

	GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS	Código	FO-SB-12/v0
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN	Página	1/127

## RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): LUIS ALEJANDRO APELLIDOS: CÁCERES HARO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: TECNOLOGÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES

DIRECTOR:

NOMBRE(S): DR. GABRIEL APELLIDOS: PEÑA RODRIGUEZ

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN CEMENTO GEOPOLIMÉRICO SINTETIZADO A PARTIR DE LA CENIZA VOLANTEDE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN DE LA TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO.

RESUMEN

Se sintetizó un cemento geopolimérico a partir de las cenizas de la combustión del carbón de Termotasajero utilizando silicato de sodio como solución alcalina y arena de sílice como material de refuerzo. Se realizaron pruebas de conductividad térmica y ensayo de compresión para determinar las características resultantes cuando se varía la relación Si/Al. Adicionalmente se determinó el valor de efusividad térmica, densidad aparente y el porcentaje de absorción de agua.

PALABRAS CLAVE: geopolímeros, cemento geopolimérico, caracterización

CARACTERISTICAS:

PÁGINAS: 127 PLANOS: \_\_\_\_ ILUSTRACIONES: \_\_\_\_ CD ROOM: 1

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN CEMENTO GEOPOLIMÉRICO  
SINTETIZADO A PARTIR DE CENIZA VOLANTE DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN  
DE LA TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO

LUIS ALEJANDRO CÁCERES HARO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE TECNOLOGÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN CEMENTO GEOPOLIMÉRICO  
SINTETIZADO A PARTIR DE CENIZA VOLANTE DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN  
DE LA TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO

LUIS ALEJANDRO CÁCERES HARO

Código: 1980721

Proyecto presentado como requisito para optar al título de

Tecnólogo en Procesos Industriales

Director

GABRIEL PEÑA RODRIGUEZ

Doctor en Ingeniería de Materiales

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE TECNOLOGÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE UN TRABAJO DE GRADO

FECHA: Cúcuta, 28 de febrero de 2019

HORA: 02:00 P.m.

LUGAR: AULA DE FOTOGRAFIA CREAD

PLAN DE ESTUDIOS: TECNOLOGÍA EN PROCESOS INDUSTRIALES.

Título de la Tesis: "OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN CEMENTO GEOPOLIMÉRICO SINTETIZADO A PARTIR DE CENIZA VOLANTE DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN DE LA TERMOELÉCTRICA TERMOTASAJERO."

Nombre de los estudiantes	Código	Calificación	
		Letra	Número
LUIS ALEJANDRO CÁCERES HARO	1980721	Cuatro, Cuatro	4.4


Jurados: Ing. ISMAEL GARCIA PAEZ  
Ing. MARILSE ARAQUE PABÓN  
Psci. RUTH CASTELLANOS CAIPA

Director:   
GABRIEL PEÑA RODRÍGUEZ

### **A P R O B A D A**

  
Ing. ISMAEL GARCIA PAEZ

  
Ing. MARILSE ARAQUE PABÓN

  
Psci. RUTH CASTELLANOS CAIPA

**Vo.Bo. PEDRO GARZON AGUDELO**  
Coordinador Comité Curricular  
Tecnología en Procesos Industriales

## Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. El Problema	16
1.1 Título	16
1.2 Planteamiento del Problema	16
1.3 Formulación del Problema	17
1.4 Justificación	18
1.4.1 A nivel empresa-ambiental.	18
1.4.2 A nivel del estudiante.	18
1.4.3 A nivel institucional	19
1.5 Objetivos	19
1.5.1 Objetivo General	19
1.5.2 Objetivos Específicos	19
1.6 Alcances y Limitaciones	20
1.6.1 Alcance.	20
1.6.2 Limitaciones.	20
2. Marco Referencial	21
2.1 Antecedentes	21
2.1.1 A nivel regional.	21

2.1.2 A nivel nacional.	23
2.1.3 A nivel internacional.	25
2.2 Marco Contextual	27
2.3 Marco Teórico	28
2.3.1 Residuos de la combustión del carbón en una termoeléctrica.	29
2.3.2 Cenizas volantes: clases y composición química.	31
2.3.3 Solución activadora: Silicato de sodio.	32
2.3.3.1 Efecto del pH.	33
2.3.3.2 Efecto de los silicatos.	34
2.3.4 Síntesis del cemento geopolimérico.	35
2.3.4.4 1ª Etapa: Disolución de los aluminosilicatos en una solución alcalina fuerte.	35
2.3.4.2 2ª Etapa: Reorientación de los Grupos de Iones Formados.	36
2.3.4.3 3ª Etapa: Policondensación.	37
2.3.5 Cemento Geopolimérico.	38
2.3.6 Ensayos de Caracterización.	40
2.3.6.1 Ensayo de compresión.	40
2.3.6.2 Ensayo de Conductividad Térmica.	42
2.3.7 Determinación de cenizas por el método de calcinación.	43
2.4 Marco Conceptual	43

2.5 Marco Legal	46
3. Diseño Metodológico	49
3.1 Tipo de Investigación	49
3.2 Población y Muestra	49
3.2.1 Población.	49
3.2.2 Muestra.	50
3.3 Instrumentos para la Recolección de la Información.	50
3.3.1 Fuentes primarias.	50
3.3.2 Fuentes secundarias.	50
3.4 Etapas del proceso de la investigación	50
4. Resultados, Análisis y Discusión	56
4.1 Pruebas de laboratorio para tres relaciones de ceniza volante, activante y agua, que puede ser utilizada en la obtención del cemento geopolimérico	56
4.2 Síntesis del cemento geopolimérico a partir de las cenizas volantes, de acuerdo a las proporciones seleccionadas en las pruebas del laboratorio	67
4.3 Caracterización térmica y mecánica de las muestras de cemento geopolimérico obtenidas	69
4.3.1 Caracterización térmica.	69
4.3.2 Caracterización mecánica: ensayo de compresión.	75
4.3.3 Otras caracterizaciones.	93

5. Conclusiones	100
6. Recomendaciones	103
Referencias bibliográficas	104
ANEXOS	110



## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Acontecimientos históricos sobre los cementos activados con álcalis. Fuente (Li, Sun, & Li, 2010)	29
<b>Figura 2.</b> Estructura química de los poli (sialatos). Fuente: Laureano Cornejo Álvarez	36
<b>Figura 3.</b> Enlace sialato. Fuente: Laureano Cornejo	37
<b>Figura 4.</b> Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín. Fuente: (Shi, Jiménez, & Palomo, 2011)	38
<b>Figura 5.</b> Edad de ensayo de los especímenes. Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 673.	41
<b>Figura 6.</b> Esquema de los modelos de fractura típicos. Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 673.	42
<b>Figura 7.</b> Diagrama de proceso Etapa 2	53
<b>Figura 8.</b> MTPS Sensor. Sistema C-Therm. Fuente: Tomado de C-THERM TECHNOLOGIES	54
<b>Figura 9.</b> Imagen de electrones secundarios utilizada para cuantificar la composición química de las partículas esféricas de ceniza volante, usando EDS. Tomado de: Luis Rene Ortega Triana	57
<b>Figura 10.</b> Silicato de sodio utilizado	60
<b>Figura 11.</b> Moldes de PVC utilizados.	61
<b>Figura 12.</b> Presencia de carbón en muestras realizadas.	62

<b>Figura 13.</b> Ceniza volante a) antes y b) después de ser llevada a calcinación. Se evidencia el cambio de coloración en la muestra.	63
<b>Figura 14.</b> Muestras sin contenido de SiO <sub>2</sub> y sin tratamiento térmico de las cenizas <sup>2</sup> . Se puede observar las grietas en las probetas y la presencia de carbón.	64
<b>Figura 15.</b> Arena de sílice a) antes y b) después de ser pasada por el molino de bolas y tamizada.	65
<b>Figura 16.</b> Mezcla vaciada en los moldes.	68
<b>Figura 17.</b> Muestras en proceso de secado por el método CCM.	68
<b>Figura 18.</b> Probetas al salir de la estufa de secado.	69
<b>Figura 19.</b> Interfaz del C-Therm mientras se realiza la prueba.	72
<b>Figura 20.</b> Moldes de PVC usados para realizar los especímenes para el ensayo de compresión.	76
<b>Figura 21.</b> Muestras que se iban a usar para el ensayo de compresión en curado CCM.	77
<b>Figura 22.</b> Resultados ensayo de compresión.	89
<b>Figura 23.</b> Imágenes de los ensayos de compresión.	90
<b>Figura 24.</b> Grafico comparativo de resultados prueba de resistencia a la compresión.	92
<b>Figura 25.</b> Muestras en recipientes con agua para determinar la cantidad de agua absorbida.	95
<b>Figura 26.</b> Probetas de cemento Portland, utilizadas para medir la densidad aparente.	98

## Lista de Tablas

Tabla 1. Composición química por elementos.	58
Tabla 2. Resultados obtenidos en los ensayos de conductividad térmica (W/m K) para muestras secadas a 60°C.	72
Tabla 3. Resultados obtenidos en el ensayo de conductividad térmica (W/m  K) para muestras secadas a 95°C.	73
Tabla 4. Resultados de conductividad térmica (W/mK) para materias primas.	75
Tabla 5. Diametro y area de las probetas	77
Tabla 6. Resultados ensayo de compresión Probeta 1	78
Tabla 7. Resultados ensayo de compresión Probeta 2	79
Tabla 8. Resultados ensayo de compresión Probeta 3	80
Tabla 9. Resultados ensayo de compresión Probeta 4	81
Tabla 10. Resultados ensayo de compresión Probeta 6	82
Tabla 11. Resultados ensayo de compresión Probeta 7	83
Tabla 12. Resultados ensayo de compresión Probeta 8	84
Tabla 13. Resultados ensayo de compresión Probeta 9	85
Tabla 14. Resultados ensayo de compresión Probeta 10	86
Tabla 15. Resultados ensayo de compresión Probeta 11	87
Tabla 16. Resultados ensayo de compresión Probeta 12	88
Tabla 17. Resultados del valor de la presión	91

Tabla 18. Resultados para la efusividad para el secado a 60°C	94
Tabla 19. Resultados para la efusividad para el secado a 95°C	94
Tabla 20. Valores de masa seca, húmeda y porcentaje de absorción de agua.	96
Tabla 21. Densidad aparente (g/mm <sup>3</sup> ) del material.	96
Tabla 22. Valores de la densidad aparente en kg/m <sup>3</sup> del material	97
Tabla 23. Densidad aparente en kg/m <sup>3</sup> para probetas de cemento.	98

## **Lista de anexos**

Anexo 1. Resultados ensayo de conductividad a muestras sintetizadas.	111
Anexo 2. Resultados ensayo de conductividad a materia prima.	123

## **Introducción**

En la central de la termoeléctrica de Termotasajero lleva a cabo la generación de 4 clases de energía: la energía química, la cual se desarrolla en la caldera a partir de la reacción exotérmica del oxígeno (presente en el aire) y el combustible; la energía térmica, donde el calor producido por la caldera es absorbido por el agua y transformado en vapor con un gran contenido entálpico; la energía mecánica, la cual se desarrolla a partir de la energía térmica la cual mueve la turbina de manera constante; y por último la energía eléctrica, que por medio de la energía mecánica se transforma en energía eléctrica y distribuida a los centros de consumo. La central utiliza como materia prima el carbón bituminoso el cual posee bajos niveles de ceniza y azufre y es suministrado por aproximadamente 75 minas alrededor de la central (Termotasajero, 2008).

“Teniendo en cuenta que por cada tonelada de carbón que se quema, se produce aproximadamente unos 220 kg de cenizas volantes, la combustión de carbón origina problemas ambientales debido a la acumulación de cenizas volantes en grandes depósitos” (Ortega Triana, 2014). Las cenizas volantes que resultan de la quema solo son utilizadas en la región como agregado en las plantas de producción de cemento tipo Portland. El cemento Portland es el material de la construcción más usado, pero su producción trae consigo una gran contaminación debido a la elevada cantidad de CO<sub>2</sub> que se genera, especialmente, en la descarbonatación de la caliza, material fundamental en su elaboración.

En su afán por desarrollar políticas que ayuden a la conservación y protección del medio ambiente, muchos países han optado por nuevas leyes ambientales. Estas nuevas políticas han impulsado el desarrollo y la investigación de nuevos materiales que, a diferencia del cemento tipo Portland, no tenga tantos efectos nocivos para el medio ambiente y adicionalmente pueda ser

fabricado utilizando los desechos de otros procesos productivos, como lo es las cenizas volantes de la combustión del carbón.

Las cenizas volantes activadas alcalinamente hacen parte de una nueva generación de cementos producidos a partir de desechos como los residuos de la quema del carbón, la escoria de alto horno, desechos de la industria de la construcción, entre otros, los cuales poseen características y propiedades muy interesantes y que se asemejan y en ocasiones mejoran, las características del cemento tipo Portland tradicional (propiedades mecánicas, de adherencia y duración). Este nuevo tipo de cementos ayudarían a reducir la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera y daría un nuevo uso a los residuos de otras industrias productivas primarias.

Por lo anterior, se tuvo por objeto en la siguiente investigación conocer características y propiedades del cemento geopolimérico obtenido por activación alcalina de las cenizas de la combustión del carbón provenientes de la central termoeléctrica de Termotasajero, con el fin de encontrar un nuevo uso a los residuos de la combustión allí producidos y a su vez, contribuir a la investigación de nuevos materiales amigables con el medio ambiente; utilizando silicato de sodio como activador alcalino y buscando las mejores proporciones de acuerdo a resultados obtenidos por diferentes investigadores del mundo en cuanto a la relación de los materiales que involucra la preparación del cemento geopolimérico.

## **1. El Problema**

### **1.1 Título**

Obtención y caracterización de un cemento geopolimérico sintetizado a partir de ceniza volante de la combustión del carbón de la termoeléctrica Termotasajero.

### **1.2 Planteamiento del Problema**

Con las nuevas medidas tomadas a partir del Tratado de Kioto, muchos países se han visto en la tarea de crear leyes y modificar la legislación de sus países en temas ambientales con el fin de preservar y cuidar el medio ambiente en general. Temas como el daño en la capa de ozono preocupan a los medioambientalistas, que señalan como responsables a las grandes industrias que arrojan sus desechos al ambiente. La industria cementera hace parte de este grupo de industrias que contaminan en la fabricación de sus productos. Se estima que cerca de un 5% del CO<sub>2</sub> del mundo, es producido en la elaboración del cemento tipo Portland (Mo, Alengaram, & Jumaat, 2016).

Como respuesta a estos problemas de contaminación, investigadores a nivel mundial han buscado la manera de crear nuevos materiales cuya elaboración no genere más contaminantes para el ambiente y que a su vez puedan ser obtenidos a partir de los residuos de las industrias primarias. En la década de los 30, se conocieron las primeras investigaciones en relación de nuevos materiales que utilizaba residuos de otra industria (escoria en polvo) y un activador catalizante (Kuhl, 1951). Desde entonces, muchas investigaciones se han desarrollado en las que se varían los materiales utilizados, el agente activador de la mezcla, los porcentajes y los procedimientos que se llevan a cabo para obtener los cementos geopoliméricos. Los geopolímeros son un grupo de materiales cementantes que se sintetizan al poner en contacto materiales compuestos primordialmente de



aluminosilicatos con una solución alcalina, los cuales forman una pasta que fragua y obtiene una resistencia mecánica con el tiempo.

Los cementos geopoliméricos no tienen una formulación única y establecida, por el contrario, existen diversas formas de prepararse debido a que cada investigador usa diferentes composiciones para obtener el cemento. Se puede variar el material a usar, ya sean cenizas volantes, escoria de alto horno o incluso residuos de construcción. De la misma manera, la solución activadora no es la misma, varía desde la concentración, el pH, la composición molar del activador, e incluso se puede añadir un hidróxido para darle nuevas características. Por esta misma razón, todas y cada una de las investigaciones pueden llegar a tener resultados diferentes aun cuando sean muy similares en los materiales y los procedimientos realizados. Para la presente investigación se quiere conocer las características mecánicas y térmicas del cemento geopolimérico, a base de las cenizas volantes de la combustión del carbón de Termotasajero y con un determinado activador alcalino, el cual se definirá al hacer la revisión del estado del arte.

Los resultados que se obtuvieron en la caracterización del cemento geopolimérico pueden dar una nueva solución al uso de las cenizas volantes que quedan de la combustión del carbón en la termoeléctrica, así mismo, se podría desarrollar un nuevo tipo de cemento que permita reducir la producción del cemento tipo Portland y con esto disminuir la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera a la atmosfera cuando se fabrica este tipo de cemento.

### **1.3 Formulación del Problema**

¿Qué características térmicas y mecánicas se podrán obtener de los cementos geopoliméricos sintetizados a partir de ceniza volante de la combustión del carbón la central termoeléctrica de Termotasajero?

## **1.4 Justificación**

Como se pudo evidenciar en los resultados obtenidos en el trabajo de grado “CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y TÉRMICA DE LAS CENIZAS VOLANTES PROVENIENTES DE LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN” (Ortega Triana, 2014), la incidencia de los aluminosilicatos presentes en la fase Mullita de las cenizas de la combustión de carbón, se pueden elaborar pastas cementantes geopoliméricas, las cuales pueden ser usadas a altas temperaturas.

### **1.4.1 A nivel empresa-ambiental.**

El desarrollo de cementos geopoliméricos puede generar en Termotasajero un nuevo programa de protección al medio ambiente, al poder reutilizar los desechos producidos en la combustión del carbón bituminoso que se emplea en la caldera, de esta manera, reduciría el impacto ambiental por el desarrollo de las actividades de generación de energía en la termoeléctrica. Adicional a esto, se podría dar un nuevo segmento de materiales amigables con el medio ambiente, ya que las empresas cementeras estarían involucradas en desarrollar un nuevo tipo de producto (el cemento geopolimérico) con lo cual se reduciría la cantidad de cemento tipo Portland que se fabrica en estas, disminuyendo la cantidad de CO<sub>2</sub> que se expulsa al ambiente al producirse dicho cemento.

### **1.4.2 A nivel del estudiante.**

La investigación de nuevos materiales cuyos procesos de obtención no genere una problemática medio ambiental y que a su vez tenga un aprovechamiento de los subproductos de la combustión del carbón a través del estudio y el desarrollo de cementos geopoliméricos, permitirá el crecimiento académico e intelectual en áreas específicas (química, ingeniería de materiales), basados en la

aplicación de los conocimientos adquiridos de los investigadores a partir de la formación académica recibida.

### **1.4.3 A nivel institucional**

Este tipo de proyectos permitirá a la universidad poder generar conocimiento propio en el desarrollo de proyectos que puedan ser escalados a nivel industrial, permitiendo la generación de productos de base tecnológica para el Plan de estudios y la UFPS, contribuyendo al proceso de acreditación institucional. Así mismo, contribuir a la línea de investigación en caracterización de materiales del grupo de investigación y semillero GIFIMAC de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Obtener y caracterizar un cemento geopolimérico sintetizado a partir de ceniza volante de la combustión del carbón de la termoeléctrica Termotasajero.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Realizar pruebas de laboratorio para tres relaciones de ceniza volante, activante y agua, que puede ser utilizada en la obtención del cemento geopolimérico.
- Sintetizar el cemento geopolimérico a partir de las cenizas volantes, de acuerdo a las proporciones seleccionadas en las pruebas del laboratorio.
- Caracterizar térmica y mecánicamente las muestras de geopolímeros obtenidos.

