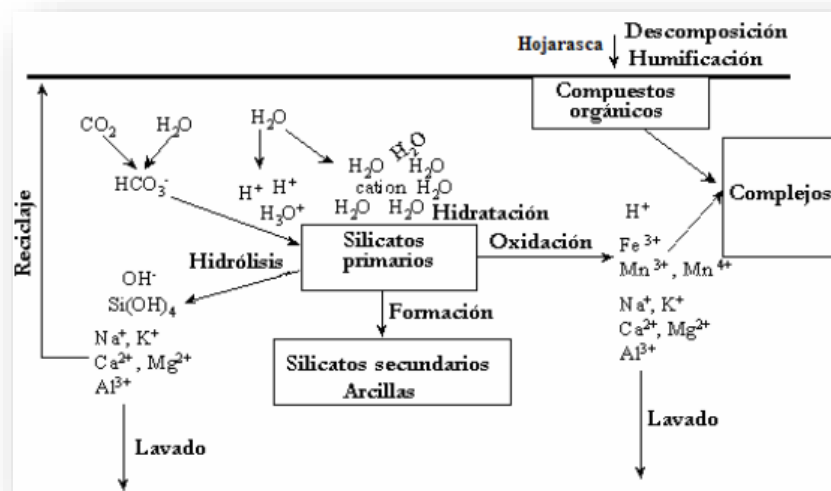
diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco cuando es pura.; Se caracteriza por adquirir plasticidad al ser mezclada con agua, y también sonoridad y dureza al calentarla por encima de 800 °C.²⁵

En la historia del hombre la arcilla ha sido uno de los materiales más empleados no solo en la artesanía, aún vemos construcciones de diversas civilizaciones como la mesopotámica, babilónicas, sumerias, asirias y persas entre otras, que hasta hoy en día se mantienen gracias a su resistencia frente a la descomposición química.

Debido a que la composición química de las arcillas es siempre variante, hasta la fecha no se tiene un conocimiento exacto de su comportamiento tanto químico, mecánico ni físico.

Su estudio se ha llevado gracias a la participación de personas como Hadding (Suecia, 1923), Rinne (Alemania, 1924) quienes hicieron los primeros análisis de difracción en Rayos X, al igual que Ross Shannon y Kerr (Estados Unidos, 1931) en donde se comprobó que la arcilla contenía minerales cristalinos y no amorfos como se clasificó desde sus inicios. Con el tiempo varios investigadores fueron clasificando los grupos minerales de la arcilla, como ejemplo la caolinita introducida por Gruner (1932) dentro del grupo Kandítico; y así sucesivamente varios investigadores han introducido conocimientos sobre las propiedades, su estructura y sus fenómenos fisicoquímicos de acuerdo a sus variables.²⁶

Ilustración 4 Procesos de meteorización química en un perfil del suelo.



Fuente: Química de los procesos pedogenéticos, Pág. 69. ²⁵

²⁵ ZAPATA HERNÁNDEZ, Raúl D. (2006). Química de los procesos pedogenéticos. En línea: <http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/Quimica%20de%20los%20procesos%20pedogeneticos.pdf> Consultado el 1 de Julio de 2015.

²⁶ BESOAIN, Eduardo (1985), Mineralogía de arcillas en suelos. En línea: Google libros (Pág. 8-13). Consultado el 1 de Julio de 2015.

En consecuencia la caracterización mineralógica de la arcilla es fundamental para los resultados obtenidos en esta investigación, para lo cual se debe realizar un estudio de XRD (Difracción por Rayos X). La arcilla trabajada en esta investigación fue extraída de las canteras del sur de la ciudad de Bogotá D.C., en la localidad de Usme, barrio Mochuelo, patrocinada por la empresa LADRILLERA TIKAL S.A.S.

Ilustración 5 Localización Arcillas Ladrillera Tikal.



Fuente: Google maps 2015 (Ladrillera Km 4.5 Vía Mochuelo Bogotá, Colombia).

5.5 DISEÑO MEZCLA DE MORTERO

Consiste en preparar una mezcla de mortero con unas proporciones iniciales a la cual se le realizan los diferentes ensayos de control de calidad como asentamiento, pérdida de manejabilidad, masa unitaria, tiempos de curado y resistencia a la compresión. Estos datos se comparan con la especificación técnica y si llega a ser diferentes o no cumplen con la expectativa de calidad, se reajustan las cantidades, se elabora nuevamente la mezcla que debe cumplir todos los ensayos de control de calidad, revisando los materiales y el diseño de la mezcla de concreto hasta obtener los requisitos exigidos por la especificación²⁷.

De las propiedades de los materiales que se van a utilizar se debe conocer:

- Granulometría.
- Módulo de finura de la arena y tamaño máximo de la grava.
- Densidad aparente de la grava, la arena y el cemento.
- Absorción del agrava y de la arena.
- Masa unitaria compacta de la grava.
- Humedad de los agregados inmediatamente antes de hacer las mezclas.

Proceso para el diseño de mezclas de concreto:

- Estudio de las especificaciones de la obra.
- Definición de la resistencia Compresión/flexión.
- Elección del asentamiento.
- Determinar TM (Tamaño Máximo) – TMN (Tamaño Máximo Nominal).
- Estimación cantidad de aire y contenido de agua.
- Definir relación agua/material cementante.
- Contenido de material cementante.
- Estimación de agregado grueso y agregado fino.
- Ajuste por humedad.
- Ajuste del diseño de mezcla.

Características físicas y mecánicas del concreto:

- Densidad, viscosidad, rigidez y fluidez
- Resistencia
- Plasticidad
- Ductilidad
- Permeabilidad
- Durabilidad

²⁷ OSORIO, Jesús (2013). Diseño de mezclas de concreto: Conceptos básicos. En línea: <http://blog.360gradosenconcreto.com/diseño-de-mezclas-de-concreto-conceptos-basicos/> Consultado el 1 de Julio de 2015.

5.6 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS

Consiste en determinar la máxima resistencia a la compresión de una muestra frente a una carga aplicada axialmente, es decir antes de que falle el material se define como la cantidad de esfuerzo necesario para deformar el mismo en un valor arbitrario. La guía que utilizaremos para medir la resistencia será con la NTC 220 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO A LA COMPRESIÓN, USANDO CUBOS DE 50 mm ó 2 PULGADAS DE LADO.

Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero; y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos²².

El tamaño de los granos de la arena juega un papel importante en la resistencia del mortero; un mortero hecho con arena fina será menos denso que un mortero hecho con arena gruesa para un mismo contenido de cemento. La finura determinada para esta investigación es pasa tamiz 200, a mayor finura del agente cementante mayor rapidez de hidratación por tanto mayor desarrollo de resistencia.

Las condiciones de curado en cuanto al tiempo y temperatura también influyen de manera drástica en la resistencia, así como la edad de fallo, el tiempo de mezclado, la compactación del material y el contenido de aire.

Por último el contenido de agua (activante) del mortero tiene gran influencia, puesto que los morteros secos dan mayor resistencia que los morteros húmedos, porque pueden ser más densamente compactados.

La resistencia a la Compresión se calcula a partir de la carga de ruptura o falla del elemento (Cubo de mortero, según la norma mencionada), dividido por el área del mismo, obteniendo valores en PSI - pound per square inch (unidades de libra fuerza por pulgada cuadrada) o en MPa (N/mm^2 , Kg/cm^2). Como referencia los valores establecidos actualmente para concretos estructurales oscilan entre 2.500 PSI (17Mpa) y 4.000 psi (28 Mpa).

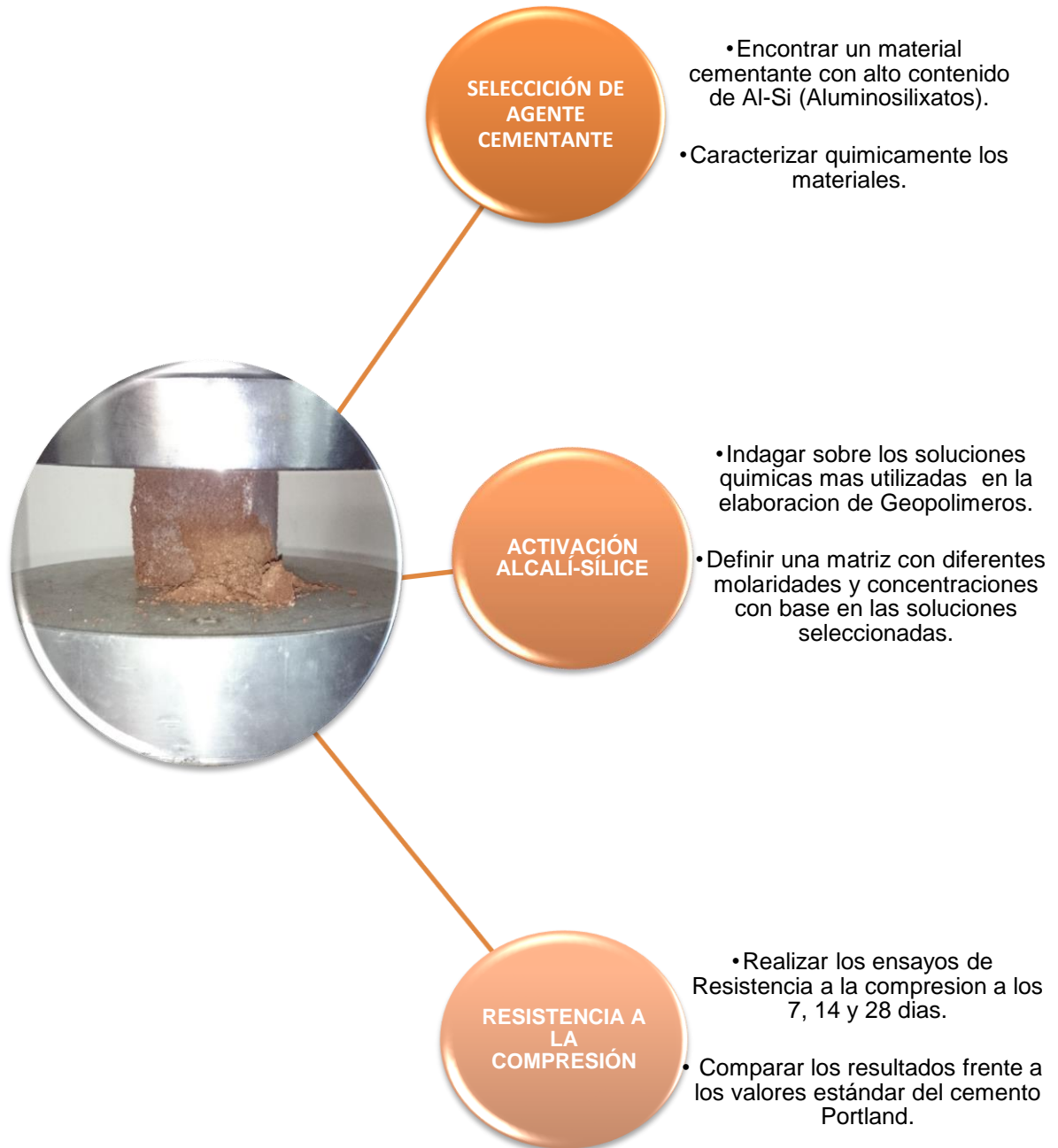
6. MARCO LEGAL

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo en cuenta la normativa vigente legal en el país, la cual se establece en las normativas técnicas que están bajo la supervisión del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), donde establecen los diferentes ensayos a los cementos y materiales necesarios para realizar los adecuados diseños de mezcla del mortero que cumplan con los parámetros sísmo resistentes que solicita la NSR-10 y la INV-E, por lo cual tenemos:

- NTC 30 Cemento Portland. Clasificación y Nomenclatura.
 - NTC 31 Cemento Definiciones.
 - NTC 111 Método para determinar fluidez de morteros de cemento Portland.
 - NTC 112 Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros.
 - NTC 121 Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.
 - NTC 174 Especificaciones de los agregados para Concreto
 - NTC 220 Determinación de la resistencia de morteros.
 - NTC 321 Cemento Portland. Especificaciones Químicas
 - I.N.V. E - 123-07 Análisis granulométrico de suelos por tamizado.
 - I.N.V. E - 128-07 Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral.
 - I.N.V. E – 218–07 Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la Máquina de los Ángeles.
 - I.N.V. E – 321–07 Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.
 - I.N.V. E – 323–07 Resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico.
 - I.N.V. E – 325 – 07 Fluidez de morteros de cemento hidráulico (mesa de flujo).
- NSR-10 Título D.