## **1.6 Alcances y Limitaciones**

### **1.6.1 Alcance.**

El presente trabajo se desarrolló teniendo en cuenta investigaciones previas sobre cemento geopoliméricos con el fin de establecer la relación de los materiales utilizados para llegar a conformar dicho material, para esto se tuvo en cuenta diversas literaturas y procedimientos con el fin de recolectar los métodos que sean necesarios e inherentes a esta investigación. Se desconocen los porcentajes en pesos de los óxidos presentes en las cenizas volantes, por tal razón se trabajó con los porcentajes en peso de cada elemento.

### **1.6.2 Limitaciones.**

La investigación estuvo sujeta a los resultados de la caracterización de las cenizas suministradas, las cuales fueron estudiadas en otros proyectos y a la veracidad de las fuentes consultadas y la fidelidad de los resultados obtenidos en el equipo que mide la conductividad térmica, así mismo como los resultados que se obtuvieron en el ensayo de compresión.

## 2. Marco Referencial

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 A nivel regional.

Título: Caracterización estructural y térmica de las cenizas volantes provenientes de la combustión de carbón.

Autor: Luis Rene Ortega Triana

Institución: Universidad Francisco De Paula Santander

Ciudad: Cúcuta

Año: 2014

Resumen: Se reporta la caracterización morfológica y estructural de polvos de cenizas volantes obtenidos de la combustión de carbón, suministrados por la Central Termoeléctrica

Termotasajero S.A. El estudio morfológico consistió en el análisis superficial mediante el uso de microscopía electrónica de barrido (MEB). La composición química elemental fue hallada usando los espectros de dispersión de energías de rayos X (EDS-MEB), mientras que la caracterización estructural se llevó a cabo por difracción de rayos X (DRX). Para la distribución del tamaño de partícula se usó el software Image Tool V. 3.0. Los resultados obtenidos muestran que los polvos de cenizas volantes están formados por partículas mayoritariamente esféricas (cenosferas y plerosferas), así como de partículas de inquemados adheridas a las partículas de ceniza, con tamaño de partícula promedio del orden de micrómetros. El estudio estructural, para el cual se utilizó DRX, reporta las fases cristalinas mayoritarias de la mullita, cuarzo y hematita.

Nuestros resultados permitirán evaluar los procesos de combustión del carbón de la Central Termoeléctrica de Termotasajero, así como otros usos o aplicaciones a dichas cenizas.

Título: Síntesis y caracterización de zeolitas a partir de cenizas volantes provenientes de la combustión del carbón en la termoeléctrica Termotasajero S.A.S por el método de hidrogel.

Autor: Edgar Farid Carreño Flórez

Institución: Universidad Francisco De Paula Santander

Ciudad: Cúcuta

Año: 2018

Resumen: Las cenizas volantes (CV) de Termotasajero S.A.S, son un residuo de la combustión del carbón, creadas en el proceso de generación de energía de la termoeléctrica; se clasifican de acuerdo a la norma ASTM C618, con propiedades puzolánicas clase F, las cuales, por sus características físicoquímicas y por su impacto ambiental sobre los ecosistemas el aire, el agua y los suelos, se han implementado por parte de las industrias Termoeléctricas, en procesos en la adición de cenizas al hormigón, manufactura de cemento Portland, terraplenes y rellenos, como parte de la mitigación del daño que estas causan. Las mismas se convierten en un material con aprovechamiento eficiente en la producción de zeolitas. Con el objeto de producir zeolitas de alta pureza, se realizó tamizado de las CV, en donde se determinó que el tamiz No. 400 con granulometría entre 25  $\mu\text{m}$  y 38  $\mu\text{m}$ , presentaba color más claro, por lo tanto, menor concentración de inquemados. Previo a la síntesis de zeolitas se efectuó lixiviación en sistema abierto durante 300 minutos, a fin de disminuir o eliminar elementos mayoritarios de metales (níquel, zirconio) presentes en la CV. El proceso de síntesis por el método de hidrogel, se desarrolló con activación de álcalis de hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de potasio (KOH), durante 2 h y 3 h de activación, respectivamente, 560 rpm, 90 °C, en autoclave a 15 Psi, 30 min, 120 °C, lavado con

agua desionizada, y secado durante 5 h a 105 °C, se logró la conversión de zeolitas que podrían clasificarse de acuerdo al tipo de estructura en zeolitas filipsita, faujasita y analcima. Las muestras se caracterizaron químicamente mediante Espectroscopía de Rayos X (EDS); tanto las zeolitas ZEONa y ZEOK presentaron elementos mayoritarios de silicio (Si) y Aluminio (Al), con relación baja Si/Al 1-3 de acuerdo a la clasificación de Meier, W.M. 1968. Mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se identificó que las ZEONa presenta granulometría irregular con agrupación de microcristales en forma semicircular, comprendida en un rango de 4,94  $\mu\text{m}$  y 11,66  $\mu\text{m}$  y, las ZEOK tamaños de partícula con valores entre 2,65  $\mu\text{m}$  y 11,87  $\mu\text{m}$  con morfología irregular, no esféricas completamente, ambas muestras en presencia de material amorfo y otras fracciones aciculares. Las zeolitas producidas presentaron una alta Capacidad de Intercambio Cationico (CIC); los valores más elevados para cada una de las muestras, respectivamente de ZEONa y ZEOK, son de 141 meq/100 g y 111,7 meq/100 g.

### **2.1.2 A nivel nacional.**

Título: Obtención y caracterización de geopolímeros sintetizados a partir de la escoria granulada de alto horno como uso alternativo del cemento portland.

Autor: Arnold Giuseppe Gutiérrez Torres

Institución: Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá

Ciudad: Bogotá

Año: 2017

Resumen: Como parte del compromiso frente a la protección del medio ambiente y el interés en la aceptación y utilización de materiales conglomerantes alternativos al cemento Portland, que permitan el aprovechamiento de los residuos industriales y el avance en el conocimiento de la

activación alcalina, se presenta el siguiente trabajo, que consiste en identificar el tipo de solución activante y la dosificación que arroje los mejores resultados de resistencia a compresión en morteros. Para ello, se utilizaron como activantes hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) de origen industrial y la combinación de ambos. Como precursor la escoria granulada de alto horno (EGAH) de producción nacional. Una vez optimizado los materiales a usar se modificaron las condiciones de curado para identificar su influencia, de igual forma, las muestras se sumergieron en agua salada, sulfatada, destilada y la que suministra el acueducto con el fin de medir su deterioro frente a ciertos ambientes.

Se midió el calor generado por las pastas activadas en un calorímetro semi-adiabático y se intentó correlacionar los resultados con la microscopia electrónica de barrido, la difracción de rayos x y la impedancia electroquímica. Lo anterior con el fin, de establecer los mecanismos de activación y así poder identificar en el tiempo los productos de reacción. Finalmente se elaboró un diseño de mezcla de concreto con la mejor dosificación y se midió la penetración del ion cloruro por el método RCPT. Los resultados asociados con la resistencia y durabilidad suministraron información que permitió caracterizar mejor este material.

Título: Nuevos cementantes con baja huella de carbono basados en puzolanas naturales colombianas de tipo volcánico.

Autor: Dra. Ruby Mejía de Gutiérrez

Institución: Universidad del Valle

Año: 2016

Resumen: El 0.84% de los suelos en regiones tropicales del mundo están compuestos por cenizas volcánicas, y en Colombia ocupan cerca del 11.6% del territorio nacional y se localizan en las



zonas de mayor crecimiento demográfico y económico, particularmente en toda la región andina, centro y sur de Colombia, se extienden desde el Eje Cafetero (departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Quindío) en el centro del país, hasta los departamentos de Tolima, Cauca y Nariño hacia el sur oeste del mismo. Cabe anotar que, la investigación acerca de la utilización de las puzolanas naturales en los procesos cementicios, tanto para el desarrollo de cementos adicionados así como de los nuevos cementos de activación alcalina, ha ido en incremento debido a la versatilidad de uso, fácil adquisición, y ventajas medioambientales que otorgan en su procesamiento. En general, en el caso de adición al cemento se recomienda la utilización de un porcentaje del orden máximo del 30% mientras que la utilización en cementantes alcalinos muestra la posibilidad de usar mayor proporción en la mezcla e incluso invertir esta proporción en aquellos cementantes denominados híbridos, es decir producir materiales cementantes donde la cantidad de cemento máxima puede estar cercana al 20% o menos, privilegiando así el consumo de la puzolana natural. Con base en esto, el proyecto se propuso como Objetivo: Desarrollar y evaluar un cementante de tipo geopolimérico híbrido mediante la técnica de activación alcalina (geopolimerización) aplicada a una puzolana natural de naturaleza volcánica y plantear la factibilidad de emplear este tipo de material en la construcción civil con criterios de sostenibilidad técnica, social y ambiental.

### **2.1.3 A nivel internacional.**

Título: Properties of fly ash and metakaolín based geopolymer panels under fire resistance tests (Propiedades de paneles geopoliméricos a base de ceniza volante y metacaolín sometidos a pruebas de resistencias de fuego)

Autor: Y. Luna-Galiano, A. Cornejo, C. Leiva, L.F. Vilches, C. Fernández-Pereira

Institución: Universidad de Sevilla

Ciudad: Sevilla, España

Año: 2014

Resumen: Este documento presenta los resultados de un estudio sobre el efecto del fuego sobre pastas de geopolímeros compuestas de cenizas volantes, metacaolín y silicato sódico. Con la pasta obtenida se han rellenado paneles de dimensiones 2 cm de espesor, 28 cm de altura y 18 cm de ancho. Tras 28 días de curado a 20 °C y un 45% de humedad relativa, diferentes ensayos fueron realizados en los geopolímeros obtenidos: fisicoquímicos (densidad, absorción de agua, porosidad), mecánicos (resistencia a compresión y a flexión), de resistencia al fuego y medioambientales (lixiviación y radioactividad). Los paneles fabricados han sido comparados con paneles comerciales para determinar las posibilidades de reciclaje de las cenizas volantes para la fabricación de nuevos productos geopoliméricos con propiedades aislantes al fuego. Los paneles obtenidos pueden ser utilizados para la producción de paredes interiores, con buenas propiedades físicas, mecánicas y de resistencia al fuego sin ningún problema medioambiental.

Título: Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers (Desarrollo de un hormigón geopolímero basado en cenizas volantes con desechos de construcción y demolición como áridos en barreras acústicas)

Autor: C. Arenas, Y. Luna-Galiano, C. Leiva, L.F. Vilches, F. Arroyo, R. Villegas, C. Fernández-Pereira

Institución: Universidad de Sevilla

Ciudad: Sevilla, España

Año: 2015

Resumen: El presente estudio tiene como objetivo determinar y evaluar la aplicabilidad de un nuevo producto que consiste en un hormigón poroso geopolimérico a base de cenizas volantes con residuos de construcción y demolición como agregados en el campo de las barreras de ruido de las carreteras. En este trabajo se analizaron las principales propiedades físicas, mecánicas y acústicas de un concreto geopolimérico basado en cenizas volantes. Para desarrollar una matriz porosa que absorba la energía del sonido, se estudiaron dos agregados diferentes, granito triturado (generalmente utilizado en hormigones) y residuos de construcción y demolición. Los hormigones geopoliméricos se prepararon utilizando silicato de sodio e hidróxido de sodio en dos proporciones diferentes para estudiar la influencia de la relación  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  en las propiedades. También se estudió la relación geopolímero / agregado. Los residuos de construcción y demolición utilizados como agregados en hormigones porosos geopoliméricos presentan mejores propiedades mecánicas y acústicas que los agregados de granito triturado en hormigones geopoliméricos. La solución activadora en la geopolimerización de las cenizas volantes tiene una influencia significativa en las propiedades mecánicas principalmente, pero no en las propiedades acústicas. Desde un punto de vista ambiental, el uso de cenizas volantes y residuos de construcción y demolición en estos materiales no presenta ningún problema de lixiviación.

## **2.2 Marco Contextual**

La presente investigación se llevara a cabo en las instalaciones de la Universidad Francisco De Paula Santander – Sede Cúcuta, más específicamente en los laboratorios del Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada (GIFIMAC), durante un periodo de 3 meses a partir de la fecha de aprobación del mismo.

### 2.3 Marco Teórico

El concepto de geopolímeros no es algo tan reciente como se cree. Hace poco menos de un siglo apareció la primera investigación sobre el tema con H. Kùlh en 1930, cuando investigó el comportamiento del fraguado de una mezcla de escoria en polvo y una solución de potasa cáustica (Kuhl, 1951). Desde entonces se han venido haciendo grandes aportes con el paso de los años, los cuales están registrados en la Ilustración 1, la cual muestra una línea del tiempo de los aportes e investigaciones más destacadas. Lo más reciente ha sido un informe presentado por el Comité Técnico de la RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures) sobre materiales activados alcalinamente (TC 224-AAM) en el cual se representa y se analiza el estado de arte en la tecnología de la activación alcalina, se adelantan recomendaciones de normalización de acuerdo con el conocimiento actual y se priorizan las aplicaciones relacionadas con la construcción (Provis & van Deventer, 2014).

Author	Year	Significance
Feret	1939	Slags used for cement.
Purdon	1940	Alkali–slag combinations.
Glukhovskiy	1959	Theoretical basis and development of alkaline cements.
Glukhovskiy	1965	First called “alkaline cements”.
Davidovits	1979	“Geopolymer” term.
Malinowski	1979	Ancient aqueducts characterized.
Forss	1983	F-cement (slag–alkali–superplasticizer).
Langton and Roy	1984	Ancient building materials characterized.
Davidovits and Sawyer	1985	Patent of “Pyrament” cement.
Krivenko	1986	DSc thesis, $R_2O-RO-SiO_2-H_2O$ .
Malolepsy and Petri	1986	Activation of synthetic melilite slags.
Malek et al.	1986	Slag cement–low level radioactive wastes forms.
Davidovits	1987	Ancient and modern concretes compared.
Deja and Malolepsy	1989	Resistance to chlorides shown.
Kaushal et al.	1989	Adiabatic cured nuclear wastes forms from alkaline mixtures.
Roy and Langton	1989	Ancient concretes analogs.
Majundar et al.	1989	$C_{12}A_7$ –slag activation.
Talling and Brandstetr	1989	Alkali-activated slag.
Wu et al.	1990	Activation of slag cement.
Roy et al.	1991	Rapid setting alkali-activated cements.
Roy and Silsbee	1992	Alkali-activated cements: an overview.
Palomo and Glasser	1992	CBC with metakaolin.
Roy and Malek	1993	Slag cement.
Glukhovskiy	1994	Ancient, modern and future concretes.
Krivenko	1994	Alkaline cements.
Wang and Scivener	1995	Slag and alkali-activated microstructure.
Shi	1996	Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag.
Fernández-Jiménez and Puertas	1997	Kinetic studies of alkali-activated slag cements.
Katz	1998	Microstructure of alkali-activated fly ash.
Davidovits	1999	Chemistry of geopolymeric systems, technology.
Roy	1999	Opportunities and challenges of alkali-activated cements.
Palomo	1999	Alkali-activated fly ash – a cement for the future.
Gong and Yang	2000	Alkali-activated red mud–slag cement.
Puertas	2000	Alkali-activated fly ash/slag cement.
Bakharev	2001–2002	Alkali-activated slag concrete.
Palomo and Palacios	2003	Immobilization of hazardous wastes.
Grutzeck	2004	Zeolite formation.
Sun	2006	Sialite technology.
Duxson	2007	Geopolymer technology: the current state of the art.
Hajimohammadi, Provis and Deventer	2008	One-part geopolymer.
Provis and Deventer	2009	Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications.

**Figura 1.** Acontecimientos históricos sobre los cementos activados con álcalis. Fuente (Li, Sun, & Li, 2010)

### 2.3.1 Residuos de la combustión del carbón en una termoeléctrica.

Una central termoeléctrica es una instalación que produce energía eléctrica a partir de la combustión de combustibles fósiles, tales como: petróleo y sus derivados; gas natural; carbón; y biomasa (Superintendencia del Medio Ambiente, 2014) . En general, una central típica se compone

de: una caldera, donde se produce la combustión; una turbina o motor de calor, que transforma la energía térmica proveniente de la combustión en energía mecánica; y un generador, que convierte la energía mecánica en energía eléctrica.

Las plantas de energía térmica de combustión de carbón y biomasa son las que generan más cantidad de residuos sólidos debido al porcentaje relativamente elevado de cenizas presentes en estos combustibles. Los principales residuos sólidos que genera la combustión de carbón, en cuanto a volumen, corresponden a las cenizas, que pueden ser de dos tipos: volantes y de fondo. Las cenizas volantes, que constituyen la mayor parte de cenizas que generan este tipo de centrales (en general, alrededor de un 80% del total de cenizas), se generan por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos presentes en los gases de combustión. En tanto, las cenizas de fondo son aquellas que se acumulan en la parte inferior de la caldera, conteniendo escoria y partículas más gruesas y pesadas que las cenizas volantes, razón por la cual también se les conoce como escorias de fondo. Si bien las cenizas de combustión pueden contener una amplia gama de compuestos químicos (óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio), generalmente, no son considerados residuos peligrosos. Adicionalmente, las centrales que emplean carbón generan residuos sólidos en el proceso de desulfuración de gases de combustión, el cual se realiza para disminuir las emisiones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). En general, el volumen generado de yeso equivale a un 25% del volumen de cenizas resultantes, aproximadamente. De este modo, el principal impacto asociado a la generación de cenizas y yeso es el volumen resultante, para lo cual se requiere habilitar sitios para su disposición final. Por su parte, las centrales que utilizan diésel y gas para la combustión, prácticamente, no generan este tipo de residuos sólidos, independientemente de la tecnología empleada (Superintendencia del Medio Ambiente, 2014).

### **2.3.2 Cenizas volantes: clases y composición química.**

Las cenizas son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas. Los productos de esta combustión se subdividen en cenizas volantes y de hogar. Los primeros, son residuos volátiles obtenidos a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera (Ossa & Jorquera, 1984). La norma ASTM C 125 (ASTM International, 2001) define las cenizas volantes como el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de tierra o carbón en polvo y que se transporta por los gases de combustión de la zona de combustión al sistema de eliminación de partículas.

La propiedad puzolánica está indicada por la manera y la rapidez con que el sílice de la ceniza volante se combina con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento tipo Portland (Corona Zazueta, 1997).

La composición química de la ceniza volante según la norma ASTM C 618 (ASTM, 2014) exige primordialmente un mínimo de 70% de óxidos principales, tales como los de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y un máximo de 5% de sulfatos, como trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). La mayor influencia en la composición química de las cenizas volantes proviene del tipo de carbón. La combustión del carbón sub-bituminoso contiene más calcio y menos hierro que las cenizas volantes del carbón bituminoso. Las características físicas y químicas dependen de los métodos de combustión, la fuente de carbón y la forma de las partículas.

Las composiciones químicas de varias cenizas volantes muestran una amplia gama, lo que indica que existen amplias variaciones en el carbón utilizado en las centrales eléctricas de todo el mundo. Las cenizas volantes que resultan de la quema de carbones sub-bituminosos se conocen como cenizas volantes ASTM Clase C o cenizas volantes con alto contenido de calcio, ya que típicamente contiene más del 20% de CaO. Por otro lado, las cenizas volantes de las brasas bituminosas y

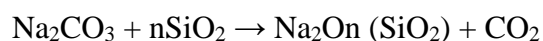
antracitas se denominan cenizas volantes ASTM Clase F o cenizas volantes con bajo contenido de calcio. Consiste principalmente en un vidrio de aluminosilicato y tiene menos del 10 por ciento de CaO. El color de las cenizas volantes puede ser de color canela a gris oscuro, dependiendo de los componentes químicos y minerales (Hardjito & Rangan, 2005).

De lo anteriormente mencionado, se puede deducir y clasificar las cenizas producidas por Termotasajero como clase F, debido a que son el producto de la quema de carbón bituminoso (carbón que es empleado por la termoeléctrica en la caldera).

### **2.3.3 Solución activadora: Silicato de sodio.**

La activación alcalina es un proceso químico en el que un material rico en aluminio y sílice, natural o artificial, es mezclado con un activador alcalino, disolución altamente alcalina ( $\text{pH} > 7$ ), para producir una pasta que se puede endurecer en un tiempo muy corto. Los activadores tienen la función de acelerar la solubilización de la fuente de aluminosilicato, favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura compacta con estos hidratos (Gutierrez Torres, 2017).

Los Silicatos de Sodio también conocidos como vidrios solubles, son sustancias inorgánicas compuestas primordialmente por Óxido de Silicio ( $\text{SiO}_2$ ) y Óxido de Sodio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Estos compuestos se producen mediante la fusión del carbonato de sodio y el dióxido de silicio (arena sílica de alta pureza) (Silicatos Especiales, 2016):





Los activadores alcalinos son el segundo componente esencial en el desarrollo de los cementos alcalinos. Estos activadores se suelen incluir en la mezcla como una disolución, aunque también se pueden incorporar en estado sólido, bien mezclado o integrado con la escoria y/o ceniza.

Generalmente, los activadores más empleados suelen ser hidróxidos y silicatos alcalinos. Sin embargo, la naturaleza de los activadores juega un papel muy importante en el proceso de activación tanto en escorias como en cenizas volantes, siendo el efecto del pH y la influencia de los cationes-aniones unos parámetros a considerar.

#### ***2.3.3.1 Efecto del pH.***

El papel más crítico del activador alcalino en un material activado alcalinamente es el disolver el aluminosilicato y acelerar la reacción, lo cual se consigue mediante la generación de un pH elevado. Los silicatos e hidróxidos alcalinos son los que generan los valores de pH más elevados, mientras que los carbonatos y sulfatos generan condiciones moderadamente alcalinas y generan hidróxido libre para el proceso de activación a través de reacciones que implican el calcio de la escoria.

En términos generales, el pH de las disoluciones activadoras tiene que ser superior a 11.5. Valores óptimos para la activación de escorias vítreas de horno alto están alrededor de 13-13.6. Además, el efecto del pH en la activación de las escorias tiene una dependencia muy elevada del tipo de activador, debido a que la solubilidad del calcio disminuye a pH más altos mientras que la sílice y alúmina aumentan sus solubilidades. Aunque las disoluciones activadoras de NaOH tienen un valor de pH mayor que las disoluciones de silicato sódico en concentraciones de álcalis similares, cantidades comparables de escoria que reaccionan en presencia de cada uno de los tipos de activadores, provoca que los silicatos desarrollen una mayor resistencia mecánica que en los sistemas activados con NaOH. Esto es una consecuencia de una fuente adicional de silicato en

dichos sistemas que reaccionan con los cationes  $\text{Ca}^{2+}$  procedentes de la escoria disuelta, formando productos de reacción densos (gel C-S-H) (Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

Los activadores óptimos que generalmente se emplean en la activación de aluminosilicatos con bajos contenidos en calcio (cenizas volantes) son aquellos que posean valores de pH similares al de una disolución de NaOH 8M. Una menor alcalinidad afecta negativamente a las propiedades mecánicas de los cementos debido a que la fuerza iónica generada en el sistema activador-aglutinante no es lo suficientemente elevada como para hidrolizar satisfactoriamente el silicio y el aluminio presentes en el material de partida (Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

### ***2.3.3.2 Efecto de los silicatos.***

Criado et al. (2008), estudiaron el efecto de diferentes grados de polimerización del activador (en proporciones de  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0.17, 0.60$  y  $1.90$ ) en los productos de reacción intermedios generados durante la activación de las cenizas volantes. Observaron que este parámetro jugaba un papel fundamental en la cinética, la estructura y composición del gel inicial formado y que la adición de la sílice soluble afectaba a los intermedios de reacción, pero no al producto final. Señalaron que la relación Si/Al no aumentaba indefinidamente en el gel N-A-S-H y encontraron que los valores óptimos eran en torno a 2, hacia el cual el sistema tiende independientemente de las condiciones iniciales, posiblemente por razones de estabilidad termodinámica. Además, propusieron que el efecto de una sílice altamente polimerizada en la formación del gel N-A-S-H podría afectar a la cinética de la reacción, provocando un retardo de la misma y la cristalización de zeolitas (Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

### **2.3.4 Síntesis del cemento geopolimérico.**

La geopolimerización es una reacción química que se produce entre un aluminosilicato y una solución alcalina activadora en condiciones ambientales normales. El contacto entre ellos da como resultado la formación de cadenas poliméricas (macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros), al reorientarse los iones en solución; esas cadenas mejoran las propiedades mecánicas del material, y la resistencia química y térmica (J. Davidovits, 2017).

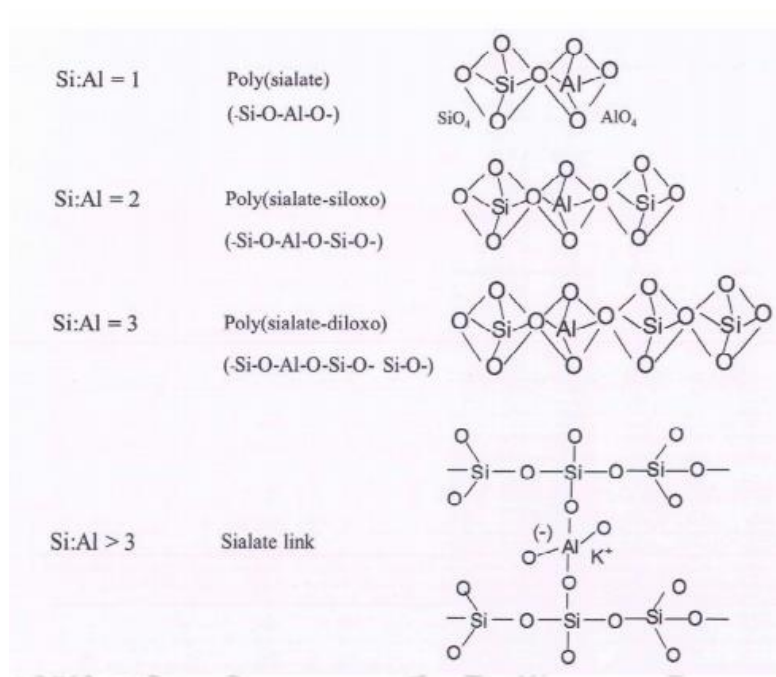
Las cadenas geopoliméricas resultan de la policondensación de iones de ortosialato; sin embargo, como hasta el momento no se ha determinado exactamente el mecanismo de reacción, se ha asumido que se trata de una síntesis que se da por medio de oligómeros que proveen estructuras unitarias a una red macromolecular tridimensional (J. Davidovits, 2017).

El mecanismo físico - químico de la geopolimerización es muy complejo, en el que las reacciones químicas exotérmicas se producen muy rápidamente, casi simultáneamente pero con una cinética interdependiente y sin producción de CO<sub>2</sub>; J. Davidovits considera que se realiza en tres etapas:

#### ***2.3.4.4 1ª Etapa: Disolución de los aluminosilicatos en una solución alcalina fuerte.***

Es la más importante; en ella se disuelven las partículas vítreas o amorfas de los aluminosilicatos y se rompen los enlaces Si - O - Si y Al - O - Si de las partículas activas de los aluminosilicatos por la acción de los iones OH<sup>-</sup> presentes en la solución alcalina y se liberan los iones Si<sup>4+</sup> y Al<sup>3+</sup> formándose una suspensión coloidal. Los óxidos de aluminio y de silicio absorben agua y se combinan con los grupos OH<sup>-</sup>; como consecuencia de la disolución se forman diversos monómeros de silicio y de aluminio. En esta primera etapa se liberan también cationes del reactivo alcalino

utilizado  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ ; éstos se unen con los aniones presentes en la solución para formar monómeros de hidróxidos de silicio y de aluminio; los hidróxidos formados se unen entre sí, por su afinidad electroquímica, por enlaces covalentes fuertes con los átomos de oxígeno y se forman grupos de tetraedros (orto-sialatos), para valores de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3=1$  (Cornejo, n.d.).



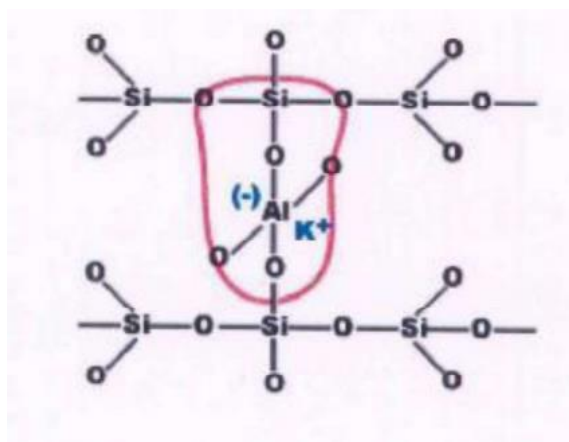
**Figura 2.** Estructura química de los poli (sialatos). Fuente: Laureano Cornejo Álvarez

#### 2.3.4.2 2ª Etapa: Reorientación de los Grupos de Iones Formados.

Se forman las macromoléculas, oligómeros con enlaces Si - O - Si (siloxonato) formando cadenas cortas por la unión de los tetraedros ( $\text{SiO}_4$ ). Los iones  $(\text{Al}(\text{OH}_4))^-$ , formados en la 1ª Etapa, se introducen en las cadenas siloxonato y forman las nuevas cadenas Si - O - Al (oligo - sialato), que se equilibran eléctricamente con la incorporación de los catones  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$ ; se inicia la geopolimerización con la aparición de estructuras oligoméricas diversas en función de la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Cornejo, n.d.).

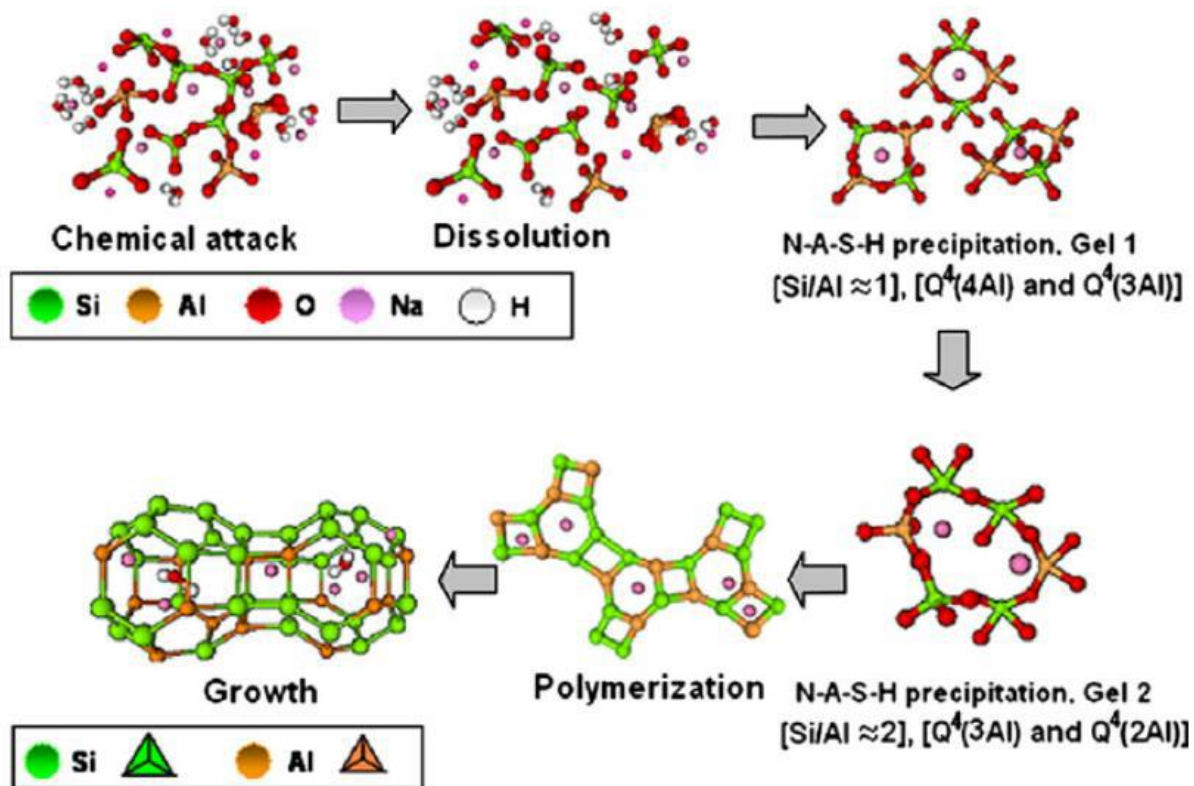
### 2.3.4.3 3ª Etapa: Policondensación.

En esta etapa se intensifica el proceso de síntesis, el sistema continúa reordenándose y reorganizándose y se incrementa la conectividad del entramado estructural del geopolímero que, finalmente, produce una estructura tridimensional amorfa o semicristalina para valores de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1 - 3$  y bidimensional amorfa para valores  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$ . Los grupos sialato evolucionan hacia formaciones estructurales más organizadas y tupidas, apareciendo las macromoléculas poli (sialato), poli (sialato - siloxo, disiloxo) estas macromoléculas constituyen la columna vertebral de los geopolímeros y forman la microestructura amorfa en la que se entremezclan diversos poli (sialatos). La fórmula química empírica del poli (sialato) puede ser expresada como:  $(\text{Na}^+, \text{K}^+) ((-\text{Si} - \text{O}_2)_z - (\text{Al} - \text{O}_2^-))_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$  (metacaolín) (Davidovits 2008);  $n$  es el grado de polimerización,  $z = 1, 2, 3, 4, 5$  es el número de unidades sialato,  $w < 3$  moléculas de agua. Cuando la concentración de silicio es alta ( $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 3$ ), se forman estructuras de cadenas  $\text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \text{O}$  unidas transversalmente por enlaces sialato.



**Figura 3.** Enlace sialato. Fuente: Laureano Cornejo

En la etapa final del proceso de geopolimerización se produce la densificación, la deshidratación, el endurecimiento rápido y el aumento de resistencia de la microestructura del material geopolímero, que actúa como un aglomerante (cemento geopolímero) que cementa las partículas sólidas presentes (Cornejo, n.d.).



**Figura 4.** Modelo esquemático del proceso de geopolimerización del metacaolín. Fuente: (Shi, Jiménez, & Palomo, 2011)

### 2.3.5 Cemento Geopolimérico.

La composición química de los cemento geopoliméricos varían de acuerdo al tipo de investigación que se realiza. No existe una naturaleza definida para estos, debido a que se pueden obtener con diferentes materiales, diferentes soluciones alcalinas y agregados. Para dar un ejemplo, un concreto geopolimérico se puede obtener, como lo se pretende en este caso, a partir de las

cenizas volantes de la combustión de una termoeléctrica y usando silicato de sodio como solución activadora; pero también se puede obtener de cenizas volantes de la combustión del carbón de otra industria, de la escoria de los altos hornos, de la mezcla entre cenizas volantes y escoria e incluso de ceniza volante con residuos de la construcción, entre otras posibles variaciones. A su vez, la solución activadora varía: puede utilizarse una solución a base de silicatos o silicatos más hidróxidos como el de sodio o el potasio. Las diferentes mezclas en los materiales confieren diferentes composiciones químicas a los cementos geopoliméricos, mas sin embargo siempre se espera encontrar una alta presencia de  $\text{SiO}_2$  y de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en una relación Si/Al de 2:1 (Joseph Davidovits, 2013).

Dentro de las posibles aplicaciones, asegura Provis (Provis & van Deventer, 2009) que la primera área de aplicación de los cementos geopoliméricos está enfocada a la reducción de las emisiones de  $\text{CO}_2$  en los materiales de la construcción como una alternativa al uso del cemento Portland tradicional. Asegura que un nuevo material de este tipo no puede ser forzado a ser introducido a un mercado reactivo. De igual manera, el autor habla de usarse como una matriz para la encapsulación de residuos en cerámicas de bajo costo.

Dentro de las ventajas que pueden llegar a ofrecer los cementos geopoliméricos con relación a los cementos tradicionales, como el tipo Portland, se encuentran:

- Más ecológicos
- Más ligeros
- Endurecimiento (el 50% en 18h.) y curado ( en 3h.) rápidos
- Fácil manipulación
- Mayor resistencia a los ácidos cloruros y sulfatos
- Reducción muy importante de las emisiones de  $\text{CO}_2$  (del 70 - 80%)

- Resistencia al ciclo hielo-deshielo
- Mayor durabilidad
- Retracción mínima
- Mayor resistencia al cal
- Resistencias a compresión similares o superiores a la de los hormigones fabricados con cemento portland (Max. 90-100 Mpa.); resistencia a flexión (10-15 Mpa.) sin adición de fibras.

### **2.3.6 Ensayos de Caracterización.**

Para la búsqueda de las características del cemento geopolimérico a base de ceniza volante de la combustión del carbón de Termotasajero, se realizaran dos tipos de ensayos, uno de tipo mecánico y otro de tipo térmico.

#### ***2.3.6.1 Ensayo de compresión.***

Con base a la Norma Técnica Colombiana (NTC) 673, denominada “Concretos, ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto” (NTC, 2010), se tiene por objeto que este método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos y el cual consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen.