7. DISEÑO METODOLÓGICO

Esta investigación se desarrolla bajo una metodología de tipo experimental, donde por medio de ensayos se explora la concentración y dosificación óptima del activador alcalino con el agente cementante para generar geopolímeros, que sean resistentes a la compresión, en general lo que se busca con la metodología es:



METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para llegar a los resultados esperados en el Diseño Metodológico es necesario delimitar los lineamientos y procesos a experimentar en la creación de morteros geopolimerizados, obteniendo un rango comparativo que permita hacer una aproximación del mejor diseño de mezcla en cuanto a su comportamiento a la resistencia en la compresión. A continuación se muestra los parámetros tenidos en cuenta en el desarrollo experimental de la obtención de un geopolímero.



7.1 FASES DE INVESTIGACIÓN

I. Investigaciones A priori

En la primera fase de este trabajo se tiene en cuenta el desarrollo de diversas investigaciones a nivel mundial y local, con el fin de discernir sobre los patrones fundamentales a tener en cuenta en la reacción química álcali-sílice, para posteriormente realizar un paralelo con los materiales disponibles en el país, cumpliendo con las condiciones físicas que se pretenden alcanzar en cuanto a su resistencia a la compresión, explorando nuevos materiales que suplan el uso del cemento y sean amigable con el medio ambiente.

II. Selección de materiales.

Una de las primeras pruebas a realizar para dar inicio a la investigaciones la caracterización de los materiales la cual se lleva a cabo mediante el ensayo de Fluorescencia de rayos x, que se debe realizar en un laboratorio especializado en este tipo de prueba, para este caso se escogió el laboratorio de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá del departamento de Geociencias. Este ensayo permite ver la viabilidad de los materiales seleccionados en este caso de la arcilla y el agregado fino (aren de río/peña), de acuerdo a la composición de sus elementos químicos relacionados con otras investigaciones equivalentes en donde debe sobre salir la cantidad de aluminio y silicio.

La granulometría de las mismas y el peso específico de los materiales a utilizar también son clave en la información requerida; cabe destacar que entre más ensayos correspondientes a la información del material servirá como base para éste u otros estudios que se realicen con mayor profundidad.

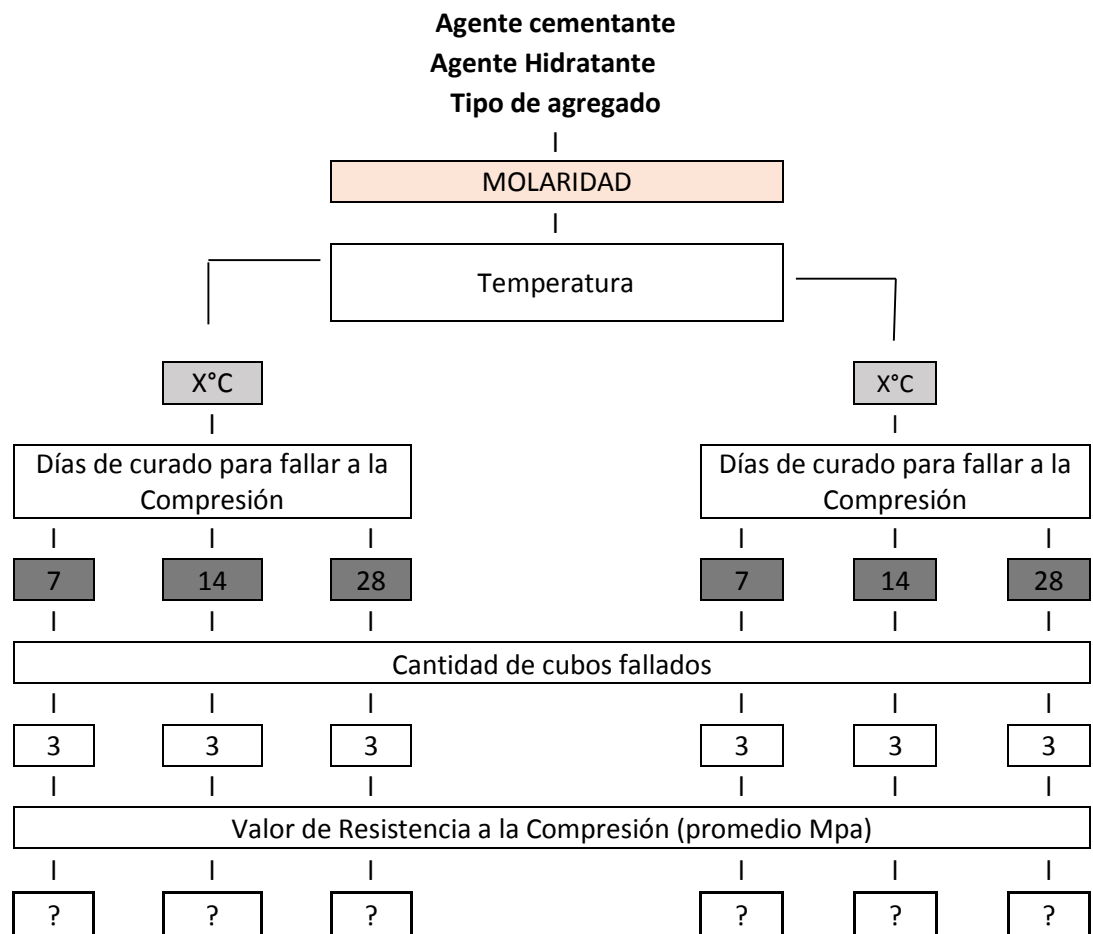
A demás en esta fase se realiza una prueba piloto experimental en donde se pondrá a prueba la activación del material cementante y activante seleccionado, en este caso la arcilla e hidróxido de sodio combinado con silicato de sodio en concentraciones de 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5 con molaridades a 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9, (para lo cual se obtuvieron efectos positivos de activación en algunas combinaciones y molaridades específicas).

III. Diseño experimental.

En esta etapa se involucran los ensayos de laboratorio para la obtención del diseño de mezcla más óptimo de un mortero geopolímero, capaz de alcanzar resistencias a la compresión similares a las de un mortero con cemento portland.

De los ensayos más relevantes a tener en cuenta para la mezcla del mortero es la relación de Agente cementante/ Agregado y Agente hidratante/Agente cementante. Una vez establecidos los elementos fijos como el agente cementante, hidratante y el tipo de agregado, se procede a establecer los elementos variables como la molaridad, con mínimo tres datos para establecer la tendencia de su comportamiento y la temperatura de curado con mínimo dos rangos para obtener un patrón que pueda mostrar las correlaciones de afectación. Un esquema general de lo acabado de mencionar es el siguiente:

Ilustración 6 Mapa conceptual de la metodología empleada para las probetas a fallar.



Fuente: Propia.

Adicionalmente para realización de este esquema se debe tener en cuenta la matriz de activantes que va cerrando la brecha entre las soluciones que mejor se comporten en combinación con el agente cementante y el agregado; el ensayo de fluidez es otro de los parámetros bases para tener en cuenta en la manejabilidad y trabajabilidad de la mezcla,

y finalmente el tiempo de curado a la exposición de temperaturas en un rango determinado, nos vislumbrará los factores implícitos en el diseño del mortero que mejores resultados proporcionen la sintetización del geopolímero en los ensayos de Resistencia a la Compresión.

IV. Análisis de resultados.

A medida que se van obteniendo los resultados de la geopolimerización y su comportamiento a la compresión, se harán ajustes necesarios para mejorar el diseño de mezcla del mortero. El objetivo final de este trabajo es analizar los valores de resistencia a la compresión máximos comparados con los del cemento portland y definir sus variables, según las opciones sugeridas en el diseño experimental. Una vez tabulados los datos de carga y deformación se procede a su interpretación y construcción de conclusiones y recomendaciones.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para los ensayos de laboratorio solo el estudio de XRF se realizó fuera de la universidad, para los demás ensayos experimentales requeridos se utilizaron en general los siguientes equipos, herramientas y materiales teniendo en cuenta la normativa vigente.

8.1 EQUIPOS y HERRAMIENTAS

Todas las fotografías a continuación son de autoría propia.

- Envases plásticos: Capacidad 1litro, para resguardar cada uno de los activantes químicos.



- Probetas plásticas: Capacidad 1litro, usadas para medir en volumen la cantidad necesaria de silicato según la mezcla de activante requerida.



- Matraz aforado: Capacidad de 1 litro, utilizado para realizar las mezclas con hidróxidos.



- Vasos de precipitación: Capacidad de 1 litro, empleados para mezclar las sustancias químicas en especial para los hidróxidos; y Varillas de vidrio: Para agitar y mezclar sustancias, facilitando la homogenización.



- Cabina extractor de gases: Usado para extraer los vapores generados por las reacciones químicas de los activantes utilizados, en especial para los hidróxidos.



- Máquina de los Ángeles: Equipo utilizado específicamente en este caso para triturar la arcilla.



- Trituradora para Molienda: Equipo implementado para pulverizar la arcilla.



- Horno industrial (Mufla): Particularmente se utilizó para curar los cubos de mortero a temperaturas de 80° y 120° C.



- Balanza Digital: Para pesar tanto el peso de los agentes cementantes, activantes y agregados, entre otros.



- Mezcladora: Usada para realizar el mortero según I.N.V. E 323.



- Mesa de Flujo: Utilizada para hallar la fluidez del material cementante (arcilla), según I.N.V. E – 325



- Tamices: en particular se utilizaron pasa 200 (para la arcilla) y No 4 (para la arena de rio)



- Moldes para cubos: inicialmente se utilizaron los correspondientes a la norma I.N.V. E – 323, luego se implementaron unos fabricados en acrílico de diseño propio, para la creación de cubos a un volumen mayor. Desmoldante: para este proyecto se usó grasa de silicona.



- Espátula, Compactador de caucho, brocha, mini pala: (respectivamente)



- Máquina de Ensayo a la compresión



Para agilidad de los trabajos también se recomienda usar elementos como pesetas, embudos, calibrador, papel film y marcador sharpie.

8.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

8.2.1 Agente Cementante

Se emplea una arcilla rojiza y otra grisácea provenientes de la misma cantera localizada en el barrio Mochuelo, en la Localidad de Usme, al sur de la capital del país (Patrocinada por Ladrillera Tikal Ltda).

Ilustración 7 Arcilla natural sin procesar.



Fuente: Propia. Roca Roja (XRF-4657 M-1) y Roca Gris (XRF-4657a M-2).

8.2.1.1 Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arcillas

Este ensayo se realizó en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por el departamento de Geociencia, para obtener la caracterización de las arcillas, es decir corroborar los porcentajes de la composición química dentro de las muestras (roja y grisácea), para establecer los patrones de relación y diferencia entre ellas. El laboratorio las codificó como: XRF-4657 M-1 Roca Roja y XRF-4657a M-2 Roca Gris

Los fragmentos de roca fueron reducidos con un molino de bolas de ágata, para después ser pasadas por un tamiz malla 100 μ . Las muestras en polvo fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas, posteriormente mezcladas con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra: Cera de 10:1, homogenizadas por agitación, llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando dos pastillas prensadas de 37mm de diámetro que fueron medidas en la aplicación SEMIQ-2007.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software IQ, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos. Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW – 2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos. Los resultados obtenidos en forma de compuestos y de elementos, se transcriben a continuación.

Tabla 3 Caracterización Química de Arcillas

Elemento y/o compuesto	XRF-4657 M-1 Roca Roja -Muñoz- (% en peso)	XRF-4657a M-2 Roca gris -Muñoz- (% en peso)
SiO ₂	63,700	66,359
Al ₂ O ₃	18,050	19,096
Fe ₂ O ₃	7,599	4,702
K ₂ O	1,526	1,439
MgO	1,155	0,684
TiO ₂	0,839	0,880
CaO	0,401	0,261
Na ₂ O	0,190	0,160
P ₂ O ₅	0,156	0,071
MnO	0,053	0,017
Ba	0,041	0,045
S	0,024	0,021
V	0,024	0,025
Zr	0,018	0,017
Zn	0,016	0,008
Ce	0,015	0,022
Cr	0,011	0,011
Rb	0,010	0,012
Sr	0,010	0,010
Cu	0,006	0,006
Y	0,004	0,003

Fuente: Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Laboratorio Interfacultades de Fluorescencia de Rayos X, Informe No. Xrf-151-15.

Con base en los resultados presentados, se concluye que no hay diferencia significativa entre los porcentajes de los elementos químicos encontrados entre las dos arcillas, tan solo el contenido de Óxido de hierro tiene una mayor variable en el porcentaje, por la cual se evidencia que es el elemento causante de las diferencias de color, por lo cual se decide emplear la arcilla rojiza como material principal en esta investigación; el primer paso consiste en realizar un ensayo piloto para comprobar si este material cementante se activa con una matriz básica de molaridades de 2, 5 y 9 de Hidróxido de Sodio y Potasio por separado, Silicato de Sodio y una combinación de Hidróxido de Sodio con el Silicato.

8.2.1.2 Preparación del Material

Uno de los factores de éxito para la activación del cemento refiere al tamaño del agente cementante, por tanto entre menor sea la partícula mejores resultados se han obtenido, el procedimiento después de extraer el material de la cantera es llevar el mismo a los hornos a una temperatura de 100°C para extraer la humedad ambiente, al cabo de 24 horas de secado se procede con la molienda del material; para este procedimiento se utilizó la Máquina de los Ángeles a 2000 vueltas, con 15 esferas metálicas normalizadas según la I.N.V. E 218 para obtener un material pasa tamiz 200.

Ilustración 8 Molienda de Arcilla Maquina de los Ángeles.



Fuente: Propia. Molienda y tamizaje de la Arcilla.

Con el paso del tiempo se determinó con la práctica que tanto para la moliendo de la arcilla como el tamizaje se podía optimizar el tiempo y trabajo, empleando una máquina trituradora y un equipo tamizador.

Ilustración 9 Molienda de Arcilla Equipo Triturador



Fuente: Propia. Molienda y tamizaje de la Arcilla.

Con el empleo de estos últimos dos equipos fueron más eficientes los tiempo de preparación de la arcilla en un 100% aproximadamente, ya que se requería de alrededor de 4 horas para obtener 2000g de material pasa tamiz 200, haciendo el uso de estos recursos se redujo el tiempo a casi 2 horas de trabajo.

Ilustración 10 Arcilla natural, sin humedad y pasa tamiz 200.



Fuente: Propia.

8.2.2 Agregado

Para el agregado del mortero se utilizaron dos tipos de arena el primero de peña y el segundo tipo de río, con el fin de establecer el mejor comportamiento de las mezclas.

8.2.2.1 Arena de peña

Se utilizó una arena Silícea de peña extraída de Boyacá No 30.



8.2.2.1.1 Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arena de Peña

Tabla 4 Caracterización Química de la Arena Silíce.

Nombre	Compuesto / Elemento	Composición (%)
Silice	SiO ₂	99.07
Titanio	TiO ₂	0.09
Aluminio	Al ₂ O ₃	0.51
Hierro	Fe ₂ O ₃	0.60
Manganeso	Mn ₃ O ₄	ND
Magnesio	MgO	ND
Calcio	CaO	ND
Sodio	Na ₂ O	ND
Potasio	K ₂ O	0.03
Fósforo	P ₂ O ₅	0.01
Azufre	SO ₃	ND
Vanadio	V ₂ O ₅	ND
Cromo	Cr ₂ O ₃	ND
Estroncio	SrO	ND
Zirconio	ZrO ₂	ND
Bario	BaO	ND
Níquel	NiO	ND
Cobre	CuO	ND
Zinc	ZnO	ND
Plomo	PbO	ND
Hafnio	HfO ₂	ND
Pérdidas	LOI	0.45

Fuente: Proveedor ARENA SILICEA & ARQS S.A.S

8.2.2.1.2 Análisis Granulométrico área de peña

Tabla 5 Granulometría de Arena Silíce

ASIO8827:

Alpha1
Servicios Analíticos

CODIGO CLIENTE		CE 13-12			
MUESTRA		Arena No. 30			
PESO INICIAL (g)		455			
TEMPERATURA (°C)		18			
HUMEDAD (%)		70			
TAMAÑO		RETENIDO		ACUMULADO (%)	
MALLA	µm	g	%	RETENIDO	PASANTE
Malla 8	2.360	0,2133	0,05	0,0	100,0
Malla 16	1.180	20,3987	4,48	4,5	95,5
Malla 30	600	415,2	91,25	95,8	4,2
Malla 40	400	15,2	3,34	99,1	0,9
Malla 100	150	2,867	0,63	99,8	0,2
Malla 200	75	0,2187	0,05	99,8	0,2
FONDO	-	0,6924	0,15	100,0	0,0
PÉRDIDA	-	0,233	0,05	100,0	0,0
TOTAL		455,0	100		

Fuente: Proveedor ARENA SILICEA & ARQS S.A.S

8.2.2.2 Agregado Arena de río.

En esta investigación dados los diferentes resultados preliminares que se iban obteniendo con el tiempo, se determinó el trabajo no solo con una arena de peña, la cual esta mayormente compuesta de sílice (componente fundamental para la formación del geopolímero) como se mostró en el ítem anterior, sino también se quiso cerrar la brecha con otro tipo de arena para encontrar el punto óptimo del diseño de mezcla del mortero, por lo cual se hicieron los mismos morteros con las mismas relación de agente cementante y agente activante, manteniendo las mismas características de molaridad, concentración química y temperatura de curado; pero con una arena de río popular en Colombia.



La caracterización de esta arena de río la realizó en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, por el departamento de Geociencia, con el fin de conocer los patrones de relación y discrepancia entre el tipo de agregado aplicado para la conformación del geopolímero.

8.2.2.2.1 Ensayo Fluorescencia de rayos X en Arena de río

Tabla 6 Caracterización de Arena de Río

Elemento y/o compuesto	XRF-4713 M-1 Arena de Río -Muñoz- (% en peso)
SiO ₂	63,947
Al ₂ O ₃	13,939
CaCO ₃	8,106
Fe ₂ O ₃	5,558
Na ₂ O	2,772
K ₂ O	2,379
MgO	1,951
TiO ₂	0,724
P ₂ O ₅	0,218
Ba	0,098
MnO	0,096
Sr	0,070
S	0,054
Cr	0,023
Ce	0,019
V	0,015
Zr	0,014
Zn	0,007
Rb	0,007
Y	0,003

Fuente: Universidad Nacional De Colombia Sede Bogotá. Laboratorio Interfacultades De Fluorescencia De Rayos X, Informe No. Xrf-184-15.

8.2.2.2.2 Análisis Granulométrico área de río

Tabla 7 Granulometría arena de río

Tamaño Partículas		Peso Retenido		% Acumulado	
Malla	µm	g	%	Retenido	Pasante
4	4.7	0	0,00	0,00	100,00
8	2,36	57,83	11,57	11,57	88,43
10	1,7	21,21	4,24	15,81	84,19
20	0.85	132,91	26,58	42,39	57,61
30	600	72,12	14,42	56,81	43,19
40	400	70,75	14,15	70,96	29,04
60	0.25	80,46	16,09	87,06	12,94
100	150	32,36	6,47	93,53	6,47
200	75	16,14	3,23	96,76	3,24
Fondo		16,22	3,24	100,00	0,00
Total		500			

Fuente: Propia

8.2.3 Agente Activador:

Con base en las investigaciones indagadas sobre la activación de geopolímeros, se evidencio la aplicación en general de algunos activantes utilizados con mayor frecuencia por lo cual se estableció trabajar con las siguientes sustancias químicas:

- Silicato de sodio (Na_2SiO_3)
- Hidróxido de Sodio (NaOH).
- Hidróxido de Potasio (KOH).

8.2.3.1 Soluciones Activantes.

La concentración molar o molaridad representada por la letra M, se define como la de soluto por unidad de volumen de disolución, o por unidad de volumen disponible de las especies.

Para comenzar con los ensayos de laboratorio se definieron las soluciones activantes a base de hidróxido de potasio e hidróxido de sodio para ratificar cuál de ellas reaccionaba mejor, es por ello que este último se combinó con Silicato de Sodio y finalmente se empleó solo Silicato de Sodio, aplicando los mencionados directamente al agente cementante en una relación de 0.48 como se indica en la I.N.V. E 323 para generar la geopolimerización, para este caso los reactivos fueron analíticos y se obtuvo la siguiente matriz a explorar:

Tabla 8 Matriz de Soluciones Activantes

Para 1 Litro de:		1 M	2 M	3 M	4 M	5 M	6 M	7 M	8 M	9 M	10 M
Hidróxido de Sodio		40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
Concentración de solución Na_2SiO_3 / NaOH	0,5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	1	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400
	1,5	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
	2	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
	2,5	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Silicato de Sodio		122,1	244,12	366,18	488,24	610,3	732,36	854,42	976,48	1098,54	1220,6

Fuente: Propia.

Omitiendo la relación de 1 Molaridad que sólo se tiene de referencia, en resumen se obtuvieron 63 litros de diferentes soluciones activantes, cada uno con diferente molaridad desde 2M hasta 10M y para la solución de Hidróxido de Sodio con Silicato de Sodio se manejaron concentraciones de 0.5 a 2.5 como se indica en la tabla anterior.

Ilustración 11 Soluciones Químicas.



Fuente: Propia.

El rendimiento de un litro de cada una de las soluciones seleccionadas finalmente es en promedio para 24 cubos, pues no depende del volumen sino del peso del activante, es decir entre mayor molaridad mayor peso y menor cantidad en milímetros del químico y viceversa entre menor molaridad empleada menor densidad, menor peso pero mayor volumen requerido.