La norma habla también de los especímenes usados para el ensayo, los cuales no pueden tener un diámetro individual diferente a los demás especímenes en más del 2% y cuyos extremos que no



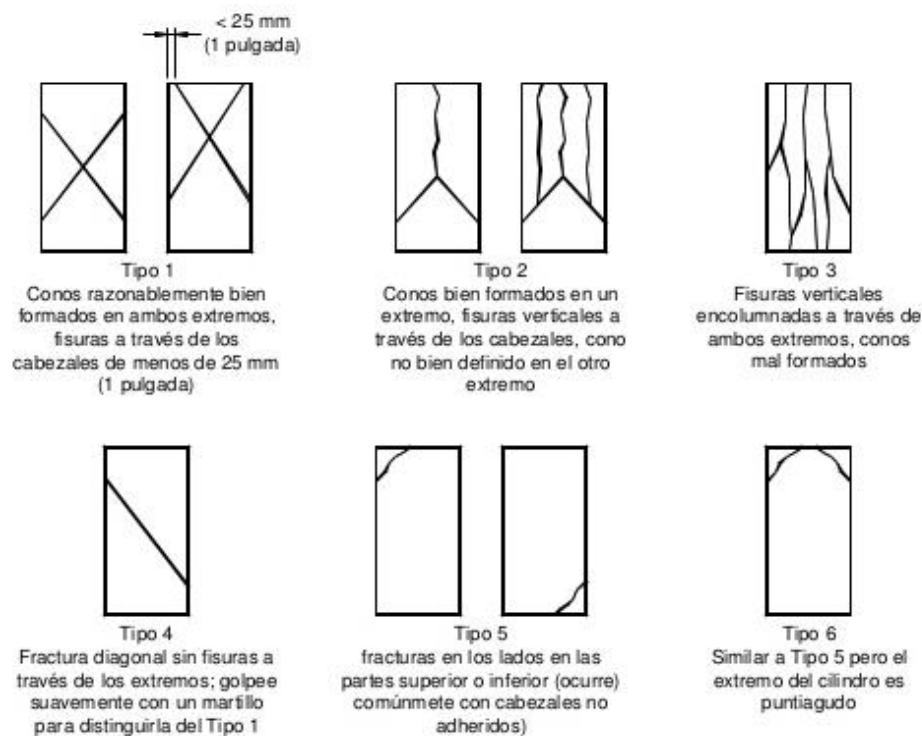
sean planos en más de 0.050 mm (0.002 pulgadas) deben ser aserrados o alineados para cumplir aquella tolerancia establecida en la norma NTC 504.

A su vez, en su capítulo de procedimiento (capítulo 7) establece que los ensayos deben realizarse tan pronto los especímenes sean sacados del almacenamiento húmedo. Todos los especímenes de ensayo para una edad de ensayo dada deben romperse dentro de las tolerancias de tiempo admisible, como sigue (NTC, 2010):

Edad de ensayo	Tolerancia admisible
24 h	$\pm 0,5$ h o 2,1 %
3 d	2 h o 2,8 %
7 d	6 h o 3,6 %
28 d	20 h o 3,0 %
90 d	2 d o 2,2 %

**Figura 5.** Edad de ensayo de los especímenes. Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 673.

La norma también muestra las fracturas típicas y atípicas que pueden sufrir los especímenes de concreto durante el ensayo y da indicaciones y parámetros acerca de los tipos de roturas y que se debe hacer en cada caso. Se muestra a continuación el esquema de las posibles fallas:



**Figura 6.** Esquema de los modelos de fractura típicos. Fuente: Norma Técnica Colombiana NTC 673.

### 2.3.6.2 Ensayo de Conductividad Térmica.

Para realizar el ensayo de conductividad térmica, se hará mediante un equipo el cual medirá no solo la conductividad térmica, sino también la efusividad térmica. El analizador de conductividad térmica C-Therm TCi (Thermal Conductor Analyzer), utiliza la técnica de Fuente de plano transitorio modificada (MTPS) para caracterizar la conductividad térmica y la efusividad de los materiales. Emplea un sensor de reflectancia de calor interfacial unilateral que aplica una fuente de calor constante momentánea a la muestra. Típicamente, el pulso de medición está entre 1 y 3 segundos. La conductividad térmica y la efusividad se miden directamente, proporcionando una descripción detallada de las propiedades de transferencia de calor del material de muestra (C-Therm Technology, 2018).

### **2.3.7 Determinación de cenizas por el método de calcinación.**

Se refiere a la determinación de las cenizas en una mufla a temperaturas que oscilan entre 500 y 600 °C. El agua y sustancias volátiles son evaporadas, mientras que las sustancias orgánicas son incineradas en presencia del oxígeno del aire para producir CO<sub>2</sub> y óxido de nitrógeno. La mayoría de los minerales son convertidos a óxidos, sulfato, fosfato, cloruro y silicato. Los elementos tales como: Fe, Se, Pb y As, pueden volatilizarse parcialmente con este procedimiento, es por ello que otros métodos se deben usar como paso preliminar para análisis elemental específico (Peña Alvarez, 2011).

## **2.4 Marco Conceptual**

- Aglomerantes: son materiales que amasados con agua tienen la posibilidad de fraguar y endurecerse (cal, yeso, arenas y cementos) y son utilizados ampliamente en la industria de la construcción para acabados, estructuras y en general todas las etapas de una construcción (Banco de la Republica, 2017).
- ASTM: ASTM o ASTM International es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios. Existen alrededor de 12.575 acuerdos voluntarios de normas de aplicación mundial. Las oficinas principales de la organización ASTM International están ubicadas en West Conshohocken, Pennsylvania, Estados Unidos, al noroeste de la ciudad de Filadelfia (ASTM, 2003).
- Ceniza volante: el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de tierra o carbón en polvo y que es transportado por los gases de combustión desde la zona de combustión hasta el sistema de remoción de partículas (ASTM International, 2001).

- **Conductancia térmica:** La Conductancia térmica es el tiempo que emplea el flujo de calor en estado estable al atravesar una unidad de área de un material o construcción inducido por una unidad de diferencia de temperatura entre las superficies del cuerpo, en  $W/m^2 \cdot K$  (Kalpakjian & Schmid, 2002).
- **Conductividad térmica:** indica la tasa a la cual el calor fluye dentro y a través del material. Los materiales con enlace metálico (metales) generalmente tienen una elevada conductividad térmica, en tanto que los materiales con enlace iónico o covalente (cerámicos y plásticos) tienen mala conductividad (Kalpakjian & Schmid, 2002).
- **Curado:** medidas adoptadas para mantener las condiciones de humedad y temperatura en una mezcla de cemento recién colocada para permitir la hidratación del cemento hidráulico y (si corresponde) las reacciones puzolánicas ocurren para que se desarrollen las propiedades potenciales de la mezcla (ASTM International, 2001).
- **Estructura cristalina:** Algunas de las propiedades de los sólidos cristalinos dependen de la estructura cristalina del material, es decir, de la forma en que átomos, iones y moléculas están ordenados en el espacio. Existe una cantidad muy grande de estructuras cristalinas diferentes que tienen, todas ellas, orden atómico de largo alcance; estas estructuras varían desde las relativamente simples de los metales a las excesivamente complejas, presentes en algunos materiales cerámicos y poliméricos (Callister, 2009).
- **Hormigón:** un material compuesto que consiste esencialmente en un medio de unión dentro del cual se encuentran partículas incrustadas o fragmentos de agregado; En el cemento de cemento hidráulico, el aglomerante se forma a partir de una mezcla de cemento hidráulico y agua (ASTM International, 2001).

- **Material cementoso:** un material inorgánico o una mezcla de materiales inorgánicos que establece y desarrolla resistencia por reacción química con agua por formación de hidratos y es capaz de hacerlo bajo el agua (ASTM International, 2001).
- **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; con esta temperatura se hace una transformación de su estructura cristalina al romper los enlaces de Van der Waals (OH- ) que unen los tetraedros de sílice, SiO<sub>2</sub>, y los octaedros de alúmina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, es decir, al perder el agua combinada por la acción térmica se destruye la estructura cristalina del caolín (Restrepo, Restrepo, & Tobon, 2006).
- **Monómero:** Los monómeros son moléculas pequeñas o simples que constituyen la unidad estructural básica o esencial de moléculas más grandes o complejas denominadas polímeros. Monómero es una palabra de origen griego que significa mono, uno y mero, parte. A medida que un monómero se une con otro, se forma un dímero. Al unirse éste a su vez con otro monómero, forma un trímero, y así sucesivamente hasta formar cadenas cortas llamadas oligómeros, o cadenas más largas que son los denominados polímeros (Bolívar ).
- **Orto-sialato:** o también llamados nesosilicatos, son una división de minerales de la clase silicatos compuestos por átomos de silicio y oxígeno unidos por enlace covalente, con uniones iónicas con cationes muy diversos, produciendo los distintos minerales que componen esta familia (Wikipedia, 2017).
- **Resistencia térmica:** es la oposición que presenta un cuerpo al paso del flujo calorífico. Este concepto es muy utilizado a la hora de calcular las pérdidas caloríficas que se producen en una edificación.

- Siloxano: Compuesto oligomérico o polimérico con unidades de repetición de Si-O (siloxano). Inherentemente resiste a los rayos UV, calor y a la degradación oxidativa. Las siliconas pueden ser manufacturadas como fluidos lineales, polímeros funcionales y resinas, variando su estructura, peso molecular y uniones, pueden hacerse miles de productos de mucha utilidad (Calderon Rodriguez, 2011).
- Zeolita: Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos con soportes catalíticos, que las hacen ser, los más empleados en la actualidad. Debido a la estructura porosa presentan unas buenas propiedades para ser empleadas en intercambio iónico, en catálisis y en adsorción (Martinez & Cicuamía, 2014).

## 2.5 Marco Legal

La ley 30 de 1992, establece que en las Universidades, se deben realizar actividades de investigación, razón por la cual la Universidad Francisco de Paula Santander, en el artículo 140 del estatuto estudiantil, establece dentro de las modalidades de trabajo, el desarrollo y sustentación de un trabajo de investigación como una de las modalidades para optar a un título profesional.

- GTC 35: 97-04-16. Guía para la recolección selectiva de residuos sólidos. Suministra pautas para efectuar una recolección selectiva como parte fundamental en el proceso que permite mantener la calidad de los materiales aprovechables.
- GTC 24: 98-12-16. Guía para la separación en la fuente. Establece directrices para realizar la separación de residuos en las diferentes fuentes generadoras: domesticas, industrial. Comercial, institucional y de servicios con el fin de facilitar su posterior aprovechamiento.
- NTC 673 (CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO): Este método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales

como cilindros moldeados y núcleos perforados. Se encuentra limitado al concreto que tiene un peso unitario mayor que 800 kg/m<sup>3</sup> [50 lb/ft<sup>3</sup>]. esta norma es una adopción idéntica (IDT) de la norma ASTM C39:2005 (NTC, 2010).

- ASTM D7984 – 16 (Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument): Este método de prueba mide la tasa de transporte térmico entre un elemento calefactor y una muestra de tejido. Algunas de las propiedades de confort de una prenda se relacionan con las sensaciones térmicas iniciales (es decir, la sensación de frío o calor al contacto inicial), donde los valores más bajos de efusividad térmica indican sensaciones de calor y los valores más altos indican sensaciones de frescor. La efusividad térmica de diferentes tejidos y su temperatura de superficie percibida inicial son importantes para ayudar a los desarrolladores de productos con la selección de tejidos (ASTM, 2003).
- Resolución 2254 del 1 de noviembre de 2017, por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones (MinAmbiente, 2017).
- Resolución 0610 de 2010: establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia, respecto de algunas definiciones, los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio, niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos, procedimientos de medición de la calidad del aire, mediciones de calidad del aire por las autoridades ambientales, declaración de los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire (MinAmbiente, 2010).

- Ley 1252 de 2008, El Congreso de Colombia, "Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones" (MinAmbiente, 2008).



### **3. Diseño Metodológico**

#### **3.1 Tipo de Investigación**

Según las características del presente trabajo y apoyándose en recomendaciones metodológicas y autores como Hernández-Sampieri, se tomó la investigación desde el punto de vista exploratorio cuantitativo y/o descriptivo. La investigación cuantitativa ofrece la posibilidad de generalizar los resultados más ampliamente, otorga control sobre los fenómenos, así como un punto de vista basado en conteos y magnitudes. También, brinda una gran posibilidad de repetición y se centra en puntos específicos de tales fenómenos, además de que facilita la comparación entre estudios similares (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2014). De acuerdo a lo expuesto por Hernández, Fernández y Baptista (2006), es posible que una investigación se inicie como exploratoria, después ser descriptiva y correlacional, y terminar como explicativa-cuantitativa. También un estudio cuantitativo, cualitativo o mixto puede concebirse como descriptivo y concluir explicando relaciones causales, así como generar nuevas áreas de exploración para futuras investigaciones.

#### **3.2 Población y Muestra**

##### **3.2.1 Población.**

La población objeto de la investigación es el cemento geopolimérico sintetizado a partir de la ceniza volante suministrada por la central termoeléctrica Termotasajero S.A.S., ubicada en el departamento de Norte de Santander, obtenidas por la combustión del carbón bituminoso para la producción de vapor de agua en las calderas y el posterior uso en la generación de energía eléctrica.

### **3.2.2 Muestra.**

Se tomó como muestra las cenizas volantes que fueron suministradas por Termotasajero y posteriormente caracterizadas por Luis Rene Ortega Triana, cuyos resultados fueron citados anteriormente como antecedentes. En la presente investigación no se cuantificó la cantidad de cenizas utilizadas en total sino solo se determinó las proporciones como parte del desarrollo del primer objetivo específico.

## **3.3 Instrumentos para la Recolección de la Información.**

### **3.3.1 Fuentes primarias.**

La información fue obtenida por medio de los resultados obtenidos en la caracterización del cemento geopolimérico sobre el cual se realizaran ensayo de compresión y ensayo de conductividad térmica. Para el ensayo de compresión, los resultados fueron suministrados por el Laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Universidad Industrial de Santander (UFPS) Seccional Cúcuta, en donde se llevaron a cabo.

Para el ensayo de conductividad térmica, los resultados fueron arrojados por el software propio del equipo C-Therm, en el cual se realizó dicha prueba. Este software cuantifica y organiza las lecturas tomadas mientras se realiza el ensayo.

### **3.3.2 Fuentes secundarias.**

La información fue recolectada por medio de del uso de literatura del estado del arte, artículos científicos, tesis de investigación, libros de texto, asesorías y consultas a especialistas en el tema.

## **3.4 Etapas del proceso de la investigación**

Etapa 0: Revisión Bibliográfica. En esta etapa inicial de la investigación se hizo una revisión del estado del arte con el fin de conocer cuáles han sido las investigaciones que se han realizado en

el campo de los geopolímeros y de los cementos geopoliméricos con el fin de seleccionar la literatura que tenga más relevancia para la ejecución de los ensayos posteriores que se realizaron. De la misma manera se buscó información acerca de los procesos por los cuales resulta de Termotasajero la ceniza volante que se usó como materia prima para el cemento geopolimérico.

Es importante abordar el trabajo de grado realizado por Luis René Ortega (2014), titulado “Caracterización estructural y térmica de las cenizas volantes provenientes de la combustión de carbón”; trabajo que se realizó con cenizas volantes provenientes de la Termotasajero y sobre las cuales se realizó la caracterización de dichas cenizas, resultados que se tomaron como base de cálculo para las pruebas posteriores. De igual manera se tomó en cuenta los resultados presentados por el profesor y pionero en los cementos geopoliméricos Joseph Davidovits, titulado “Geopolymer Cement: a review”. Estos dos trabajos se usaron como punto de partida para el desarrollo de la presente investigación.

Etapa 1: Ensayos Previos. Para esta etapa del trabajo se realizó un tamizado sobre las cenizas volantes utilizando tamiz Gran Test ASTM 200 ( $\sim 75\mu\text{m}$ ) para separar los inquemados presentes en esas, los cuales fueron reportados en los resultados del trabajo de Ortega, 2014. Las muestras tamizadas fueron sometidas a calcinación utilizando una mufla, a una temperatura de  $550^{\circ}\text{C}$  y durante un periodo de tiempo de 1.5 horas con el fin de eliminar los residuos de carbón que estuvieran presentes en las cenizas volantes. Teniendo en cuenta los resultados de la investigación de Ortega, 2014, se evidencia que la cantidad de aluminio presentes en las cenizas es de 11.30% y el de silicio es de 18.37%. según lo expuesto por Davidovits (Joseph Davidovits, 2013) en su artículo de revisión, la relación Si/Al debe ser igual a 2, por lo que se hizo necesario agregar sílice a la ceniza. Este sílice fue agregado en forma de arena de sílice, la cual fue pulverizada y pasada

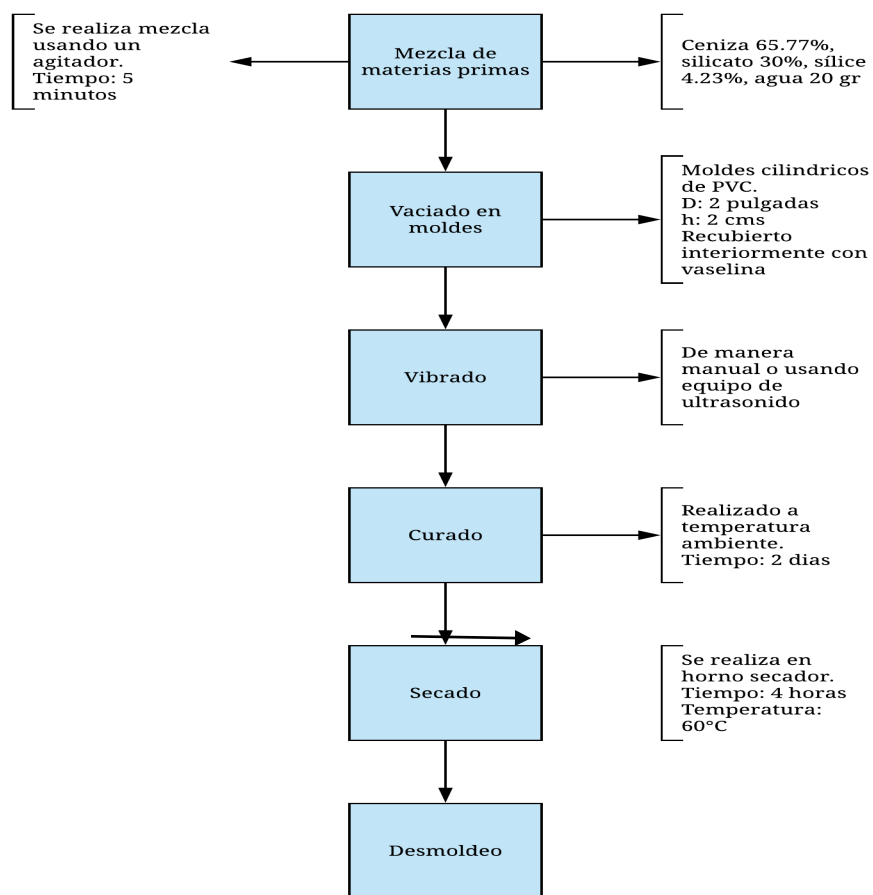
por un tamiz Gran Test ASTM 200 (~ 75 $\mu$ m). Para que la relación estequiometría sea igual a 2, la cantidad de arena a agregar será de 4.23 gr (tomando una base de 100 gramos).

En lo que concierne a la selección del activador alcalino, se tuvo en cuenta lo expuesto por el profesor Davidovits y se utilizó al silicato de sodio como agente activador. Para la cantidad de activador, se empleó 30% en peso (tomando como 100% la ceniza más el activador) según lo expuesto por Arenas y Luna-Galeano en su artículo “Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers” (Arenas et al., 2017). La cantidad de agua a utilizar fue de 20 gramos para una relación líquido/sólido (L/S) de 0,20. Para la prueba inicial, la cual está fundamentada en distintas investigaciones, las proporciones fueron: ceniza 65.77%, activador 30%, sílice 4.23% y una relación líquido/sólido de 0.20. Se estudiaron otras proporciones: ceniza 54.47%, activador 30%, sílice 15.53%, L/S 0.20; ceniza 70%, activador 30%, L/S 0,25; ceniza 70%, activador 30%, L/S 0,17. Se realizaron dos muestras por cada composición con el fin de seleccionar las proporciones adecuadas por medio de observaciones directas al momento de la síntesis y el proceso de curado.