8.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

8.3.1 Ensayo de Activación Piloto.

Después de realizar todas las soluciones químicas (63) según la Matriz de Soluciones Activantes, se procedió a colocar una cantidad de hidratante a la arcilla en una relación de 0.48, tomando como guía la norma actual aplicada a un mortero estándar. En este caso 50g de arcilla con 23g de solución.

Ilustración 12 Activación de arcilla - prueba piloto



Muestras Piloto (recién activadas) Fuente: Propia.

Las muestras se dejaron a temperatura ambiente y se revisaron 24 horas después, tiempo en el cual que se tomó registro de los hallazgos observados, para discernir sobre cuáles de las muestras se activaron de forma positiva, es decir las muestras que se solidificaron y muestran mayor estabilidad.

Ilustración 13 Curación de Arcilla muestra piloto a 24 horas



Fuente: Propia.

Con las observaciones se dedujo que las muestras que alcanzaron una mayor solidez al cabo de ese tiempo fueron las de molaridades altas, por lo cual se redujo la matriz de soluciones activantes a trabajar con molaridades de 7, 8 y 9. Hecho que dió lugar al primer punto de partida para la realización posterior de los demás ensayos de laboratorio. También se observó que entre la activación con Hidróxido de Potasio e Hidróxido de Sodio se tenía más efectividad con este último.

Con el paso de los días también se evidencio que las muestras iban desarrollando una capa externa de cristales producto de las soluciones químicas expuestas al oxígeno, en especial con el hidróxido de sodio.



Fuente: Propia. Muestras Piloto (15 días después de su activación).

8.3.2 Ensayo de Fluidez.

El ensayo se realizó bajo la guía de la norma I.N.V. E 325 Fluidez de morteros de Cemento Hidráulico (Mesa de Flujo). Para este ensayo se empezó trabajando una relación de Activante/Cementante a 0.5, 0.7 y 1, escogiendo como activador al silicato de sodio, ya que es de toda la matriz de soluciones activantes la de mayor densidad con una la molaridad de 9, es decir se escogió el caso más drástico para la fluidez de la mezcla.

Ilustración 14 Ensayo de Fluidez



Fuente: Propia. Relación activante/cementante 0.5, 0.7 y 1 (respectivamente).



Fuente: Propia. Relación de Activante/cementante a 0.5



Fuente: Propia. Relación de Activante/cementante a 0.7.



Fuente: Propia. Relación de Activante/cementante a 1.



A simple vista se puede observar que con las relaciones de agente cementante y agente activante a 0.5 la muestra casi que ni se desplaza por la mesa de flujo, mientras que a una relación de 0.7 tiene un desplazamiento mejor pero no es el más adecuado para el manejo en mezcla del mismo y finalmente se muestra que la fluidez de la relación a 1 es la más indicada de los casos experimentados.

Para obtener el porcentaje de fluidez óptimo se aplica la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro Promedio} - \text{Diámetro base inferior del molde}}{\text{Diámetro base inferior del molde}} \times 100$$

Los datos obtenidos para hallar el porcentaje de fluidez respectivamente fueron:

- Para la muestra con fluidez de relación a 1:0,5 se obtuvo un diámetro promedio de 103 mm; Por consiguiente el porcentaje de fluidez de la mezcla es =03%
- Para la muestra con fluidez de relación a 1:0,7 se obtuvo un diámetro promedio de 130mm; Por consiguiente el porcentaje de fluidez de la mezcla es =30%
- Para la muestra con fluidez de relación a 1:1,0 se obtuvo un diámetro promedio de 210mm; Por consiguiente el porcentaje de fluidez de la mezcla es =110%

Esto quiere decir que para la relación de Activante/cementante a 0.5, 0.7 y 1, la relación más óptima de trabajo para su manejabilidad es de 1:1.

8.3.3 Ensayo de alcalinidad a la arcilla.

Este ensayo es muy fácil e importante de aplicar al material cementante a emplear en la investigación ya que la alcalinidad es un factor indispensable en el contenido de la misma.

Se realiza simplemente con la aplicación directa a una muestra de arcilla de fenolftaleína ($C_{20}H_{14}O_4$) la cual es un indicador de pH que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en presencia de disoluciones básicas toma un color rosado con un punto entre $pH=8,2$ (incoloro) a $pH=10$ (magenta o rosado) y en disoluciones fuertemente ácidas se torna naranja. La solución indicadora que se utiliza es una solución al 1% de fenolftaleína en alcohol; y se coloca en la muestra por medio de un rociador.

Ilustración 15 Prueba de alcalinidad de la arcilla



Fuente: Propia.

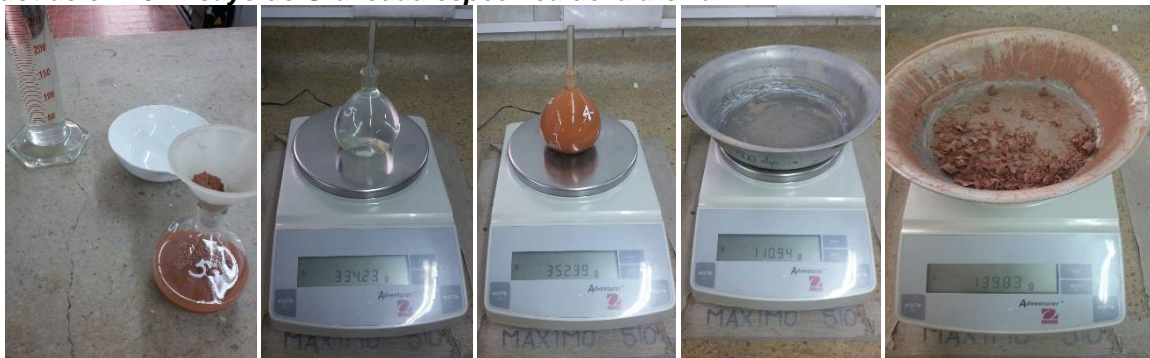
Como resultado se observa que la muestra expuesta a la fenolftaleína tiene un PH alto favorable para ser utilizado como un cemento. Como dato extra la fenolftaleína también se usa para determinar si un concreto presenta carbonatación.

8.3.4 Ensayo de Densidad o Peso específico.

Este ensayo para determinar tal propiedad del agente cementante es muy importante para vislumbrar el cálculo del volumen del material y se debe tener en cuenta para realizar su valor comparativo con el del cemento portland que oscila 3 g/ml (3 kg/l). Los pasos a seguir para este ensayo de laboratorio son:

- Pesar el picnómetro seleccionado con agua a tope según indicación en el mismo.
- Sacar la mitad del agua y agregar 30 g de Arcilla.
- Llenar el picnómetro nuevamente con el agua retirada, esta vez con la muestra de arcilla adentro.
- Colocar la muestra en una bomba de vacío preferiblemente para retirar el aire contenido dentro de la mezcla dentro del picnómetro.
- Tomar el peso del picnómetro + la muestra de arcilla + agua.
- Tomar el peso del recipiente en el cual se colocara la mezcla del picnómetro dentro del horno.
- Dejar secar la solución a temperatura de 100°C por un periodo de 24 horas.
- Pesar el recipiente después del periodo de tiempo indicado dentro del horno.

Ilustración 16 Ensayo de Gravedad específica de la arcilla.



Fuente: propia.

Para obtener el peso del suelo simplemente se resta el peso del recipiente llevado a horno, con el peso propio del recipiente sin ningún contenido, obtenemos:

$$W_s = 110.94 \text{ g} - 139.84 \text{ g} = 28.9 \text{ g}$$

Para efectuar los cálculos de la gravedad específica de la arcilla se utilizan la siguiente fórmula:

$$G_s = W_s * T(F) / (W_m + W_s - W_t)$$

W_m : Peso del picnómetro + agua = 333.89 g

W_t : Peso del picnómetro + agua + suelo = 352.39g

W_s : Peso suelo = 28.9 g

T = Temperatura (20°C), F = Factor corrección de agua = 1.001112

$$G_s \text{ 20°C} = 28.9 / (333.89 + 28.9 - 352.39) = 2.77$$

Lo cual indica que está entre los parámetros estándar de una arcilla plástica (G_s del cemento = 3.00 a 3.15 aprox.).

8.3.5 Ensayo de Relación de Activante/Cementante.

Teniendo en cuenta los resultados del ensayo de fluidez se estableció trabajar una relación de Activante/cementante con una relación de 1:1, para este caso se utilizó 50g de una arcilla con 50g de solución, estas muestras se dejaron en reposo para observar su tiempo de activación en temperatura ambiente.

Ilustración 17 Prueba geopolimerización relación 1:1 Activante/Cementante.



Fuente: Propia.

Estas muestras no empezaron a fraguar sino hasta el cabo de 15 días aproximadamente, lo cual indicó la importancia entre la relación de agente cementante y agente activante, puesto que en la prueba piloto se usó una relación de 0.48 y no 1:1 que era la más óptima después de haber realizado el ensayo de fluidez; además con el paso del tiempo se ratificó que las muestras que mejor reaccionaron fueron las que tenían mayor molaridad (7, 8 y 9).

Con estos resultados se determinó que para obtener una sintetización más pronta es necesario trabajar con los índices de fluidez menores correlacionando los resultados con los valores de la prueba piloto (0.48). Por lo cual se establece trabajar con valores de 0.5 a 0.9.

A medida que se va manejando la mezcla del mortero no solo con el agente hidratante sino con el agregado (que se especificara más adelante) se observa que para el manejo de su fluidez se requiere una relación de 0.9 y que a mayor molaridad utilizada en la mezcla se tiene menos fluidez, por lo cual en la solución química de 10M especialmente se requirió una relación de 1:1.

8.3.6 Ensayo de Relación de Arcilla/Arena.

De acuerdo a los resultados del ensayo de Relación de Activante/cementante se procede a realizar los primeros cubos de ensayo para mortero con una relación de Agente Cementante e Hidratante a 0.9, y una relación de Arcilla/Arena de 2.5; este valor se basa en su aproximación a los referentes en la Norma I.N.V. E – 323 – 07 en donde se especifica que para la Composición del mortero “Las proporciones en peso de materiales para el mortero normal serán de una (1) parte de cemento y 2.75 partes de arena gradada, usando una relación agua-cemento de 0.485 para los cementos Pórtland.”

Se toma como partida la reacción de las soluciones activantes a 2 M, correspondientes a Hidróxido de Sodio, Hidróxido de sodio con Silicato de Sodio y solo Silicato de Sodio, tal como se muestra a continuación:

Ilustración 18 Prueba Relación Arcilla/Arena.



Fuente: Propia. Prueba Piloto cubos de mortero para ensayo de 5x5x5 cm.

Este escenario indica que tanto la consistencia de los morteros antes y después de fraguar es manejable para seguir con su aplicación para las demás relaciones expuestas en la *matriz de activación*.

A demás se muestra que los activantes influyen no solo en la composición interna del mortero, sino que físicamente se ven los cambios en su color dependiendo del tipo de activante, en la ilustración anterior se observa que el primer cubo de Hidróxido de Sodio es de tono más claro comparado con los otros dos geopolímeros, en donde la solución con las dos mezclas de hidratante tiene un tono medio y por último la muestra de Silicato de Sodio tiene un color más oscuro.

8.4 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

Según la relación de Activante/cementante y Arcilla/Arena definidas anteriormente se procede a cerrar la brecha de la matriz de activantes. Al comenzar esta investigación se optó por usar únicamente la arena Silícea por su alto contenido de este elemento fundamental para la reacción química en la generación del geoplímero, pero con el paso del tiempo y los resultados obtenidos en la experimentación de este trabajo, al final se introdujo el uso de una arena de río ilustrada en el ítem de materiales. Por consiguiente los primeros ensayos de esta práctica para determinar los agentes hidratantes se realizaron exclusivamente con la arena de peña a una temperatura de curado de 80°C.