Cabe aclarar que en cumplimiento del primer objetivo específico, estas cantidades y proporciones se usaron como base para iniciar la síntesis del cemento geopolimérico y que estas pueden variar de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Etapa 2: Síntesis del Geopolímero. En esta parte del proyecto, se trabajó con la mejor composición obtenida de la etapa 1. En un recipiente se llevaron las materias y se mezclaron por un tiempo de 5 minutos (se agregó la ceniza, la arena, el agua y por último el silicato; de esta manera se observó que el material se homogenizaba mejor); seguido a esto, la pasta se vació en moldes de PVC de 2 pulgadas de diámetro y 2 cm de alto y cuyo fondo fue de un material plástico y firme que fue pegado al PVC con silicona líquida, los cuales estaban recubiertos por vaselina en

su interior para evitar que la mezcla se pegue a los bordes y sea fácil el desmoldeo. Estando en los moldes se hizo vibrar, ya sea de forma manual dándole golpes por los lados o usando ultrasonido, con el fin de sacar las burbujas presentes dentro de la mezcla y que se pueden haber formado en el vaciado al molde. El tiempo de curado y secado varía de acuerdo a los autores, más sin embargo se dejará reposar la mezcla en los moldes a temperatura ambiente por 2 días y luego se llevará a la estufa por un tiempo de 4 horas a una temperatura de 60°C (Van Chanh, Trung, & Van Tuan, 2008), pues según la literatura y lo expuesto por el profesor Davidovits, los geopolímeros no deben ser expuestos a temperaturas superiores a los 100°C. Al culminar el tiempo de curado y secado, se procedió con el desmoldeo.



**Figura 7.** Diagrama de proceso Etapa 2

Etapa 3: Caracterización del Geopolímero. Para la caracterización térmica del cemento geopolimérico, se llevó a cabo el ensayo de propiedades térmicas el cual se realizó en los laboratorios del GIFIMAC y está sustentado en la norma ASTM D7984 (C-Therm Technology, 2018), se usaron las probetas que se describieron en la etapa dos; se usan probetas pequeñas debido a que el sensor no tiene capacidad para soportar peso superior a los 2 kg. Para esta prueba, la superficie de las probetas fue pulidas y llevadas a brillo espejo y quedaron totalmente planas de modo que el sensor del C-Therm tenga contacto con toda la superficie. El equipo usa un cilindro metálico en el cual en el medio posee una resistencia y alrededor un sensor que es el que registra las corrientes de conductividad térmica (Figura 7). Los datos son transmitidos a un computador el cual cuantifica los resultados obtenidos.



**Figura 8.** MTPS Sensor. Sistema C-Therm. Fuente: Tomado de C-THERM TECHNOLOGIES

Para la prueba de resistencia a la compresión, se tuvo en cuenta las disposiciones de la Norma Técnica Colombiana (NTC, 2010) 673, la cual da las pautas para los tamaños de los especímenes que van a ser llevados a la prueba, los cuales deben tener una relación diámetro/longitud de 1:2. Da parámetros para especímenes de 100 mm por 200 mm, pero a su vez da libertad para que las muestras sean de menor tamaño siempre y cuando se mantenga la relación entre el diámetro y la longitud. La NTC 673 especifica que los especímenes sean cilíndricos, más sin embargo teniendo en cuenta lo expuesto por Gutiérrez (Gutierrez Torres, 2017) en su trabajo, este usó especímenes cúbicos. Este tipo de configuración se tendrá en cuenta y se someterá a evaluación basados en los aspectos que dicta la NTC y ASTM.

El ensayo de compresión consta de llevar los especímenes a una prensa, la cual aplica presión en la cara superior del espécimen a una velocidad de  $0.25 \text{ MPa/s} \pm 0.05 \text{ MPa/s}$  hasta que el indicador muestre que la carga está disminuyendo. Este ensayo se llevará a cabo en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Cúcuta.

Etapa 4: Análisis e Interpretación de Resultados. Una vez conocidos los resultados obtenidos para los dos ensayos realizados, se procedió a comparar con los resultados obtenidos por diferentes autores y publicados en artículos de investigación. Se hizo comparación con respecto a datos obtenidos para los mismos ensayos en el cemento Portland (mortero), con el fin de saber si el cemento geopolimérico puede llegar a convertirse en una alternativa para este material cementante. Se realizó la marcha final del trabajo de investigación, mediante exposición del informe final y recomendaciones de las futuras aplicaciones que puede llegar a surgir para el cemento geopolimérico.

## **4. Resultados, Análisis y Discusión**

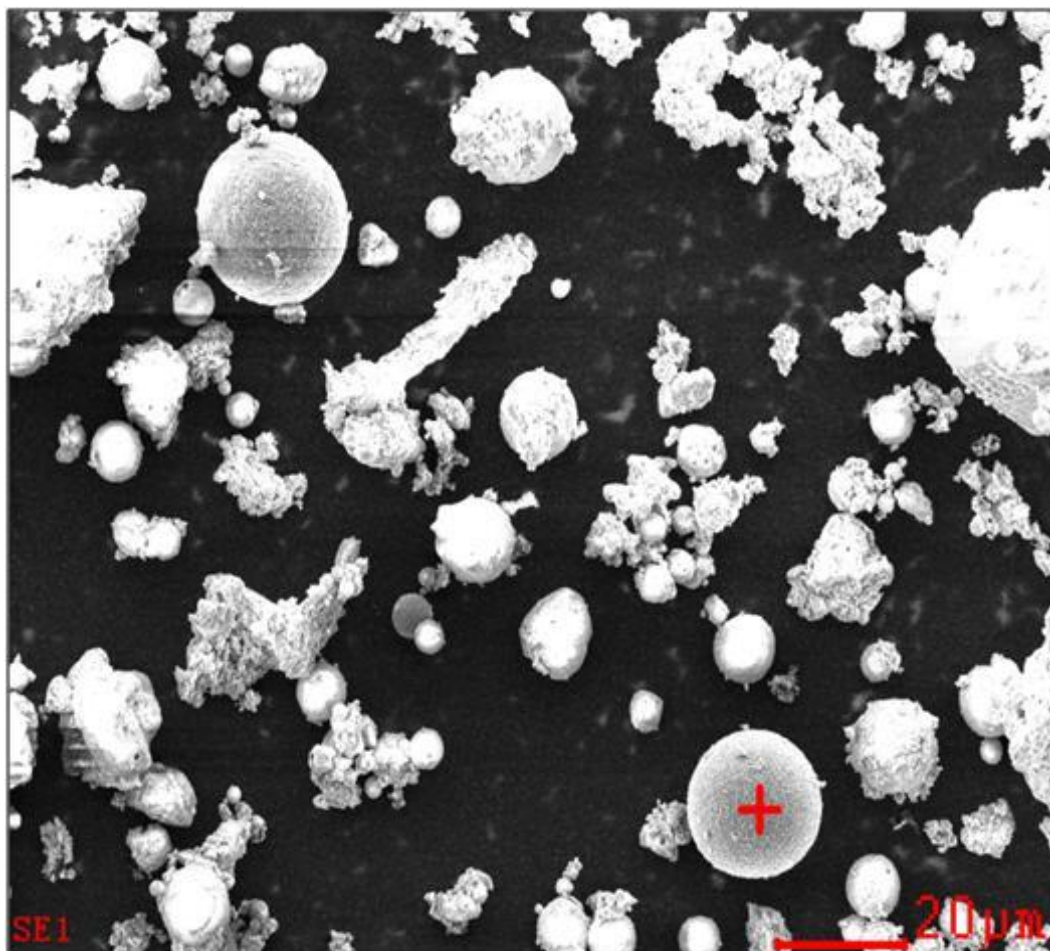
En este capítulo, se presentan los resultados en la elección de la materia prima, la composición que se consideró más adecuada para el cemento geopolimérico, la síntesis y la posterior caracterización del mismo.

### **4.1 Pruebas de laboratorio para tres relaciones de ceniza volante, activante y agua, que puede ser utilizada en la obtención del cemento geopolimérico**

En esta etapa de la elección de la mejor proporción para sintetizar el cemento geopolimérico, es necesario hablar primero de la ceniza volante que se empleó. Esta fue suministrada por Termotasajero S.A.S., y fue caracterizada en una investigación previa por parte de Luis René Ortega Triana titulada “Caracterización Estructural Y Térmica De Las Cenizas Volantes Provenientes De La Combustión De Carbón”. En dicho estudio, la ceniza fue tratada y enviada al laboratorio de Microscopia Electrónica de Barrido de la Universidad Industrial de Santander (UIS), ubicados en la sede de Guatiguará. Este método es una técnica de análisis superficial, que consiste en enfocar sobre una muestra un fino haz de electrones, acelerado con energías de excitación desde 0.1kV hasta 30kV y que permite obtener información morfológica, topográfica y composicional de las muestras produciendo imágenes de alta resolución (de hasta 3 nm).

Uno de los parámetros analizados en dicha caracterización fue la composición química por elemento, la cual se consiguió por medio de espectroscopia de dispersión de energías de rayos X (EDS), proceso llevado a cabo con el sensor de estado sólido del microscopio electrónico de barrido FEI Quanta FEG 650.





**Figura 9.** Imagen de electrones secundarios utilizada para cuantificar la composición química de las partículas esféricas de ceniza volante, usando EDS. Tomado de: Luis Rene Ortega Triana

Este análisis arrojó la siguiente composición química que se puede observar en la Tabla 1:

Tabla 1

*Composición química por elemento y por óxidos de las cenizas volantes de Termotasajero.  
Fuente: Luis Rene Ortega Triana*

<b>Elemento</b>	<b>Wt%</b>	<b>At%</b>	<b>Óxido</b>	<b>Wt%</b>
<b>O</b>	26.83	47.07	---	
<b>Na</b>	00.19	00.23	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,38
<b>Mg</b>	00.42	00.48	<b>MgO</b>	0,55
<b>Al</b>	11.30	11.76	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	24,01
<b>Si</b>	18.37	18.36	<b>SiO<sub>2</sub></b>	59,57
<b>K</b>	00.83	00.60	<b>K<sub>2</sub>O</b>	1,24
<b>Ca</b>	02.40	00.98	<b>CaO</b>	1,65
<b>Ti</b>	01.45	00.85	<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,01
<b>Fe</b>	38.56	19.38	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	9,17
<b>Cu</b>	00.66	00.29	--	
<b>Matriz</b>	Corrección	ZAF		

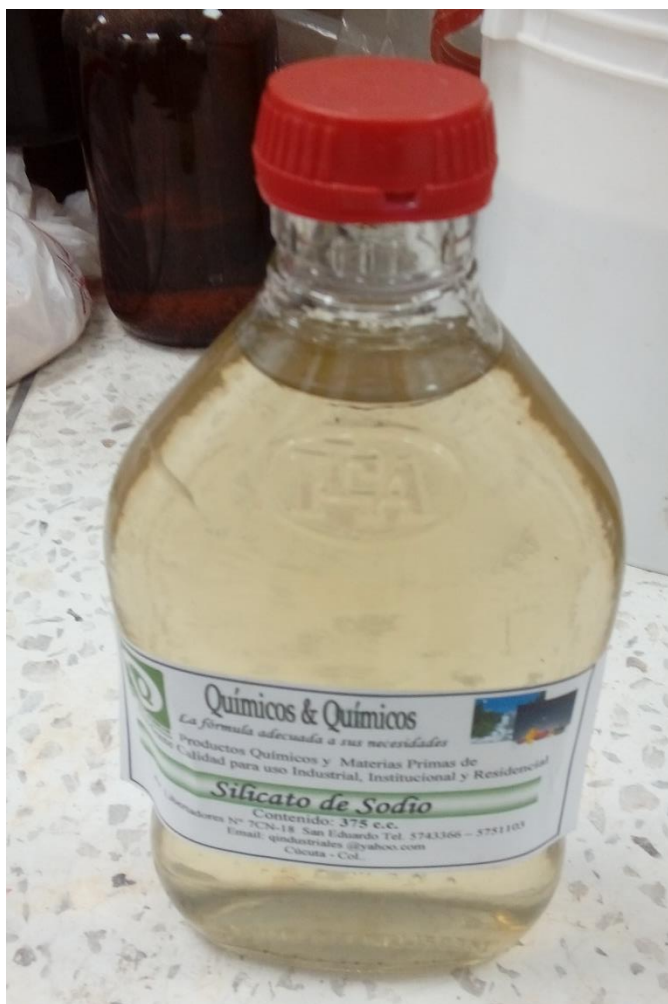
La tabla 1 muestra el porcentaje en peso (*Wt %*) y atómico (*At %*), de la composición química por elemento para la partícula de ceniza volante marcada en la figura 9, así mismo se presenta la composición por óxidos de la muestra de ceniza volante de Termotasajero usado en este proyecto.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la espectroscopia para conocer la composición química de la ceniza, se evidencia que el hierro (Fe), el Silicio (Si) y el aluminio (Al), son los elementos con mayor presencia en porcentaje en peso en la muestra (38.56%, 18.37% y 11.30% respectivamente). A su vez, se evidencia un bajo porcentaje de calcio (Ca 2.40%), lo que clasifica a esta ceniza en como clase F (según la norma ASTM 618C), ya que presenta cantidades inferiores al 10% de calcio. Las CV de Termotasajero presentan morfología de partículas suaves al tacto, de color grisáceo, principalmente de forma esférica, que pueden ser vítreas, solidas, huecas, lisas o esponjosas, otras partículas redondas con superficies picoteadas, e irregulares, unidas a partículas

de CV de menor tamaño (aglomerados de carbón o inquemados), y de cenosferas y plenósferas (Ortega Triana, 2014).

Teniendo conocimiento respecto a la composición química de la ceniza, se procedió a consultar diversas investigaciones, publicaciones y trabajos de grado para buscar una relación entre ceniza y la solución activadora que haya tenido resultados positivos y en la que tuviera la ceniza una composición similar a la de Termotasajero. De acuerdo a lo consultado, se evidenció que la gran mayoría de las investigaciones utilizaban una composición entre ceniza y solución activadora de 70%-30% (respectivamente) y que la solución alcalina a utilizar era el silicato de sodio; como ejemplo se cita la investigación titulada “Propiedades de Paneles de Geopolímeros a Base de Ceniza Volante y Metacaolín Sometidos a Pruebas de Resistencia de Fuego” (Luna, Cornejo, Leiva, Vilches Arenas, & Fernández Pereira, 2015). En esta investigación, los autores utilizan en la preparación una proporción de 70% de cenizas y un 30% de silicato de sodio como solución activadora, la cual tenía un pH de 11,5. La relación líquido/sólido de la mezcla es de 0,24. Cabe aclarar que la relación L/S hace referencia al agua en la parte líquida y al silicato y la ceniza en la parte sólida.

Tomando lo encontrado en los trabajos de investigadores del tema y de acuerdo con las pruebas realizadas de las diversas proporciones entre las materias primas a utilizar que se habían propuesto en la etapa 1 del diseño experimental, se resolvió por optar para este trabajo la relación de 70% cenizas y 30% de solución activadora y a su vez, usar al silicato de sodio como solución alcalina activante. El silicato utilizado tiene un porcentaje peso a peso (%p/p) de 30,70% de  $\text{SiO}_2$ , un 11,63% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , una relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  de 2,64, una densidad de  $1,48 \text{ g/cm}^3$  y un pH de 12,10; el cual fue adquirido en Químicos & Químicos en la ciudad de Cúcuta, donde fue facilitada la ficha de seguridad del silicato.



**Figura 10.** Silicato de sodio utilizado

Habiendo definido la composición que se iba a utilizar, se procedió a pasar la ceniza por un tamiz Gran Test ASTM 200 ( $\sim 75\mu\text{m}$ ) con el fin de separar las partículas grandes de inquemados y trabajar solo con el pasante, el cual después de tamizar quedó con un tamaño de partícula homogéneo.

Para una futura continuación de la investigación, se busca que el mortero que resulta del cemento geopolimérico tenga un aspecto de masa plástica, por esto se procedió a realizar pruebas de la cantidad de agua que debía contener en la preparación. Se empezó con una cantidad de agua de 40

gramos, equivalente a 0.4 en la relación L/S, basado en la investigación “Geopolymeric concretes based on fly ash with high unburned content” (Valencia-Saavedra, Mejía de Gutiérrez, & Gordillo, 2018). Al mezclar todas las partes se pudo evidenciar inmediatamente que la cantidad de agua era excesiva pues el cemento había quedado en una fase líquida, contrario a lo que se buscaba, por eso se revisó la investigación de Luna-Galiano en la cual se había basado la definición de las proporciones y se utilizó la relación que en esa se empleaba que era de 0,24. Con esta nueva relación, el cemento tenía un mejor aspecto, buena consistencia pero aún estaba muy líquido para lo que se quería, así que se hicieron nuevas pruebas donde se varió la relación L/S; se utilizaron relaciones de 0.23, 0.20 y 0.18, de las cuales se escogió la relación L/S de 0.20 debido a que con esta cantidad de agua (20 gramos) se formaba una pasta cuya viscosidad permitía escurrirse por el frasco en el cual era mezclada para llevarla a los moldes. Con la relación L/S establecida, se realizaron las primeras muestras de la siguiente manera: en un recipiente se agregaron 70 gramos de cenizas tratadas, 30 gramos de silicato de sodio y 20 gramos de agua, todo se mezcló durante 5 minutos y a 900 rpm (revoluciones por minuto) usado agitador de cabezal; al cabo de este tiempo se vació la mezcla obtenida en los moldes de PVC que se ven en la Figura 11.