Para agilizar el trabajo en el laboratorio se implementaron tres moldes en acrílico con 12 divisiones internas que cumplieran con la normatividad en cuanto a la dimensión de los cubos a ensayar; este diseño es de autoría propia, creado para un fácil desmonte de los cubos, el cual permite sacar los mismos con facilidad al apartar la base del molde y luego empujar los cubos que saldrán expulsados por el lado paralelo. Una de las recomendaciones para la cocción de las muestras en el horno es el uso de papel film para que los cubos no pierdan mayor humedad del activante.

Ilustración 19 Moldes en acrílico para morteros



Fuente: Propia. Molde para Cubos de ensayo de 5x5x5 cm.

A continuación se muestran algunas de las imágenes referentes a los ensayos de resistencia a la compresión que se fallaron para los morteros con Silicato de Sodio, hidróxido de sodio y una mezcla entre estas.

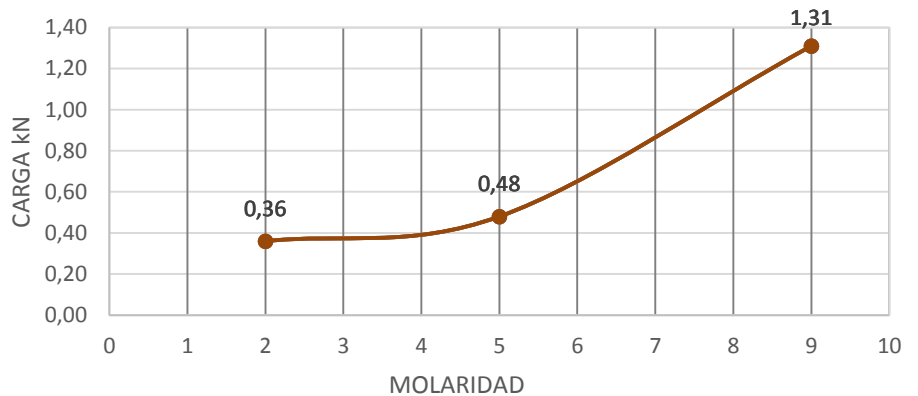
Ilustración 20 Ensayos de Resistencia a la Compresión



Fuente: Propia.

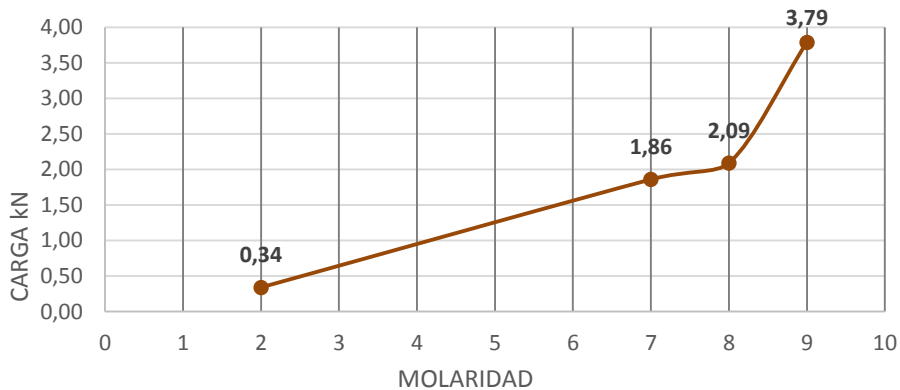
Para cerrar la brecha de la “Matriz de Soluciones Activantes”, se realizaron los primeros cubos de mortero con Hidróxido de Sodio e Hidróxido de Potasio, para determinar cuál de estos dos activantes es más eficiente para la generación del geopolímero con la arcilla. A continuación se encuentran las gráficas relacionadas del promedio de tres cubos ensayados a la resistencia a la compresión para 2M, 5M y 9M respectivamente.

Ilustración 21 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Potasio (7días)



Fuente: Propia.

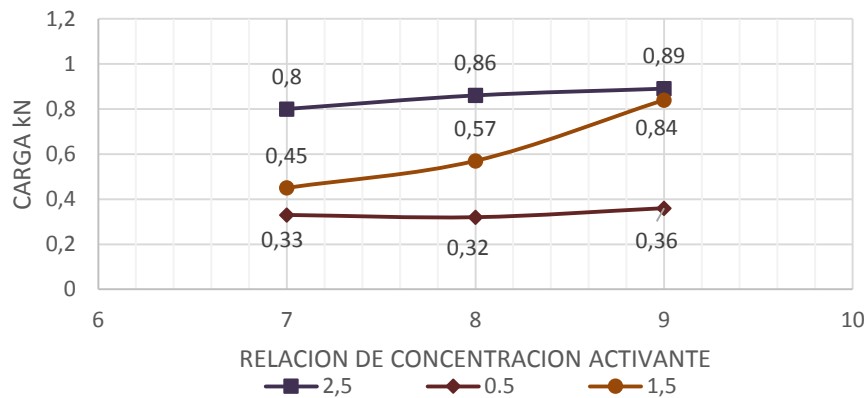
Ilustración 22 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Sodio (7días)



Fuente: Propia.

Dados los resultados se evidencia que el geopolímero activado con 5M de hidróxido de Sodio es equivalente al valor del geopolímero activado con hidróxido de Potasio a 9M; es decir comparando los resultados a 9M de evidencia que con el Hidróxido de Sodio el valor es casi el triple, por ende se realizan los ensayos para 7M y 8M con NaOH para completar los datos. A partir de estos datos se decide realizar los siguientes ensayos de resistencia con la combinación de Silicato de Sodio e Hidróxido de sodio a 7, 8 y 9 M, y con concentraciones entre los rangos de 0,5, 1.5 y 2.5 para determinar la solución más óptima y así seguir cerrando la brecha de la matriz de activantes.

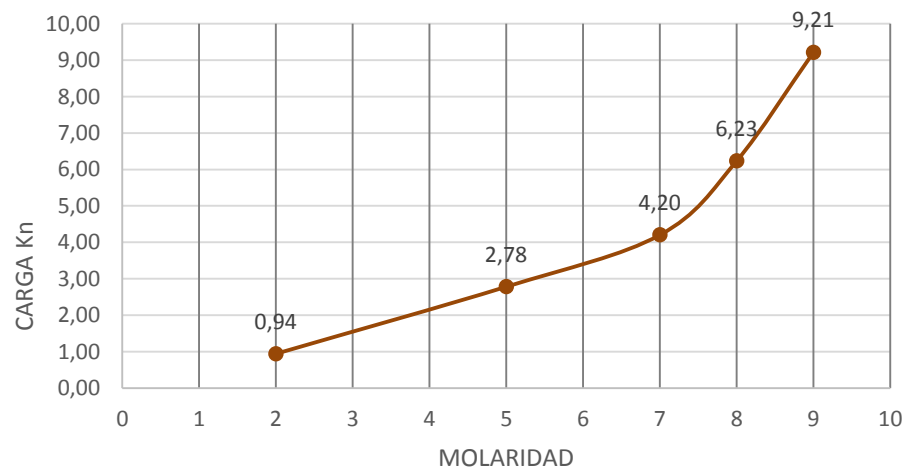
Ilustración 23 Resistencia a la compresión Geopolímero con Hidróxido de Sodio con Silicato de Sodio (7 días)



Fuente: Propia.

En vista de los resultados de carga soportada por los cubos de mortero activados con la solución de Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio se indica que los valores son menores cuando es activada la arcilla solamente con Hidróxido de sodio, se decide realizar el mismo ensayo con solo Silicato de Sodio para ver de igual manera su desarrollo; De estos datos también se advierte el mejor comportamiento de la concentración que es de 2.5 y a 9M.

Ilustración 24 Resistencia a la compresión Geopolímero con Silicato de Sodio (7 días)



Fuente: Propia.

En resumen se obtiene la siguiente tabla indicando no solo los valores de carga soportados por las muestras en kilo Newton sino también en Mega Pascales, para tener idea del comportamiento de las mismas en comparación con una resistencia media de un cemento portland que se aprueba sobre los 25 Mpa.

Tabla 9 Matriz Primeros cubos de Ensayo a la Resistencia a la Compresión 7 días.

ACTIVANTE (Concentración)	MOLARIDAD	DIMENSIONES (m)			CARGA (kn)				DEFORMACION (kN/m ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION Mpa
		b	h	Total (b*h)	1er cubo.	2do cubo.	3er cubo.	Promedio		
NaOH	7	4,80	4,70	22,56	1,81	2,11	1,75	1,89	8,543	0,854
	8	4,80	4,80	23,04	2,06	1,98	2,23	2,09	9,250	0,925
	9	4,80	4,80	23,04	4,02	3,76	3,59	3,79	16,774	1,677
NaOH/Na ₂ SiO ₃ (1,5)	7	4,80	4,90	23,52	0,32	0,36	0,31	0,33	1,431	0,143
	8	4,80	4,90	23,52	0,28	0,31	0,37	0,32	1,387	0,139
	9	4,80	4,90	23,52	0,36	0,4	0,33	0,36	1,575	0,158
NaOH/Na ₂ SiO ₃ (2,0)	7	4,80	4,90	23,52	0,38	0,44	0,47	0,43	1,864	0,186
	8	4,80	4,90	23,52	0,55	0,53	0,63	0,57	2,471	0,247
	9	4,80	4,90	23,52	0,83	0,85	0,84	0,84	3,642	0,364
NaOH/Na ₂ SiO ₃ (2,5)	7	4,80	4,90	23,52	0,82	0,77	0,8	0,80	3,454	0,345
	8	4,80	4,90	23,52	0,84	0,87	0,86	0,86	3,714	0,371
	9	4,80	4,90	23,52	0,89	0,88	0,91	0,89	3,873	0,387
Na ₂ SiO ₃	7	4,80	4,80	23,04	4,3	4,41	4,12	4,28	18,928	1,893
	8	4,80	4,80	23,04	5,87	6,32	6,43	6,21	27,469	2,747
	9	4,80	4,80	23,04	10,03	9,1	8,51	9,21	40,776	4,078

Fuente: Propia.

En definitiva la resistencia a la compresión sube radicalmente con el uso del Silicato de Sodio a comparación con el Hidróxido de sodio y la combinación entre ambas. Cabe destacar que es de preferencia utilizar las concentraciones y molaridades más bajas para que el manejo de químicos sea más fácil de manejar, y la fluidez del mismo se mantenga ya que a mayor molaridad mayor densidad de la mezcla.

De acuerdo a los valores de resistencia obtenidos se establece que el mejor activante a seguir estudiando es el Silicato de Sodio y se define la realización de los ensayos de resistencia a la compresión de los cubos a los 7, 14 y 28 días de fraguado.

En vista que los morteros se demoran en fraguar a temperatura ambiente se mantiene el rango de curado de 80°C y se define otra temperatura de 120°C durante un periodo de 24 horas por cada una, esto con el fin de observar la influencia de la temperatura sobre la resistencia final del mortero.

Las condiciones fijas para toda la matriz de activante presentada a continuación para ensayar los geopolímeros, fueron una relación de 2.5 de Arcilla/Arena y una relación de Activante/Cementante 0,9 para molaridades menores a 9 y para 10M una relación 1:1; la otra variable aparte de la temperatura en la creación del geopolímero fué el tipo de arena utilizado de peña y de río (Ver ítem de materiales).