**Figura 11.** Moldes de PVC utilizados.

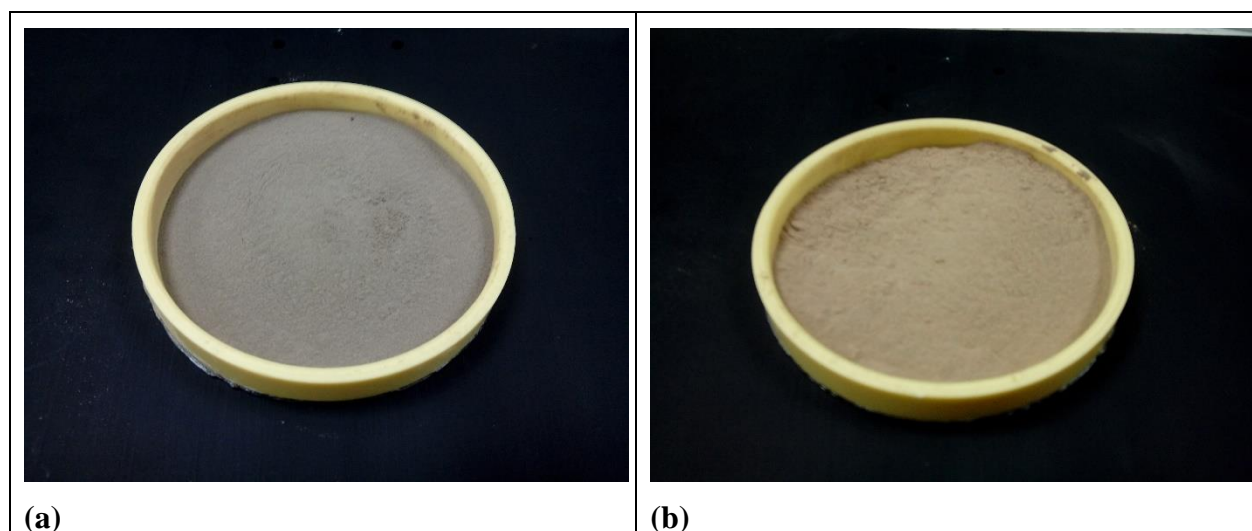
Estos moldes de PVC tienen un diámetro de 2 pulgadas y una altura de 2 centímetros y antes de ser llenados con la mezcla, el interior fue recubierto por vaselina con el fin de que el cemento no se adhiriera y fuera más fácil el desmoldeo cuando ya estuviera seco. Cuando la mezcla se vació en los moldes, se hicieron vibrar de modo manual golpeando los moldes para que se liberara las burbujas que pudieron haber quedado en el interior, esto se realizó por un tiempo de 3 minutos. Para el curado, las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente, uno 28°C aproximadamente, durante 2 días, luego se desmolda y se lleva a la estufa de secado a 60°C durante 4 horas para hacer el secado final de la probeta. Durante estas primeras pruebas, las probetas resultantes eran frágiles, se reventaron durante el secado final pero había una característica específica en todas ellas y era la presencia de una mancha negra en el centro de la probeta (ver figura 12), lo que evidenciaba lo que Ortega Triana exponía en sus resultados de la caracterización de la ceniza en el sentido de la presencia de partículas pequeñas de carbón e inquemados, por esta razón se hizo importante realizar un tratamiento térmico a la ceniza con el fin de eliminar estos residuos.



**Figura 12.** Presencia de carbón en muestras realizadas.

Las cenizas pasantes del tamiz se trataron térmicamente, las cuales se sometieron a pruebas de calcinación en una mufla; se tomaron 10 muestras de 100 gramos cada una y se llevaron a calcinar a una temperatura de 550°C durante un tiempo de 1,5 horas. Al salir de la mufla, lo primero que se pudo evidenciar es el cambio de la coloración de la ceniza (ver figura 13) que pasó de un color grisáceo a un color más amarillento, debido posiblemente a la calcinación de los inquemados. También se identificó que las pérdidas por calcinación en promedio son del  $2\% \pm 0,5$ .

Con la calcinación realizada, se volvieron a hacer probetas bajo los mismos parámetros que se habían definido anteriormente; los resultados no variaron mucho, las probetas cambiaron de color (ver figura 13) pero seguían agrietándose en la estufa secadora (ver figura 14), por lo que se hizo importante hacer revisión del estado del arte y tratar de encontrar posibles causas al agrietamiento de las muestras cuando se realizaba el secado, incluso algunas de ellas se agrietaron en el secado a temperatura ambiente.



**Figura 13.** Ceniza volante a) antes y b) después de ser llevada a calcinación. Se evidencia el cambio de coloración en la muestra.



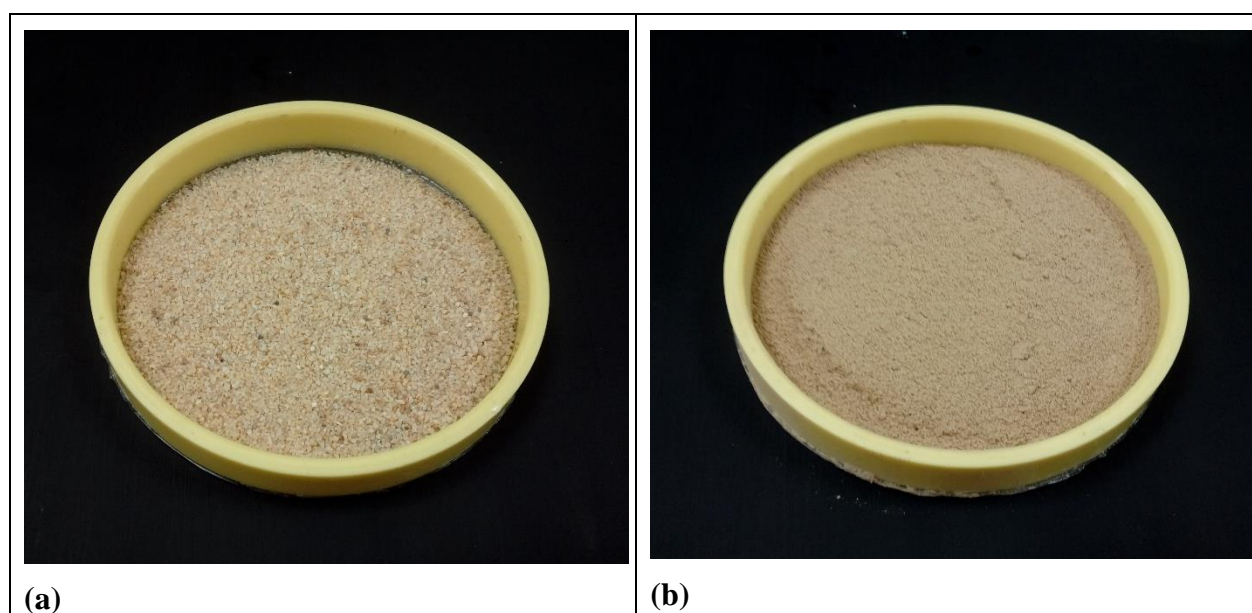
**Figura 14.** Muestras sin contenido de  $\text{SiO}_2$  y sin tratamiento térmico de las cenizas<sup>2</sup>. Se puede observar las grietas en las probetas y la presencia de carbón.

Al revisar diversas investigaciones de otros autores experimentados en el tema como lo son Joseph Davidovits, John Provis, Fernández- Jiménez, entre otros se llegó a la conclusión que era necesario incrementar la relación Si/Al en la muestra (Kovalchuk, Fernández-jiménez, & Palomo, 2008) para aumentar la resistencia, y que dicha relación debe estar entre 2 y 4.

Con lo anterior se hizo necesario entonces añadir  $\text{SiO}_2$  en forma de arena de sílice. Esta fue conseguida, pero tenía un tamaño de grano bastante grande (ver figura 15 a)), tanto así que no había pasante al pasarlo por la malla 100 o 200, por esta razón se hizo indispensable que la arena fuera triturada. Primeramente, se probó con un molino manual, pero la arena de sílice tiene propiedades abrasivas y estaba desgastando al molino y, por ende, contaminando la arena. El triturado se llevó a cabo en el Laboratorio de Tratamiento Mineral de la UFPS usando el molino de bolas que allí se



encuentra y el cual si pulverizó toda la arena. La arena procesada se pasó por un tamiz Gran Test ASTM 200 ( $\sim 75\mu\text{m}$ ) con el fin de que la arena tuviera el mismo tamaño de la ceniza y haya una fácil homogenización cuando se pretenda mezclar los componentes del cemento geopolimérico. Al tener el contenido de arena de sílice pasante del tamiz de malla 200 (figura 15 b), se procedió a calcular la relación Si/Al basado en la composición química de la ceniza dada en los resultados de Ortega Triana (Tabla 1). A su vez, para conservar las proporciones definidas de ceniza y silicato, la cantidad de arena agregada se descontó de la cantidad de ceniza.



**Figura 15.** Arena de sílice a) antes y b) después de ser pasada por el molino de bolas y tamizada.

De los resultados de la investigación de Ortega Triana expuestos en la Tabla 1, se tiene que la cantidad (Wt%) de sílice (Si) es de 18,37% y el de aluminio (Al) es de 11,30%, de esta manera la proporción Si/Al es de 1.62, mientras que la relación  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.48$ . En este trabajo para la definición de las mezclas se usó la relación Si/Al, por lo tanto, se hace necesario añadir arena de sílice para incrementar dicha relación y así disminuir la fragilidad del cemento geopolimérico cuando éste seca completamente, las proporciones que ya fueron definidas anteriormente se mantuvieron, es decir, la cantidad de silicato y agua siguieron siendo constantes. Por lo anterior,

se planteó usar 3 relaciones distintas de Si/Al con el fin de determinar si efectivamente existe alguna mejora cuando aumenta o disminuye la relación entre estos dos elementos. Se hizo necesario con lo encontrado anteriormente en el estado del arte consultado que las relaciones Si/Al fueran 2, 3 y 4; de este modo las cantidades de arena de sílice agregado fueron de 4,23 g, 15,53 g y 26,83 g respetivamente. Teniendo las cantidades de arena a agregar, las proporciones para realizar las probetas son las siguientes:

- Si/Al = 2: ceniza 65,77 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 4,23 g.
- Si/Al = 3: ceniza 54,47 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 15,53 g.
- Si/Al = 4: ceniza 43,17 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 26,83 g.

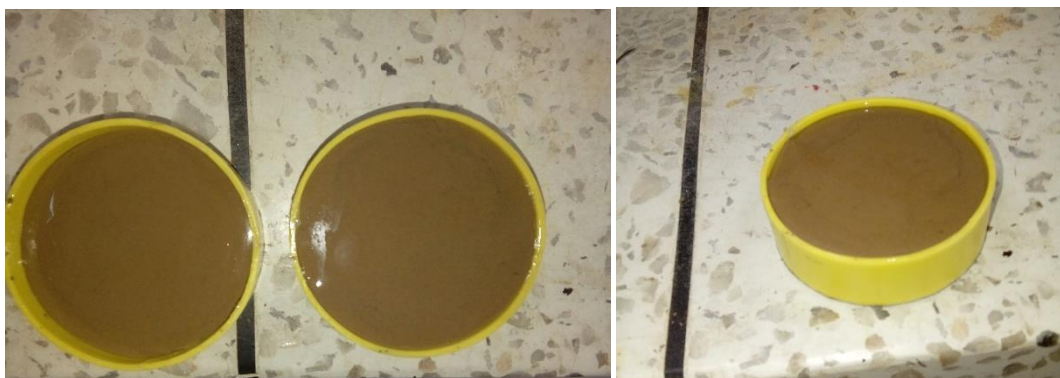
Como se mencionó anteriormente, la arena que se agregó fue restada de la cantidad de ceniza que se tenía, por ejemplo, para la relación Si/Al = 2 se tiene una cantidad de arena a agrega de 4,23 g; originalmente la cantidad de ceniza que se utilizaba era 70 g (relación 70-30 entre ceniza y silicato), entonces a esa cantidad de ceniza original se le restó la cantidad de arena que se agregó:  $70 - 4,23$  dio como resultado 65,77 g que es lo que se expuso en las proporciones que se utilizaron. Por esta razón, no se menciona que la proporción de ceniza volante se mantenga constante a comparación del silicato y el agua los cuales se mantuvieron constante.

Se evidenció que las cantidades de arena de sílice agregadas de acuerdo a las relaciones Si/Al definidas anteriormente no mostraron ningún cambio observable en la proporción definida para la investigación, por ende no hay una relación mejor que otra en el cumplimiento del presente objetivo, las características que puedan arrojar estas relaciones Si/Al se podrán determinar en el desarrollo de los demás objetivos específicos.

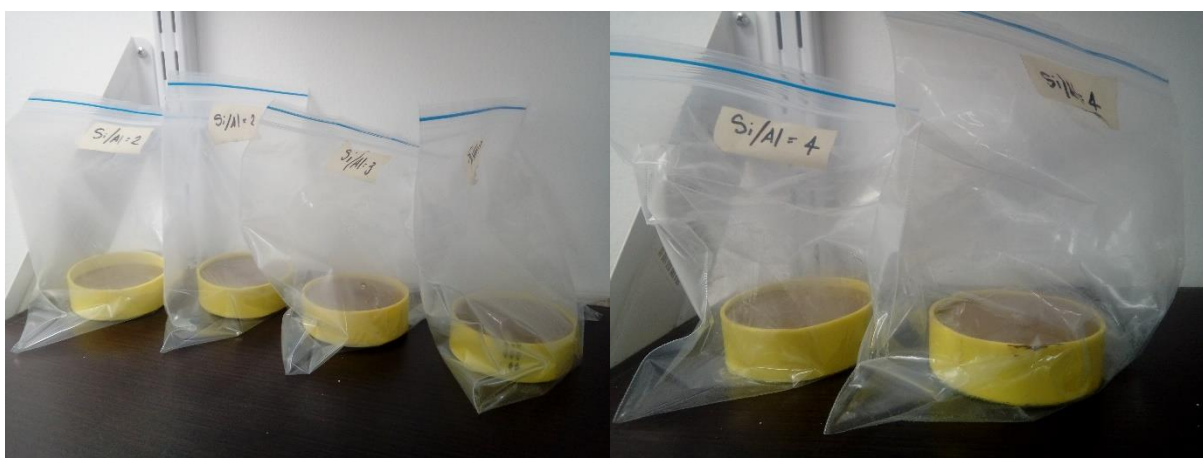
#### **4.2 Síntesis del cemento geopolimérico a partir de las cenizas volantes, de acuerdo a las proporciones seleccionadas en las pruebas del laboratorio**

De esta manera y habiendo definido todas las proporciones de los elementos que se necesitan para la conformación del cemento geopolimérico, se procedió a realizar las probetas con las tres relaciones Si/Al (Si/Al = 2: ceniza 65,77 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 4,23 g; Si/Al = 3: ceniza 54,47 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 15,53 g; Si/Al = 4: ceniza 43,17 g, silicato 30 g, agua 20 g, arena 26,83 g) definidas en el objetivo específico anterior, a las cuales se les iba a realizar posteriormente el análisis térmico. En el recipiente se agregó la ceniza, la arena, el agua y por último el silicato (en este orden se pudo observar que hubo una mejor homogenización de los elementos en comparación a cambiar de orden el silicato y el agua), se mezcló con la ayuda del mezclador a 900 rpm durante 5 minutos, posteriormente, se vació en los moldes (ver figura 16). Para el curado, se probó una técnica denominada “Curing in covered mould (CCM)”, este procedimiento tiene en cuenta el hecho de mantener las condiciones adecuadas de humedad mientras el material fragua y endure, para prevenir fraguados rápidos y/o procesos de carbonatación. El ensayo consiste en introducir los moldes, conteniendo la pasta fresca, en bolsas de plástico individuales y selladas (ver figura 17) con el objeto de impedir la evaporación del agua durante el proceso inicial de curado (Kovalchuk et al., 2008). Basados en esta técnica y los resultados obtenidos por el autor citado, las muestras se colocaron en bolsas resellables durante 24 horas a temperatura ambiente y luego se llevaron a la estufa a una temperatura de 60°C y 95°C durante 8 horas. Cabe aclarar que se hicieron probetas para probar ambas temperaturas de secado y cuyos resultados se evidenciaran al desarrollar más adelante la respectiva caracterización térmica y mecánica. En este punto se pudo observar que cuando se iba aumentando la cantidad de arena de sílice en la mezcla, esta se hacía más líquida sin cambiar la cantidad de agua, muy posiblemente

debido a la disminución de ceniza volante la cual cumple el papel de material cementante en el cemento geopolimérico.



**Figura 16.** Mezcla vaciada en los moldes.



**Figura 17.** Muestras en proceso de secado por el método CCM.

Al culminar el proceso de curado y secado de las muestras, se evidenció que aquellas que se secaron a  $60^{\circ}\text{C}$  aún estaban un poco húmedas hacia su centro, distinto a lo que se notó en las que fueron secadas a  $95^{\circ}\text{C}$ , las cuales se encontraban secas en su totalidad. La Figura 18 muestra unas de las probetas al culminar su tiempo de curado, secado (a  $60^{\circ}\text{C}$ ) y enfriado (con el fin de que el choque térmico no afectara la estructura de la muestra) dentro de la estufa. Otro aspecto que cabe mencionar y que se pudo observar de las probetas, es que presentaban una capa brillante por

encima, la cual se sospecha sea una mezcla del agua y del silicato mezclada mientras se curaban las muestras.



Figura 18. Probetas al salir de la estufa de secado.

### 4.3 Caracterización térmica y mecánica de las muestras de cemento geopolimérico obtenidas

Teniendo definido las composiciones a usar y habiendo sintetizado el cemento geopolimérico, en esta etapa del proceso se procedió a realizar la caracterización térmica y mecánica de las probetas realizadas. Datos de valores como conductividad térmica y resistencia a la compresión fueron tomados de los valores de referencia expuestos en las distintas normas existentes. Se realizaron dos probetas de mortero con cemento tipo Portland comercial y arena para realizar la comparación en cuanto al valor de la densidad aparente entre el cemento geopolimérico y el mortero de tipo comercial Portland.

#### 4.3.1 Caracterización térmica.

Para realizar la caracterización térmica del cemento geopolimérico, las probetas que se sintetizaron fueron adecuadas para que el equipo C-Therm TCi pudiera efectuar el ensayo. Para

esto, las probetas se lijaron con diferente papel de lija: se inició con la lija número 80, de grano grueso y muy abrasivo; seguido se pasó por lija 150, 300, 600, 1000, 1500 y 2000, hasta conseguir brillo en la cara de la probeta. Con este procedimiento lo que se buscaba era que la probeta quedara totalmente plana para que al momento de colocarla sobre el sensor del equipo, no quedara espacio alguno y el aire no fuera a afectar las mediciones que se realizaban; este mismo se realizó 24 horas después de haber terminado el proceso de curado y secado de las muestras realizadas. Habiendo alistado todas las probetas que se iban a caracterizar, se procedió a llevarlas al laboratorio del GIFIMAC donde se encuentra el C-Therm. Este equipo cuenta con un sensor que es el que está en contacto con la muestra, un computador, el cual realiza los cálculos y manda la información y la recibe del sensor para luego ser mostrada en la interfaz del computador (ver figura 19). El equipo cuenta con una serie de parámetros establecidos de acuerdo al tipo de material al que se le vaya a realizar el ensayo de conductividad térmica y de acuerdo al material seleccionado:

- Líquidos
- Polvos
- Espumas
- Telas
- Polímeros
- Cerámicos
- Metales

A su vez, cuando se procede con el ensayo, el programa indica en los resultados que va mostrando si son válidos los datos que se están obteniendo por medio de colores: el rojo significa que no son correctos los valores obtenidos para el material seleccionado; el naranja indica que los valores pueden que sea validos como puedan que no; y en blanco significa que los valores son

correctos de acuerdo al material seleccionado. Los colores son arrojados de acuerdo a los resultados que se obtienen de la prueba en curso en comparación con una lista de parámetros establecidos dentro de la configuración del C-Therm. El ensayo funciona de la siguiente manera. Tomado de (C-Therm Technology, 2018):

- Se aplica una corriente conocida al elemento de calentamiento en espiral del sensor, que proporciona una pequeña cantidad de calor.
- Un anillo protector rodea la bobina del sensor primario para soportar una transferencia de calor unidireccional a la muestra. La corriente aplicada por efecto Joule, da como resultado un aumento de la temperatura en la resistencia del sensor, el cual se trasfiere a la muestra.
- La tasa de aumento en el voltaje del sensor se utiliza para determinar las propiedades térmicas de la muestra. El voltaje es calibrado de fábrica a la temperatura. La conductividad térmica es inversamente proporcional a la tasa de aumento de la temperatura en el punto de contacto entre el sensor y la muestra. El voltaje aumentará más abruptamente cuando se prueben materiales de conductividad térmica más baja (por ejemplo, espuma). A la inversa, la pendiente de voltaje será más plana para los materiales de mayor conductividad térmica (por ejemplo, metal). Con el C-Therm TCi, los resultados se reportan en tiempo real a temperatura ambiente, lo que hace que la medición de conductividad térmica sea rápida y fácil.