Tabla 10 Matriz final de Activación del Geopolimero.

ACTIVANTE								
SILICATO DE SODIO								
Molaridad	Arena de río				Arena de peña			
	80°C	Cant	120°C	Cant	80°C	Cant	120°C	Cant
7 M	mortero	12	mortero	12	-	0	-	0
8 M	mortero	12	mortero	12	mortero	12	mortero	12
9 M	mortero	12	mortero	12	mortero	12	mortero	12
10 M	-	0	-	0	mortero	12	mortero	12

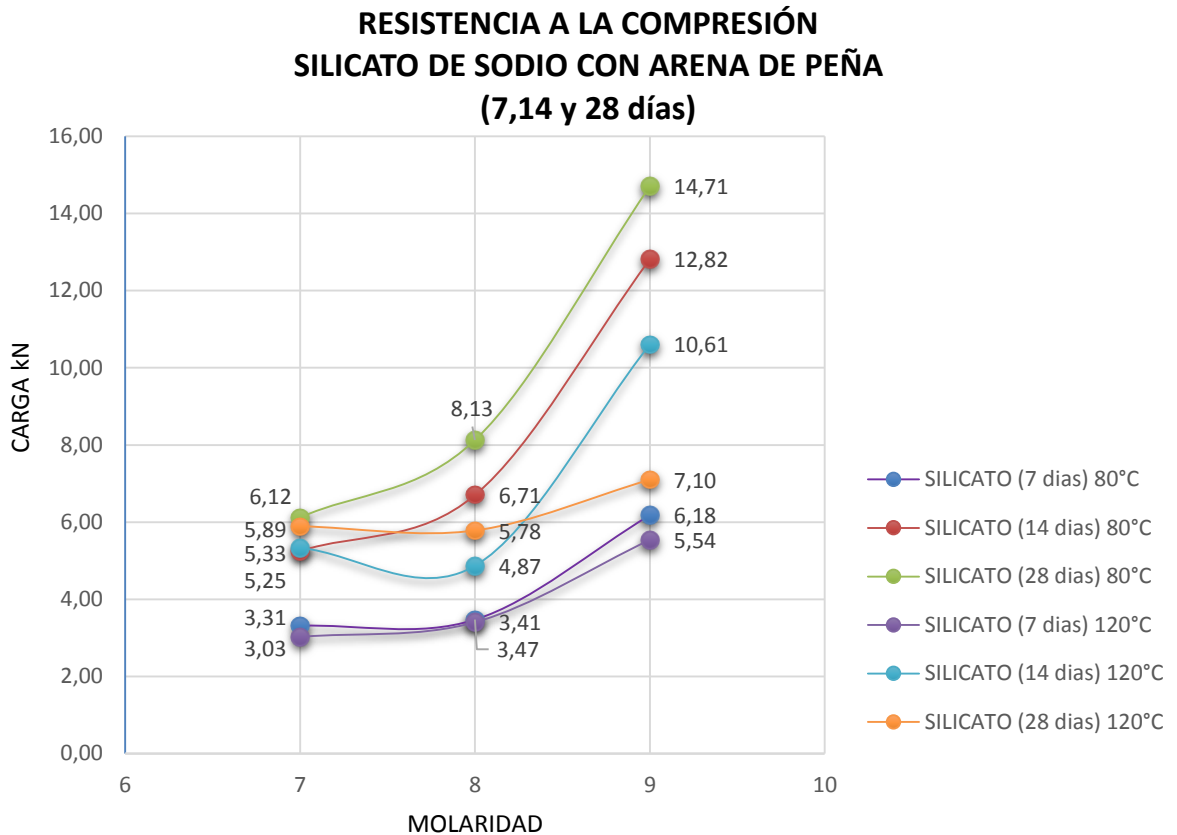
Fuente: Propia

Aparte de los morteros ensayados anteriormente, para esta prueba final se realizaron 144 cubos, puesto que para cada molaridad se fallan 3 muestras para obtener el valor promedio según los 3 tiempos de fraguado estipulados, teniendo como remanente tres cubos por si se fractura alguno de los cubos al desmoldar o sufre algún tipo de percance en el proceso, de aquí la importancia que los moldes de acrílico diseñados e implementados tuviesen 12 espacios para cada mezcla de mortero.

En la matriz final de activación del geopolímero se puede observar que no se tuvieron en cuenta las muestras con arena de peña a 10M ya que este se cambió por la Molaridad de 7 en los morteros con arena de río, para comprobar si las resistencias siguen creciendo o por el contrario, puesto que según otras investigaciones referentes a los geopolímeros, indican que la activación tiene picos en la resistencia a la compresión desarrollando un punto óptimo y después de ciertas temperaturas o molaridad la resistencia decrece.

A continuación los resultados finales de este trabajo de investigación:

Ilustración 25 Resistencia a la compresión con Silicato de Sodio y arena de peña.



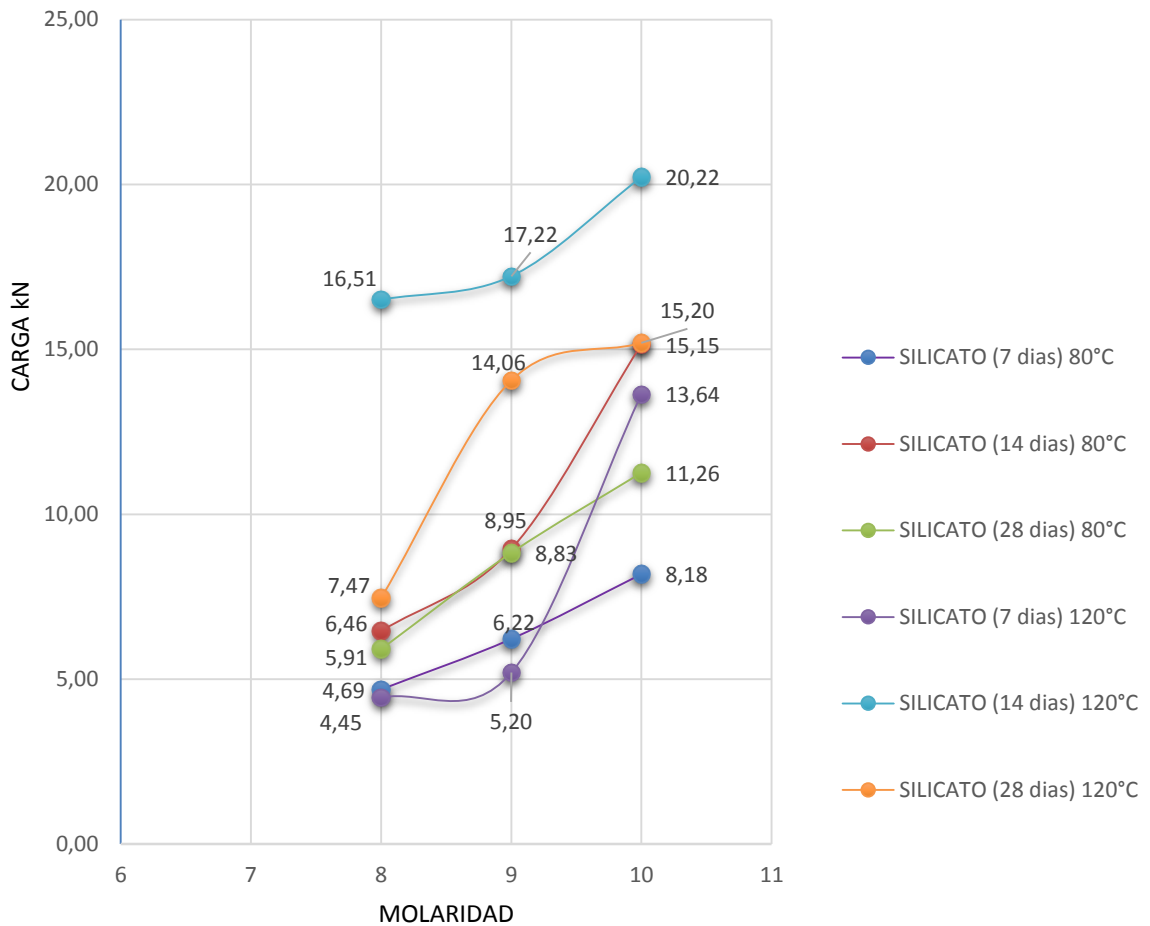
Fuente: Propia.

En esta gráfica se observa que el mejor comportamiento del geopolímero obtenido a partir de la sintetización de la arcilla con silicato de sodio y arena de peña se encuentra entre la temperatura de 80°C a una molaridad de 9 y su resistencia va aumentando a medida que pasa el tiempo de fraguado.

También se observa que a la temperatura de 120°C la resistencia a los 7 días es muy similar a la obtenida con 80°C, y los 14 días se eleva su resistencia pero a los 28 días esta resistencia decae.

Ilustración 26 Resistencia a la compresión con Silicato de Sodio y arena de rio.

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN
SILICATO DE SODIO CON ARENA DE RIO
(7,14 y 28 días)**



Fuente: Propia.

En esta gráfica se observa que el mejor comportamiento del geopolímero obtenido a partir de la sintetización de la arcilla con silicato de sodio y arena de rio se encuentra con la temperatura de 120°C alcanzada a los 14 días pero su resistencia disminuyó a los 28 días, lo cual indica que a pesar que este fue el valor más alto obtenido en toda la matriz desarrollada no es favorable su comportamiento durante el fraguado, esto mismo sucedió con la temperatura de 80°C en todas las molaridades relacionadas.

Es evidente que no se alcanzó la resistencia mínima esperada en comparación con un cemento Portland de alrededor de 25 Mpa, pero hay que mencionar que para este último ensayo realizado con la arena de río, hubo algunos inconvenientes técnicos en el proceso de curación de las muestras, ya que las mismas después de elaborado el mortero se dejó a las temperaturas definidas para un periodo de 24 horas, pero no se desmoldaron inmediatamente después de dicho tiempo para que terminaran de fraguar a la temperatura ambiente como las demás muestras, debido a este imprevisto los cubos permanecieron dentro del horno apagado, envueltas tal cual se dejaron para la cocción, y al desmoldar los cubos al cabo de una semana, aún se mostraban húmedos a pesar del paso del tiempo, físicamente parecían que apenas habían pasado las 24 horas.

Después de falladas las muestras a los 7 días se obtuvieron valores de:

Tabla 11 Primer Resistencia a la compresión arena de río a 10M (7días).

	8 M	9 M	10 M
SILICATO (7 días) 80°C	2,69 kN	4,22 kN	3,10 kN
SILICATO (7 días) 120°C	2,55 kN	4,5 kN 0	3,55 kN

Fuete: Propia.

Este hecho conlleva a suponer que el tiempo en que permanecieron dentro del horno sin curar a la temperatura ambiente a pesar del paso de los días hacia que la resistencia estuviese por debajo de lo esperado es por ello que se decidió exponer las muestras a la mismas temperatura esta vez por un periodo de solamente 1 hora sin cubrir con el papel film para poder eliminar algo de la humedad contenida, además de este inconveniente en el fraguado también se observó que los hornos estuvieron apagados en un tiempo estimado de 1 hora a razón del uso de los hornos para otras prácticas estudiantiles.

A continuación se relaciona la tabla con los valores obtenidos específicamente y su resistencia final en Mpa.

Tabla 12 Resistencia a la Compresión Arena de Peña

		ACTIVANTE (Concentración)	MOLARIDAD	DIMENSIONES (m)			CARGA (kn)				CARGA (kN/cm ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION Mpa
				b	h	Total (b*h)	1er cubo.	2do cubo.	3er cubo.	Promedio		
80°C (Arena de pena)	7 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	3,7	2,51	3,73	3,31	14,365	1,436
			8	4,80	4,90	23,52	3,46	3,73	3,23	3,47	15,058	1,506
			9	4,80	4,90	23,52	6,02	6,39	6,14	6,18	26,808	2,681
	14 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	5,32	5,21	5,23	5,25	22,776	2,278
			8	4,80	4,90	23,52	6,54	6,82	6,78	6,71	29,105	2,911
			9	4,80	4,90	23,52	12,57	11,69	12,27	12,18	52,791	5,279
	28 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	6,02	6,21	6,14	6,12	26,547	2,655
			8	4,80	4,90	23,52	8,2	8,11	8,08	8,13	35,247	3,525
			9	4,80	4,90	23,52	14,5	14,74	14,89	14,71	63,775	6,377
120°C (Arena de pena)	7 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	2,98	3,01	3,11	3,03	13,151	1,315
			8	4,80	4,90	23,52	3,23	3,46	3,53	3,41	14,769	1,477
			9	4,80	4,90	23,52	5,11	5,87	5,64	5,54	24,018	2,402
	14 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	5,22	5,12	5,61	5,32	23,050	2,305
			8	4,80	4,90	23,52	4,55	5,2	4,86	4,87	21,114	2,111
			9	4,80	4,90	23,52	10,25	10,66	10,91	10,61	45,985	4,598
	28 días.	Na2SiO3	7	4,80	4,90	23,52	5,96	5,72	5,98	5,89	25,521	2,552
			8	4,80	4,90	23,52	5,84	5,48	6,01	5,78	25,045	2,504
			9	4,80	4,90	23,52	7,2	6,88	7,21	7,10	30,767	3,077

Fuente: Propia.

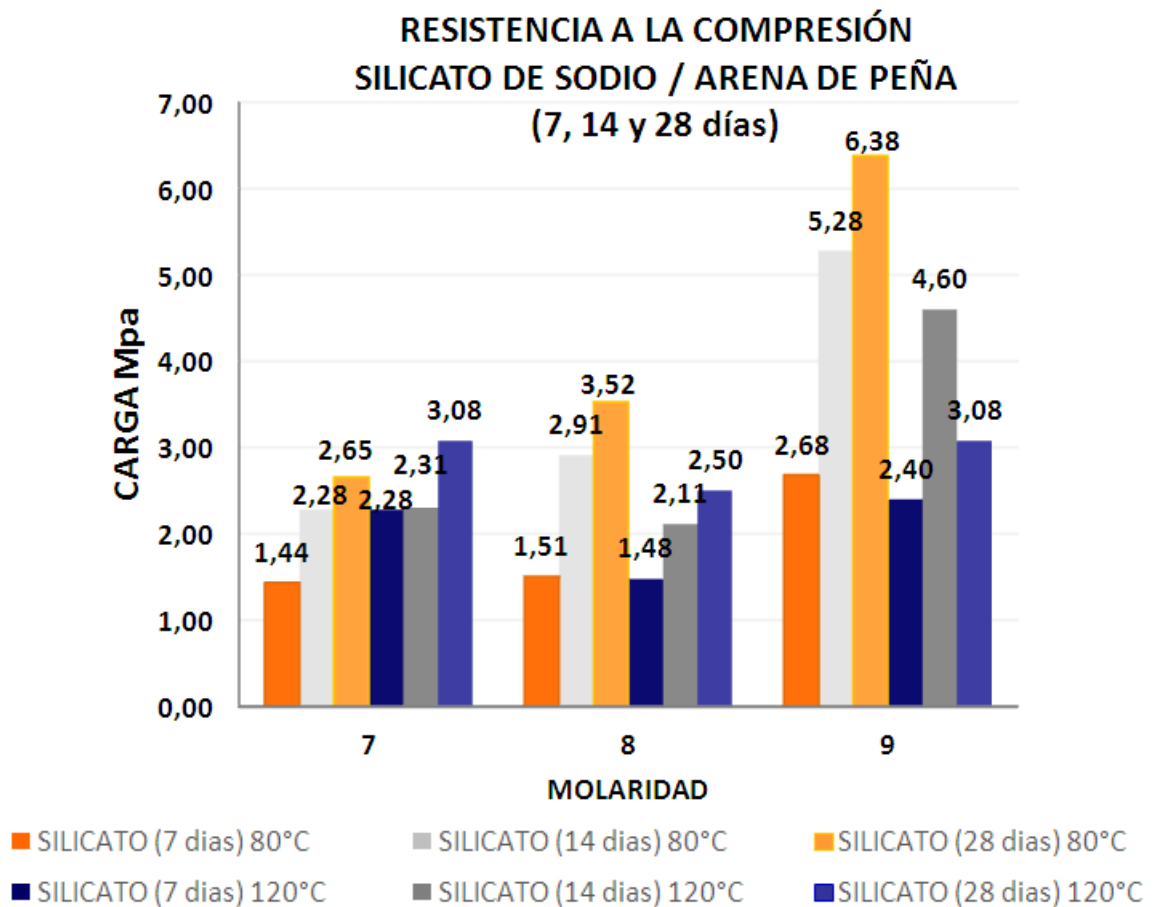
Tabla 13 Resistencia a la Compresión Arena de Rio

		ACTIVANTE (Concentración)	MOLARIDAD	DIMENSIONES (m)			CARGA (kn)				CARGA (kN/cm ²)	RESISTENCIA A LA COMPRESION Mpa
				b	h	Total (b*h)	1er cubo.	2do cubo.	3er cubo.	Promedio		
80°C (Arena de rio)	7 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	4,41	4,85	4,82	4,69	20,348	2,035
			9	4,80	4,90	23,52	6,21	6,12	6,33	6,22	26,967	2,697
			10	4,80	4,90	23,52	8,21	8,39	7,94	8,18	35,464	3,546
	14 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	6,85	5,98	6,55	6,46	28,007	2,801
			9	4,80	4,90	23,52	8,58	9,27	8,99	8,95	38,788	3,879
			10	4,80	4,90	23,52	16,27	14,08	15,11	15,15	65,697	6,570
	28 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	6,41	5,89	5,44	5,91	25,637	2,564
			9	4,80	4,90	23,52	9,26	8,29	8,94	8,83	38,282	3,828
			10	4,80	4,90	23,52	11,99	10,16	11,64	11,26	48,832	4,883
120°C (Arena de rio)	7 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	4,19	4,41	4,74	4,45	19,278	1,928
			9	4,80	4,90	23,52	4,86	5,32	5,43	5,20	22,559	2,256
			10	4,80	4,90	23,52	13,96	13,25	13,71	13,64	59,136	5,914
	14 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	16,44	16,95	16,13	16,51	71,564	7,156
			9	4,80	4,90	23,52	17,2	16,42	18,05	17,22	74,671	7,467
			10	4,80	4,90	23,52	21,97	18,51	20,18	20,22	87,663	8,766
	28 días.	Na2SiO3	8	4,80	4,90	23,52	7,5	7,81	7,11	7,47	32,400	3,240
			9	4,80	4,90	23,52	14,23	14,01	13,95	14,06	60,971	6,097
			10	4,80	4,90	23,52	14,41	15,02	16,18	15,20	65,913	6,591

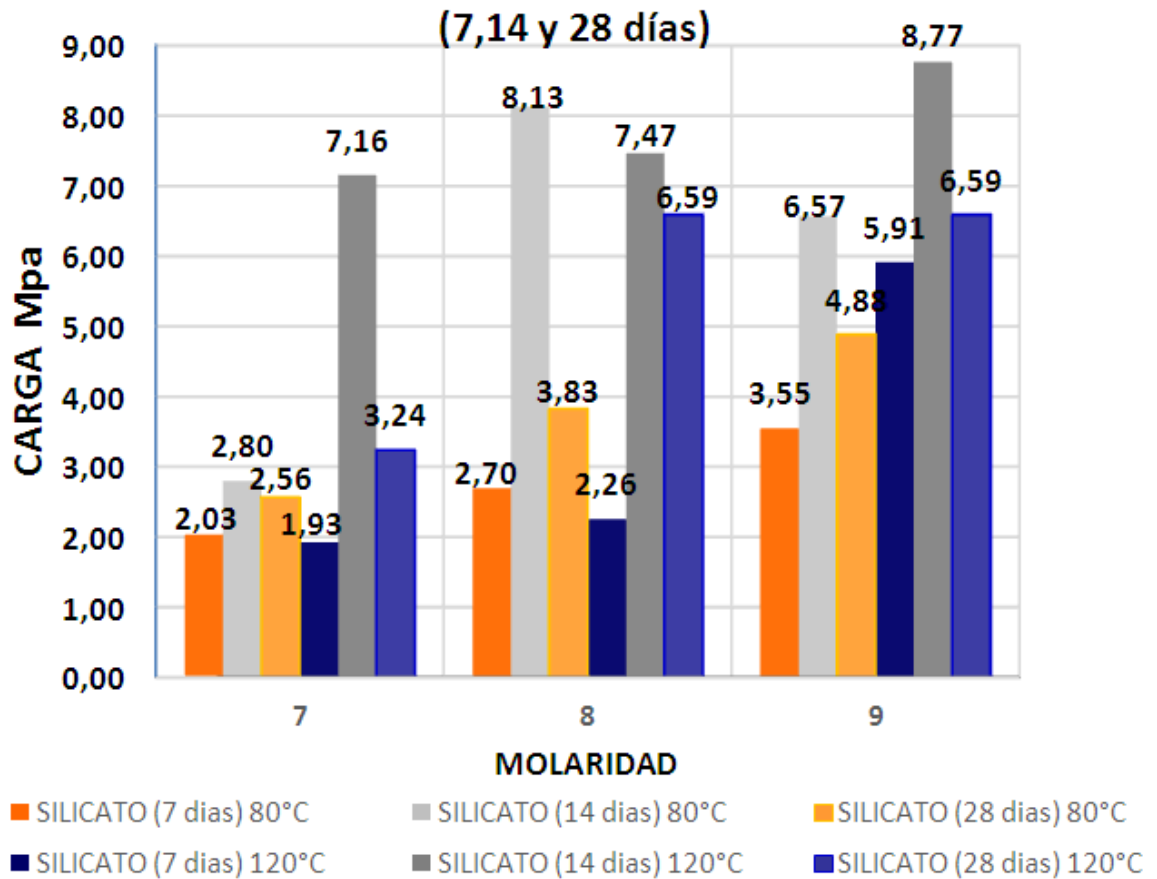
Fuente: Propia.

El valor más bajo obtenido fue el de Arena de peña con 1.43 Mpa y el valor más alto fue de 8.76 Mpa con arena de rio, la mitad de lo que se esperaba. A pesar de los inconvenientes se evidenciaron mejoras en la resistencia a la compresión con la arena de rio a comparación de la misma matriz trabajada con la arena de peña, pero estos valores fueron disminuyendo con el tiempo de fraguado muy posiblemente a causa de los imprevistos, es por ello que la base de este trabajo da pie para seguir en la búsqueda de un geopolímero que pueda ser activado con arcilla como material cementante incluyendo nuevas variables que sigan demostrando su comportamiento dependiendo de otros factores que en esta oportunidad no se desarrollaron.

Finalmente se relacionan las gráficas de la tabla 12 y 13 en Mpa, en donde se evidencia lo descrito anteriormente.