Para este caso en específico, se inició probando las probetas seleccionando como material cerámico, sin embargo, las dos primeras lecturas aparecieron en rojo, con lo que se descartó que fuera el tipo de material con el que se debía realizar el ensayo. Seguido se probó seleccionando polímeros y al iniciar la prueba arrojó resultados en naranja, lo que significaba que los resultados





Tabla 3

Resultados obtenidos en el ensayo de conductividad térmica ( $W/m /K$ ) para muestras secadas a  $95^{\circ}C$

Relación	Muestra	Ensayo	1	2	3	4	5	Promedio
Si/Al = 2	A		0.190	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190
	B		0.200	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
Si/Al = 3	A		0.190	0.190	0.200	0.200	0.210	0.200
	B		0.180	0.190	0.190	0.190	0.190	0.190
Si/Al = 4	A		0.220	0.230	0.230	0.230	0.230	0.230
	B		0.190	0.190	0.200	0.200	0.210	0.200

Como se aprecia en las tablas, se tomaron 5 lecturas por cada ensayo que se realizó a la muestra y se realizó un promedio al final. Las unidades de los valores de las lecturas están expresados en vatios / (metros/kelvin) ( $W/m.K$ ), unidades del Sistema Internacional De Medidas. En los anexos se encuentran los reportes arrojados por el C-Therm donde se especifican otros parámetros como el valor de la efusividad y el valor inicial del voltaje de la prueba. De los promedios se puede observar que la menor conductividad la tiene la relación Si/Al=3 cuando la muestra se secó a una temperatura de  $60^{\circ}C$  ( $0.110 W/m. K$ ). Para los resultados obtenidos en la tabla 3, se puede ver que todos los valores de conductividad son muy parecidos y se encuentran entre los  $0.190$  y  $0.200 W/m K$ . En los resultados de la tabla 2 también se puede observar que los valores se encuentran en un rango muy similar, no se evidenció que hubiera grandes cambios entre los valores para las diferentes relaciones Si/Al. Del mismo modo se puede mencionar que no existe un patrón de cambio significativo a medida que se aumentaba la relación Si/Al, es decir, no se evidenció que a medida que la relación Si/Al aumentaba, la conductividad térmica aumentara o disminuyera, sino que se mantuvo en valores no tan alejados unos de los otros, lo que se evidenció fue que cuando la relación Si/A la era igual a 3, la conductividad térmica era la más baja en ambos tipos de secado, como se había mencionado anteriormente.

En el trabajo denominado “An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure” publicado por Wei Wang, Caifeng Lu, Yunxia Li, Qingtao Li (Wang, Lu, Li, & Li, 2017) la investigación arroja valores de conductividad térmica 1.271 W/m K para las muestras de cemento geopolimérico mezcladas con cemento tipo Portland comercial (según normas chinas, país de origen de la investigación) sintetizadas y sometidas a una temperatura de 250°C, 1.395 W/m K para una temperatura de 350°C y 1.694 W/m K para 550°C. Los resultados de Wang en comparación con los obtenidos en la presente investigación muestra que el cemento geopolimérico sintetizado tiene valores de conductividad térmica mucho más bajos en sus tres relaciones distintas de Si/Al.

A su vez, los valores promedios de todas las diferentes relaciones Si/Al y temperaturas de secado están por debajo del valor de la conductividad térmica para los morteros de cemento comercial tipo Portland, según lo expuesto por la Norma Chilena 853 de 2007 denominada “Acondicionamiento térmico – Envoltorio térmico de los edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas” (Norma Chilena, 2007) en la cual el valor para la conductividad térmica de los morteros de cemento comercial chileno tipo Portland es de 1.40 W/m.K. Este valor de conductividad térmica expuesto en dicha norma es mucho más alto para los valores de conductividad térmica obtenidos en la presente investigación, lo cual hace a los cementos geopoliméricos mas aislantes térmicos (en promedio 1.2 W/m K más bajos) que los morteros de cemento comercial tipo Portland. Adicional a las probetas, también se hizo ensayos de conductividad térmica sobre las materias primas utilizadas para la síntesis del cemento geopolimérico: la ceniza tamizada, la ceniza tamizada calcinada, la arena de sílice triturada y el silicato. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos y los reportes se muestran en los anexos.

Tabla 4  
*Resultados de conductividad térmica (W/m K) para materias primas*

	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>Promedio</b>
<b>Arena</b>	0,140	0,140	0,150	0,140	0,150	0,144
<b>Silicato</b>	0,650	0,650	0,650	-	-	0,650
<b>Ceniza</b>	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
<b>Ceniza calc.</b>	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090

De la Tabla 4, se puede observar que la conductividad térmica del silicato es la más alta de todas, puesto que la arena y la ceniza tiene valores bastante bajos. Estos bajos valores en la conductividad térmica de las materias primas del cemento geopolimérico podrían estar relacionados directamente con los bajos resultados para la conductividad térmica de los cementos geopoliméricos sintetizados que se analizaron. También se puede observar el bajo valor de conductividad térmica para el cemento comercial tipo Portland en polvo en comparación con el valor de conductividad térmica del mortero expuesto en la norma técnica chilena con el cual hizo comparación anteriormente.

#### **4.3.2 Caracterización mecánica: ensayo de compresión.**

Para los ensayos de compresión, se tuvo en cuenta lo expresado en la norma ASTM C39 donde se deben mantener una relación 1:2 entre el diámetro del espécimen y su longitud. Para esto se utilizó tubo de PVC para agua potable de 1 ¼ “(diámetro interno 37.7 mm) los cuales se cortaron a una longitud de 75.4 mm para así mantener la relación expresada en la norma (ver figura 20).



**Figura 20.** Moldes de PVC usados para realizar los especímenes para el ensayo de compresión.

Cabe mencionar que se efectuó el mismo procedimiento con el cual se preparó las probetas para el ensayo de conductividad térmica, las mismas proporciones y tiempos de curado y secado (ver figura 21); el interior de los tubos de PVC fue recubierto de igual manera con vaselina para evitar que la mezcla se adhiriera a las paredes y fuera sencillo el desmoldeo cuando ya estuvieran secas las muestras. Posterior a esto, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Suelos de la UFPS donde se realizó el ensayo respectivo debido a que en el Laboratorio de Resistencia de Materiales de la UFPS no fue posible realizar los ensayos porque el equipo es demasiado grande para la dureza y tamaño de las muestras. Las muestras se enumeraron de la siguiente manera:

- Si/Al=2: secado a 60°C → 1, 2. Secado a 95°C → 3, 4.
- Si/Al=3: secado a 60°C → 5, 6. Secado a 95°C → 7, 8.
- Si/Al=4: secado a 60°C → 9, 10. Secado a 95°C → 11, 12.



**Figura 21.** Muestras que se iban a usar para el ensayo de compresión en curado CCM.

Por motivos de fallos en el equipo que realiza la prueba, la probeta 5 no se pudo evaluar. Sobre las muestras estos son los resultados obtenidos para el diámetro de cada probeta:

Tabla 5  
*Diámetro y área de probetas*

<b>Probeta</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Diámetro (plg)</b>	<b>Área (plg<sup>2</sup>)</b>
1	37,3	1092,72	1,469	1,694
2	36,9	1069,41	1,453	1,658
3	37,4	1098,58	1,472	1,703
4	37,5	1104,47	1,476	1,712
5	37	1075,21	1,457	1,667
6	37	1075,21	1,457	1,667
7	37,85	1125,18	1,490	1,744
8	37,7	1116,28	1,484	1,730
9	36,5	1046,35	1,437	1,622
10	36,1	1023,54	1,421	1,586
11	37,4	1098,58	1,472	1,703
12	37,2	1086,87	1,465	1,685

A continuación se muestra los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para cada probeta. Los valores de d (distancia) están expresados  $\times 10^{-3}$  pulgadas y los valores de Q (carga aplicada) en libras fuerza.

Tabla 6  
*Resultados ensayo compresión probeta 1*

<b>Probeta 1</b>	
<b>d (<math>\times 10^{-3}</math> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	0,97
10	4,55
15	7,47
20	10,72
25	14,29
30	19,16
40	25,98
50	33,45
60	40,92
70	49,04
80	54,24
90	60,09
100	66,26
120	74,38
140	77,63
142	79,90
150	68,21
165	61,71
170	58,46

Tabla 7  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 2*

<b>Probeta 2</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	1,30
10	8,44
15	13,32
20	16,56
25	20,14
30	23,06
40	30,21
50	33,45
60	42,87
70	49,04
80	53,27
90	61,71
100	66,26
120	75,68
140	83,80
150	85,42
170	80,55
180	61,71
190	45,47

Tabla 8  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 3*

<b>Probeta 3</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	5,52
10	12,02
15	18,51
20	23,71
25	30,53
30	36,70
40	51,32
60	75,35
70	88,02
80	101,99
90	115,95
100	129,92
120	151,36
135	160,45



Tabla 9  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 4*

<b>Probeta 4</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	2,27
10	7,80
15	13,32
20	19,81
25	25,33
30	31,18
40	42,55
50	55,87
60	68,53
70	81,20
80	92,89
90	104,59
100	113,68

Tabla 10  
*Resultados ensayos de compresión Probeta 6*

<b>Probeta 6</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	6,82
10	13,97
15	18,84
20	25,01
25	30,53
30	39,63
40	53,27
50	72,11
60	86,40
70	102,31
80	112,38
90	127,00
100	142,26
120	156,23
140	168,25
160	182,86
180	193,26
200	201,38
210	203,00
220	196,50
230	188,38

Tabla 11  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 7*

<b>Probeta 7</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	2,60
10	6,17
15	9,74
20	12,99
25	16,56
30	19,81
40	30,21
50	42,22
60	51,97
70	64,96
80	78,28
90	89,97
100	103,29
120	123,10
140	149,73
155	156,23
165	142,91

Tabla 12  
*Resultados ensayos de compresión Probeta 8*

<b>Probeta 8</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	5,85
10	12,34
15	21,44
20	29,56
25	38,33
30	44,17
40	52,29
50	65,93
60	78,60
70	89,64
80	100,04
90	108,81
100	116,93
120	142,26
135	151,03

Tabla 13  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 9*

<b>Probeta 9</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	2,92
10	4,55
15	8,77
20	14,29
25	17,86
30	21,44
40	29,56
50	33,45
60	44,50
70	52,29
80	60,41
90	65,93
100	79,90
120	96,47
140	115,63
160	132,19
180	141,94
200	146,81
220	152,01
237	152,33
260	144,21
270	114,33
280	90,29

Tabla 14  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 10*

<b>Probeta 10</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	3,57
10	8,77
15	19,16
20	25,01
25	31,51
30	37,03
40	49,37
50	61,71
60	73,40
70	83,47
80	91,27
90	106,86
100	117,90
120	142,91
140	158,50
160	167,27
180	174,74
200	177,99
210	178,96
220	172,47
230	139,66

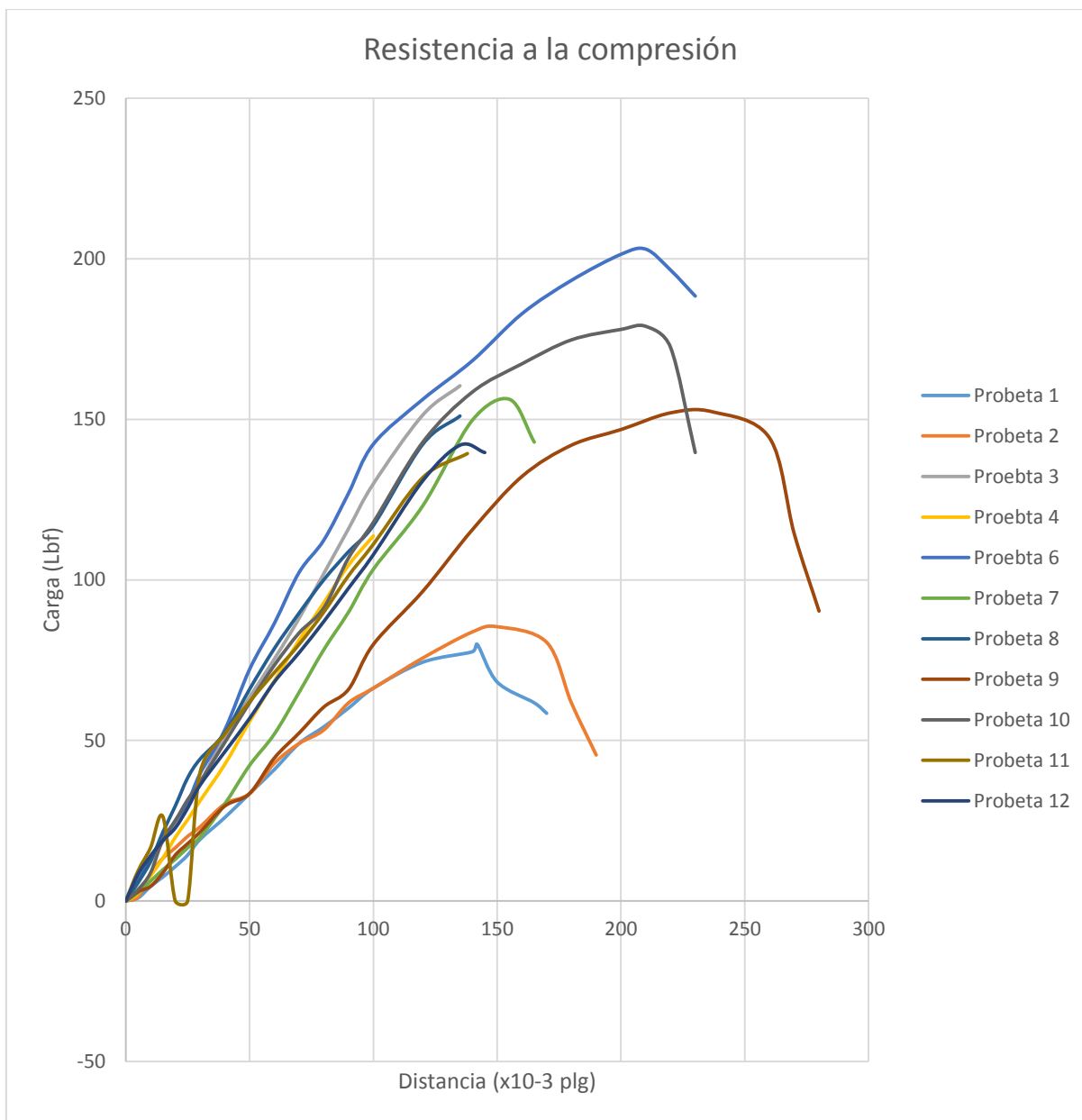
Tabla 15  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 11*

<b>Probeta 11</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	9,42
10	16,56
15	26,31
20	-
25	-
30	39,95
40	51,97
50	62,04
60	71,13
70	79,90
80	89,97
90	101,34
100	111,08
120	131,87
138	139,34

Tabla 16  
*Resultados ensayo de compresión Probeta 12*

<b>Probeta 12</b>	
<b>d (x10<sup>-3</sup> plg)</b>	<b>Q (lbf)</b>
0	0
5	8,44
10	13,97
15	18,84
20	22,74
25	28,91
30	36,05
40	46,45
50	56,84
60	68,21
70	77,30
80	87,05
90	97,44
100	107,83
120	130,89
135	141,94
145	139,66





**Figura 22.** Resultados ensayo de compresión.

Para muchas probetas no existen valores del descenso de la carga aplicada debido a que cuando la probeta llegaba al valor máximo de carga, este empezaba a descender demasiado rápido haciendo imposible tomar valores de carga y distancia y terminaban estallando las probetas. A continuación algunas fotos de lo sucedido en los ensayos de compresión.



**Figura 23.** Imágenes de los ensayos de compresión.

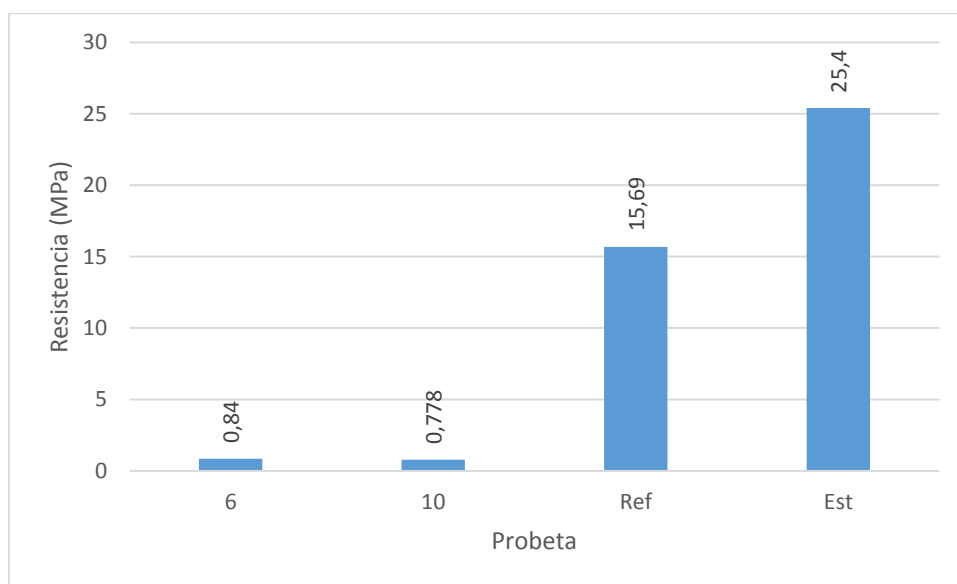
Los resultados que se tomaban de la lectura de los relojes del equipo tenía un valor por unidad de 0,3248 lb, es por eso que los valores de fuerza se muestran con valores decimales; los cálculos de dichos dato se realizaron en una hoja de cálculo de Excel. Teniendo en cuenta la fórmula para el cálculo de la presión que se ejerce sobre la superficie de un cuerpo  $P = F/A$  en donde P es la presión, F la fuerza aplicada y A, el área perpendicular a la fuerza aplicada, se calculó la presión que se ejerció sobre las probetas. La tabla siguiente muestra el valor para las presiones máximas de cada probeta.