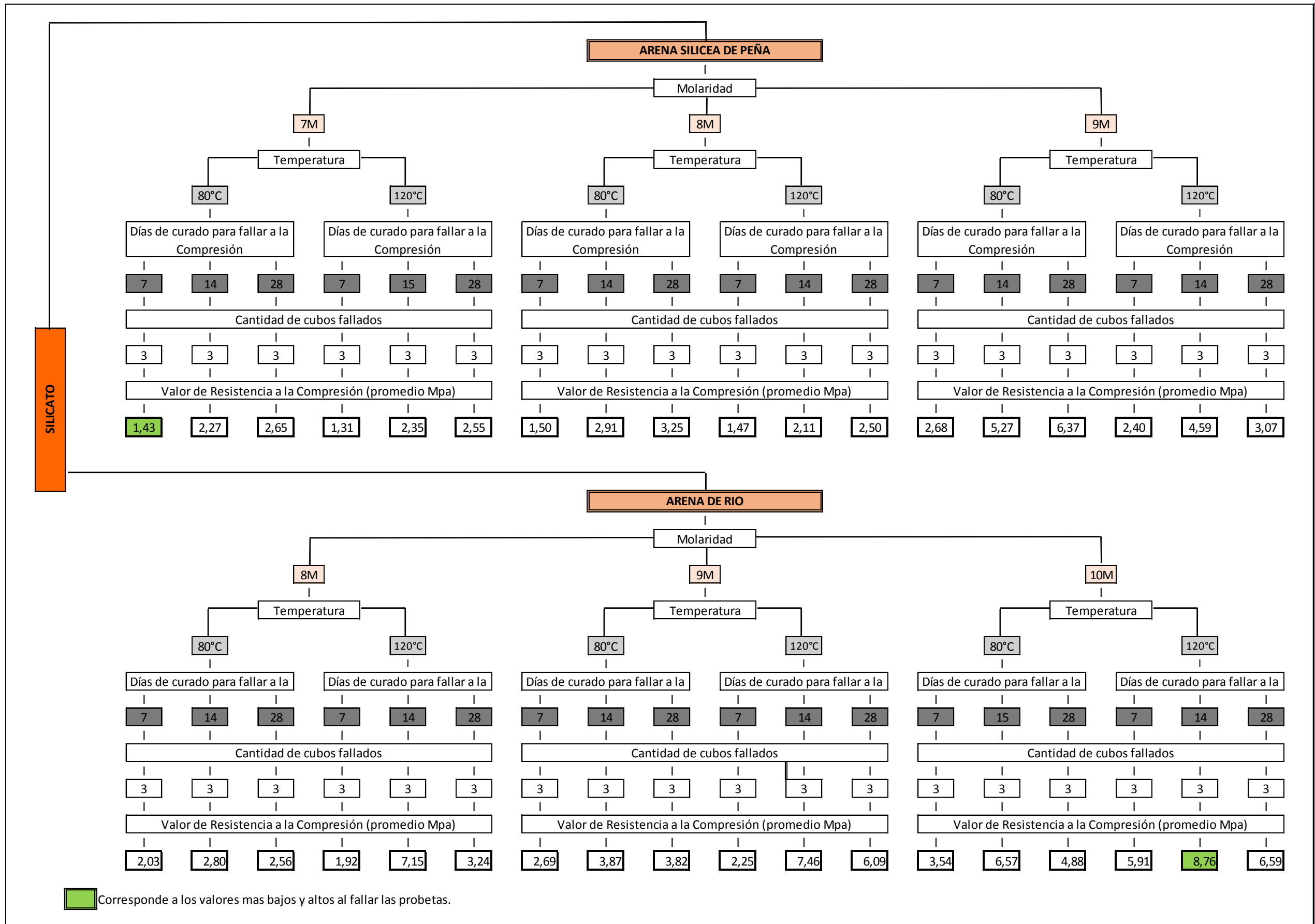


RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SILICATO DE SODIO CON ARENA DE RIO



Para aclarar finalmente el matriz de los geopolímeros sintetizados con arcilla y silicato de sodio a diferentes molaridades y de acuerdo a las variables expuestas anteriormente como el tipo de agregado (arena de rio/peña), y la temperatura (80°C y 120°C); se presenta a continuación un mapa conceptual con toda la información expuesta anteriormente en este apartado.

Ilustración 27 Mapa conceptual de matriz de resultados final



9. CONCLUSIONES

Los geopolímeros han atraído gradualmente la atención del mundo científico e industrial al ser considerados materiales revolucionarios, en parte debido a sus ventajas técnicas y ambientales, a su facilidad de implementación en nuevas tecnologías para su producción y su versatilidad en aplicación a diferentes campos; entre los cuales resalta la producción de materiales cementantes de alto desempeño.

Las características mineralógica y estructural del material cementante es la base para los geopolímeros en el caso de las arcillas dependen de su proceso de formación, por lo que varían según la región. Diversos autores han estudiado las variables que influyen en la actividad puzolánica de las arcillas coincidiendo en la importancia del porcentaje del mineral Caolinita, que en nuestro caso está dentro de los rangos establecidos en investigaciones similares.

Con sílice soluble procedente del silicato sódico utilizado, se obtiene una clara mejora el desarrollo de resistencias mecánicas aunque hay que mencionar que en estos casos se observó que disminuía la trabajabilidad de las pasta a mayor molaridad.

La temperatura de calcinación es un factor clave y fundamental para el proceso de obtención y curado del geopolímero, en este caso para la temperatura de 80°C se obtuvieron mejores resultados de resistencia a la compresión en morteros generados con arena de peña, mientras que la temperatura de 120°C favoreció a los morteros generados con la arena de río.

Con el paso de los días se evidencio que las muestras pilotos realizadas para la activación alcalina iban desarrollando una capa externa de cristales, producto de las soluciones químicas expuestas al oxígeno, en especial con el hidróxido de sodio.

Para la resistencia a la compresión de los geopolímeros activados entre Hidróxido de Potasio e Hidróxido de Sodio tiene mejor comportamiento este último.

Con un 100% de activante se obtiene una fluidez en la mezcla de cemento, arena y agua de $110 \pm 5\%$, debido que al cerrar la brecha de la matriz de activantes, las molaridades trabajadas a mayor molaridad presentan mayor densidad en la mezcla del mortero.

Los cementantes obtenidos a diferentes condiciones de concentración del activador, temperatura de fraguado, relación hidratante/cementante y tipo de agregado demuestran que la química de los materiales es lo más importante para su activación.

El módulo de finura del material cementante debe ser mínimo de 75 μm para absorción del agente activante y la formación de una estructura compacta con una disminución de la porosidad.

En definitiva el objetivo que se pretende con este trabajo es poner de manifiesto el potencial de estos materiales tanto desde el punto de vista de sus propiedades, para que en un futuro próximo puedan ser utilizados en diferentes aplicaciones dentro de la industria de la construcción y especialmente en la industria de los prefabricados.

Hasta la fecha, la mayoría de los trabajos realizados sobre activación alcalina de residuos puzolánicos se centran en el estudio de escorias de alto horno y cenizas volantes encontrándose escasas investigaciones relacionadas con la activación alcalina en otros materiales como las arcillas, y aunque aún siga el debate sobre cuál sería la mejor por sus propiedades y menor impacto ambiental en su producción, los materiales activados alcalinamente se han convertido en una buena alternativa al cemento portland, para contribuir en la reducción del consumo energético y de las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO_2 , por ende se debe seguir investigando sobre nuevos materiales innovadores que den respuesta a las necesidades de la actualidad.

10. RECOMENDACIONES

Es muy útil realizar un estudio de Fluorescencia o Difracción por Rayos X después de generar el geopolímero para comparar su composición química y avistar los elementos que se correlacionan en el comportamiento más deseado.

Es fundamental asegurar los equipos y espacios así como los tiempos de fraguado y falla de las mezclas para tener resultados libres de alteración alguna.

Por seguridad siempre se debe hacer uso de elementos de protección personal (EPP'S), sin excepción, sobre todo en el manejo de las soluciones químicas, pues estos materiales pueden quemar la piel en especial los hidróxidos, además hay que tener en cuenta que su reacción es exotérmica por lo cual emiten tanto vapores al ambiente como calor a altas temperaturas por el simple hecho de ser combinadas las lentejas con el agua destilada.

Hay que tener clara cada una de las prácticas antes de su desarrollo y contar con el apoyo de personal experimentado que pueda guiar las mismas.

Se recomienda para futuras investigaciones implementar la activación alcalina con Aluminato de Sodio, ya que se realizó una prueba preliminar que demostró que a temprana edad (7 días) se alcanzan resistencias superiores a las obtenidas con la matriz de activantes realizada.

La relación de arcilla/agregado implementado fue como variable fija siempre fue de 2.5 al ser un valor próximo al manejado con el cemento estándar, pero se podría variar para futuras investigaciones.

11. BIBLIOGRAFÍA

- ADFER, Dazne Científicos del MIT y el hormigón ecológico, 2009; En línea: <http://blog.is-arquitectura.es/2009/09/12/cientificos-del-mit-y-el-hormigon-ecologico/>, Consultado el 01 de abril de 2015.
- ALVAREZ MANTILLA, Hernando, Síntesis y caracterización de las propiedades fisicomecánicas de geopolímeros a partir de puzolana para su aplicación en la industria. Universidad Industrial de Santander, 2010. En línea: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1102/2/133488.pdf> Consultado el 01 de mayo de 2015.
- ARIAS JARAMILLO, Yhan, Incidencia de la Temperatura ambiente en la formación de compuestos cementantes mediante la activación alcalina de Cenizas de Carbón. En línea: <http://www.bdigital.unal.edu.co/37196/1/8160116.2014.pdf> Consultado el 01 de mayo de 2015.
- DAVIDOVITS, Joseph. Properties of Geopolymer Cements. Geopolymer Institute. Francia, 1994. En línea: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/KIEV.pdf Consultado el 01 de abril de 2015.
- INSTITUTO ESPAÑOL DEL CEMENTO Y SUS APLICACIONES, Historia del cemento, En línea: https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5, Consultado el 01 de abril de 2015.
- J.S.J. van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, G.C. Lukey, The role of inorganic polymer technology in the development of 'green concrete' The University of Melbourne, Australia, 2007. En línea: www.sciencedirect.com Consultado el 01 de mayo de 2015.
- LE MAITRE, R. W. (1976). The chemical variability of some common igneous rocks 17:589–637. Citado en: Origin of Basalts by Hybridization in Andesite-dominated Arcs. Journal of Petrology. 2015. Published by Oxford University Press. En línea: <http://petrology.oxfordjournals.org/content/early/2015/02/16/petrology.egv002.short?rss=1>, Consultado el 01 de abril de 2015.
- MONTES VALENCIA, Nancy, Cementos Alcalinos: Materiales de Construcción Ecológicos. Revista CINTEX, Vol. 19, pp.109-125. 2014. En línea: <http://revistaingenieria.univalle.edu.co:8000/index.php/incompe/article/view/521/426> Consultado el 01 de abril de 2015.
- REVISTA CIENCIA Y DESARROLLO Geopolímeros, 2011. en línea: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/249/articulos/geopolimeros-para-un-desarrollo-sustentable.html>, Consultado el 01 de abril de 2015.

- SALAZAR, Alejandro. Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, 2011. En línea: <http://www.upme.gov.co/Docs/Seminarios/2011/EEE/2%20ALEJANDRO%20SALAZAR.pdf>
Consultado el 01 de abril de 2015.