Tabla 17  
*Resultados del valor de presión*

<b>Probeta</b>	<b>Fuerza Máx. (lbf)</b>	<b>Área (plg<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión (lb/plg<sup>2</sup>)</b>	<b>Presión (Mpa)</b>
<b>1</b>	79,9	1,694	47,17	0,325
<b>2</b>	85,42	1,658	51,52	0,355
<b>3</b>	160,45	1,703	94,22	0,650
<b>4</b>	113,68	1,712	66,40	0,458
<b>5</b>	-	-	-	-
<b>6</b>	203	1,667	121,78	0,840
<b>7</b>	156,23	1,744	89,58	0,618
<b>8</b>	151,03	1,73	87,30	0,602
<b>9</b>	152,33	1,622	93,91	0,648
<b>10</b>	178,96	1,586	112,84	0,778
<b>11</b>	139,34	1,703	81,82	0,564
<b>12</b>	141,94	1,685	84,24	0,581

De los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión resumidos en la Tabla 17 se puede observar que la probeta 6, aquella con una relación Si/Al=3 y una temperatura de secado de 60°C fue aquella que obtuvo el valor más alto de resistencia a la compresión. Se debe mencionar que se esperaba que aquellas probetas con relación Si/Al=4 fueran aquellas que tuvieran los valores más altos y sobre todo aquellas probetas con esta última relación mencionada pero secadas a 95°C, esto en referencia a la investigación de la cual se tomó el método de curado y

secado, en esta se obtuvieron resultados demasiado buenos (102 Mpa para la resistencia a la compresión) con esa misma relación Si/Al y con el mismo método de secado y curado. La probeta 10 también tuvo un valor alto en la prueba de resistencia, esta tenía una relación Si/Al=4 y una temperatura de secado de 60°C. De los resultados obtenidos también se puede analizar que las probetas con mejores resultados fueron secadas a 60°C, con la excepción de las probetas 1 y 2 que poseían relación Si/Al=2 las cuales arrojaron los resultados más bajos. Si se toma el mejor resultado obtenido (0,84 Mpa) y se compara con el resultado obtenido en el estudio de donde se tomó las relaciones que se usaron para la síntesis del cemento geopolimérico (Luna et al., 2015) que fue de 25,4 Mpa aún es bastante bajo, incluso con el valor de referencia para morteros de cemento comercial tipo Portland y arena que es de 15,69 Mpa. En la Figura 22 se evidencia las diferencias entre los resultados obtenidos y aquellos con los cuales se hace la comparación.



**Figura 24.** Grafico comparativo de resultados prueba de resistencia a la compresión.

Los valores 6 y 8 corresponden a los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de las probetas sintetizadas en el presente estudio; Ref es el valor de referencia para el mortero de cemento Portland comercial; Est es el valor del resultado en el estudio de Luna 2015.

### 4.3.3 Otras caracterizaciones.

En este aparte se mostraran los resultados de otras características que se obtuvieron de las muestras del cemento geopolimérico. La primera de ella es la efusividad térmica, la cual fue arrojada como otro dato dentro de los resultados del C-Therm al realizar el ensayo de conductividad. La efusividad térmica puede definirse como la capacidad de un material para absorber o restituir una cierta potencia térmica. Un material tendrá alta efusividad si su conductividad y su capacidad calórica es alta, por tanto, se refiere a un material que tiene gran capacidad para conducir a través de él una cierta cantidad de calor absorbida y una gran masa, o más genéricamente, una gran capacidad calórica para distribuir ese calor absorbido, aumentando mínimamente su temperatura, permitiendo así el almacenamiento de grandes cantidades de calor. Esta facilidad para absorber este flujo de calor, se manifiesta también en una facilidad para ceder este flujo (Salaverry Ramirez, 2008). La ecuación 1 (Salaverry Ramírez 2008) muestra la fórmula para el cálculo de la efusividad térmica donde  $\lambda$  es la conductividad térmica,  $\rho$  es el valor de la densidad y  $C$  es el calor específico.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C} \quad \left[ \frac{W \cdot \sqrt{s}}{m^2 \cdot K} \right] \quad (1)$$

Los valores de efusividad térmica arrojados por el C-Therm fueron los siguientes:

Tabla 18  
Resultados para la efusividad para el secado a 60°C

Relación	Muestra	Ensayo	1	2	3	4	5	Promedio
Si/Al = 2	A		462	464	464	465	465	464
	B		465	469	467	471	472	469
Si/Al = 3	A		281	283	284	285	287	284
	B		314	316	319	320	322	318
Si/Al = 4	A		533	539	541	544	546	541
	B		364	365	365	367	368	366

Tabla 19  
Resultados para la efusividad para el secado a 95°C

Relación	Muestra	Ensayo	1	2	3	4	5	Promedio
Si/Al = 2	A		597	594	599	599	602	598
	B		626	629	635	637	635	632
Si/Al = 3	A		582	605	620	631	642	616
	B		576	582	586	590	595	586
Si/Al = 4	A		698	708	713	721	727	713
	B		598	608	615	616	623	612

De igual manera como sucedió con el ensayo de conductividad térmica, no fue posible evaluar la efusividad térmica de las probetas de mortero realizadas con cemento tipo Portland debido a que no se pudo dar un acabado uniforme a las caras para que el sensor del C-Therm pudiera realizar la prueba.

Otro ensayado realizado para determinar otra característica de este tipo de cementos es el de absorción de agua. Para este ensayo se tomó una muestra de cada relación secada a 60°C y otra secada a 95°C y se llevaron a la estufa a 40°C durante un periodo de 4 horas con el fin de eliminar posibles humedades que existieran en las muestras, aunque estas se encontraban en unas bolsas resellables aisladas de la humedad del ambiente. Al terminar el tiempo se dejaron enfriar dentro de

la estufa hasta que llegaran a una temperatura ambiente, esto se determinó por la lectura de la temperatura del interior mostrada en la pantalla de la estufa. Cuando se alcanzó la temperatura ambiente, se pesaron una por una, se colocaron en recipientes los cuales fueron identificados y luego se llenaron con agua, de modo que las muestras fueron cubiertas en su totalidad (Figura 23). Se dejaron sumergidas durante doce horas con el fin de asegurar que la muestra haya sido saturada totalmente de agua; al terminar el tiempo se sacaron de los recipientes con agua y con un paño se limpió el agua que goteaba y se procedió a pesar cada muestra.



**Figura 25.** Muestras en recipientes con agua para determinar la cantidad de agua absorbida.

En la siguiente tabla se relacionan los valores de las masas en seco y saturadas de agua (masa húmeda) y el valor del porcentaje de absorción de agua el cual se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{absorción} = \frac{m_{hum} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100 \quad (2)$$

Tabla 20  
Valores de masa seca, húmeda y porcentaje de absorción de agua.

	Masa Seca (g)	Masa Húmeda (g)	% Absorción
Si/Al=2 (60°C)	44.81	57.78	28.94%
Si/Al=3 (60°C)	44.15	55.56	25.84%
Si/Al=4 (60°C)	49.28	59.85	21.42%
Si/Al=2 (95°C)	45.11	57.35	27.13%
Si/Al=3 (95°C)	46.97	58.97	25.55%
Si/Al=4 (95°C)	44.40	55.00	23.87%

De la tabla 20 puede observarse que existe como un comportamiento que se repite para ambas temperaturas de secado. Las muestras con relación Si/Al=2 fueron las que tuvieron una mayor absorción de agua, mientras que las de relación Si/Al=4 fueron las que menor agua absorbieron. Por último, se tomaron medidas a las probetas con el fin de determinar la densidad aparente del material. Para esto se midió el diámetro y la altura de cada probeta con el fin de determinar el volumen de cada una utilizando  $v = (\pi \cdot d^2 \cdot h)/4$ , posteriormente se pesaron y se procedió al cálculo de la densidad aparente con la formula  $\rho = m/v$ . Los datos encontrados son suministrados en la tabla 21:

Tabla 21  
Densidad aparente ( $g/mm^3$ ) del material

Muestra		60°C				95°C			
		h	d	m	$\rho$	h	d	m	$\rho$
Si/Al=2	A	15,25	55,1	46,3	0,0012733	15,4	56,6	46,41	0,0011978
	B	14,9	57	36,71	0,0009655	13,8	55,7	43,29	0,0012874
Si/Al=3	A	15,1	55	46,15	0,0012864	15,7	56,3	48,75	0,0012473
	B	15,7	55,6	48,81	0,0012805	15,7	56,85	48,05	0,0012057
Si/Al=4	A	16,2	54,3	53,5	0,0014261	14	55	45,94	0,0013812
	B	15,5	54,5	49,97	0,001382	15,8	55,4	49,9	0,0013102



Los valores de altura (h) y el diámetro (d) están dados en milímetros (mm); el valor de la masa (m) está en gramos (g), por ende el valor de la densidad ( $\rho$ ) está en unidades de gramos sobre milímetros al cubo ( $\text{g/mm}^3$ ). Para poder hacer una comparación más sencilla, los valores de la densidad se pasaron a kilogramos sobre metro cubico ( $\text{kg/m}^3$ ), los valores se ven en la tabla 22:

Tabla 22  
*Valores de la densidad aparente en  $\text{kg/m}^3$  del material*

		60°C	95°C
Muestra		$\rho$	$\rho$
Si/Al=2	A	1273,3	1197,8
	B	965,5	1287,4
Si/Al=3	A	1286,4	1247,3
	B	1280,5	1205,7
Si/Al=4	A	1426,1	1381,2
	B	1381,9	1310,2

En la tabla 22, los valores de la densidad aparente ( $\rho$ ) están dados en unidades de kilogramos sobre metros cúbicos ( $\text{kg/m}^3$ ). Se puede apreciar que la densidad de todas las muestras es muy similar, en un promedio de los  $1250 \text{ kg/m}^3$ . Este valor de densidad asemeja mucho al valor de un mortero ligero que es de  $1300 \text{ kg/m}^3$  según la Norma Europea (UNE-EN 1015-6). En el caso de la Norma Técnica Colombiana (NTC), no se encontró un valor de referencia con el cual comparar pues como se especifica en las distintas normas que hablan sobre el cemento y los morteros y concretos, existen diferentes tipos de estos y las normas establecen parámetros para la fabricación y composición de estos dependiendo del uso que se pretenda. Para el caso de las muestras de mortero realizadas (Figura 24) para la comparación, arrojó una densidad aparente de:

Tabla 23  
*Densidad aparente en kg/m<sup>3</sup> para probetas de cemento*

Muestra	Masa (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	99.74	52.86	1.88	1886.87
2	95.57	51.03	1.87	1872.82

Las probetas de mortero con cemento Portland realizadas en el laboratorio dieron como resultado una mayor densidad aparente que la del cemento geopolimérico. Este mortero fue realizado utilizando dos partes de arena limpia y cernida y una de cemento tipo Portland.



**Figura 26.** Probetas de cemento Portland, utilizadas para medir la densidad aparente.

Adicional a esto, se buscaron fuentes en donde se haya publicado valores de densidad para morteros sintetizados a partir de cenizas volantes (cementos geopoliméricos) y se encontró que en el estudio titulado “Thermal Properties of High-Volume Fly Ash Mortars and Concretes” publicado por D. P. Bentz y M. A. Peltz de la Universidad de Nuevo León en México (Bentz,

Peltz, Durán-Herrera, Valdez, & Juárez, 2011) registraron en la tabla 2 de dicha investigación, un valor de densidad de  $2100 \text{ Kg/m}^3$  para su mortero con cenizas volantes clase F, este resultado permite mostrar que los valores de densidad aparente para las muestras realizadas en el presente estudio tienen un valor inferior en cuanto a densidad aparente.

## 5. Conclusiones

Para la realización de una composición funcional de ceniza, solución alcalina y agua no existe una única proporción, esto se ve reflejado en las investigaciones donde cada uno de estos parámetros varía y confiere características distintas. En la búsqueda de las proporciones adecuadas para obtener un cemento geopolimérico se observó que es necesario calcinar y tamizar la ceniza que se va a usar debido a la presencia de inquemados en la ceniza, de igual manera se hizo necesario agregar arena de sílice con el fin que hiciera más fuerte la mezcla al secarse y así no se rompiera tan fácilmente; esta arena a utilizar debe ser molida y pasada por el mismo tamiz que la ceniza con el fin de que ambas materias primas utilizadas puedan mezclarse homogéneamente y no haya precipitación de la arena. La relación L/S 0,20 permitió que la mezcla tuviera fluidez pero a su vez consistencia, asemejando a una pasta fluida, una mayor cantidad de agua convertía la mezcla muy líquida. Durante el mezclado, se sugirió un tiempo de 5 minutos, más sin embargo este puede aumentar si se observa que se requiere.

Para la síntesis del cemento geopolimérico se escogió el método de curado CCM (Curing on covered moulds) ya que evitaba que hubiera una pérdida excesiva y acelerada de humedad dentro de las muestras. En esta etapa de la síntesis del cemento geopolimérico se observó que cuando la mezcla se vaciaba en los moldes el material presentaba un comportamiento tixotrópico y cuando este seca aparecía una capa muy fina y brillante en la cara que quedaba al aire, lo que se cree sea debido a la tixotropía del material; también se observó en el vaciado de los moldes la presencia de muchas burbujas de aire que aparecen en la mezcla, las cuales se trataron de eliminar golpeando los moldes en similitud a lo expuesto en la norma ASTM C39 mas sin embargo el método no es

100% efectivo; otra característica observada durante el vaciado de los diferentes moldes fue que a medida que la cantidad de arena que agregaba aumentaba, la mezcla se hacía más líquida.

En los ensayos de caracterización térmica se obtuvieron resultados bastante buenos, esto en el sentido de que el cemento geopolimérico sintetizado tiene muy baja conductividad térmica en comparación con el valor de referencia de 1,40 W/m K expuesto por la Norma Técnica Chilena para morteros de cemento comercial tipo Portland y arena. De las relaciones Si/Al sintetizadas y las dos diferentes temperaturas de secado que se emplearon resultó que las probetas con una relación Si/Al=3 y secadas a 60°C tuvieron los valores más bajos de conductividad térmica, de igual manera tuvieron los valores más bajos de efusividad térmica.

Para el ensayo de resistencia a la compresión los resultados obtenidos no fueron muy buenos. Ninguna de las muestras superó una presión mayor a 1 Mpa; la muestra que tuvo un valor más alto de resistencia a la compresión fue aquella con una relación Si/Al=3 y temperatura de secado de 60°C, con 0,84 Mpa. El valor de referencia de resistencia a la compresión para morteros de cemento comercial tipo Portland y arena es de 15, 69 Mpa por lo cual se dice que los resultados obtenidos no son los mejores. Se esperaba que la relación Si/Al=4 y secado a 95°C obtuvieran los mejores resultados ya que contenían mayor cantidad de arena de sílice y por los resultados que se obtuvieron en las investigaciones consultadas.

En las características adicionales que se midieron, se encontró que la densidad aparente del cemento geopolimérico (1250 kg/m<sup>3</sup> en promedio) es inferior al valor de densidad para morteros de cementos comerciales tipo Portland (1850 kg/m<sup>3</sup> en promedio) medidas en el laboratorio al elaborar dos probetas (Figura 34). Adicionalmente se midió la absorción de agua de las diferentes relaciones y temperaturas de secado y se obtuvo un rango entre el 22% y el 29%, siendo la relación Si/Al=4 y secada a 60°C la que menos agua absorbió y aquella con relación Si/Al=2 y secada a

60°C la de mayor absorción. Estos resultados fueron en promedio un 10% más alto si se compara con el estudio realizado por Luna-Galiano en el 2015 el obtuvo un valor de absorción de agua de 16,2% en el cual el autor afirma que valores altos de absorción de agua afectan directamente la resistencia a la compresión de los cementos geopoliméricos.

## 6. Recomendaciones

Para el presente estudio, se recomienda sea continuado por un equipo multidisciplinar con el fin de encontrar una utilidad al cemento geopolimérico y pueda ser analizado el comportamiento que pueda tener como un concreto y cuando se adicionan agregados finos como la cal.

Se recomienda utilizar moldes de materiales metálicos cuando se vayan a realizar las probetas altas como las usadas para los ensayos de compresión, esto debido a que el PVC tiene una baja conductividad térmica (0,16 W/m K) e impide el secado correcto de muestras de mayor tamaño, además a temperaturas altas presenta pequeñas deformaciones.

Para la síntesis se recomienda otros métodos de eliminación de las burbujas de modo que estas no afecten resultados como la resistencia a la compresión. de igual manera se recomienda en esta etapa se hagan pruebas de secado a temperatura ambiente a 7, 14 y 28 días para analizar si estos tiempos de secado mejoran características como la resistencia a la compresión.

### Referencias bibliográficas

- Arenas, C., Luna-Galiano, Y., Leiva, C., Vilches, L. F., Arroyo, F., Villegas, R., & Fernández-Pereira, C. (2017). Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers. *Construction and Building Materials*, 134, 433–442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.119>
- ASTM. ASTM C618 (2014). <https://doi.org/10.1520/C0618>
- ASTM International. (2001). *Astm C125-00a. Current* (Vol. 93). <https://doi.org/10.1520/E0007-03R09.2>
- ASTM. (2003). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- Banco de la Republica. (2017). *Banrepcultural*. Obtenido de <http://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php?title=Aglomerantes>
- Bentz, D. P., Peltz, M. A., Durán-Herrera, A., Valdez, P., & Juárez, C. A. (2011). Thermal properties of high-volume fly ash mortars and concretes. *Journal of Building Physics*, 34(3), 263–275. <https://doi.org/10.1177/1744259110376613>
- BLU Radio, R. (06 de Marzo de 2018). Declaran estado de alerta por altos niveles de contaminación en el Valle de Aburrá. *BLU Radio*, pág. 1.
- Bolivar , G. (s.f.). *Lifeder*. Obtenido de <https://www.lifeder.com/monomeros/>
- Calderon Rodriguez, F. (10 de Diciembre de 2011). *Polimeros*. Obtenido de <https://polimers.wordpress.com/tag/siloxano/>



- Callister, W. D. (2009). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Ciudad de México: Editorial Limusa.
- Cornejo, L. (n.d.). Geopolímeros 12 . Materiales Cementantes de Activación Alcalina ( MAA , AAM );, 77–91.
- Corona Zazueta, M. A. (1997). Concretos dosificados con cemento portland y ceniza volante. Universidad de Sonora. División de Ciencias e Ingeniería.
- C-Therm Technology*. (2018). Obtenido de [https://ctherm.com/products/tci\\_thermal\\_conductivity/how\\_the\\_tci\\_works/mtps/](https://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/how_the_tci_works/mtps/)
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Concrete a review. *Geopolymer Science and Technics*, 21(0), 1–11.
- Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 335–350. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038>
- Gutierrez Torres, A. G. (2017). *Obtención de geopolímeros sintetizados como uso alternativo del cemento portland*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *Research Report GC*, 94. Retrieved from [http://www.geopolymer.org/fichiers\\_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf](http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf)
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (4th ed.). Mexico: Mc Graw Hill. <https://doi.org/10.1186/s12885-018-4263-3>
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodologia de la investigación* (6th ed.). Ciudad de Mexico: McGraw Hill.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Ciudad de Mexico: Pearson Educación .

Kovalchuk, G., Fernández-jiménez, A., & Palomo, A. (2008). Activación alcalina de cenizas volantes . Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza Alkali-activated fly ash . Relationship between mechanical strength gains and initial ash chemistry. *Materiales de Construcción*, 58(291), 35–52.

Kovalchuk, G., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2007). Alkali-activated fly ash: Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development - Part II. *Fuel*, 86(3), 315–322. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.07.010>

Kuhl, H. (1951). Zement Chemie.

Kunthe, V. D., Manavendra, G., & Sondur, V. M. (2018). Effect of thermal properties on fly ash based concrete, 396–400.

Li, C., Sun, H., & Li, L. (2010). A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements. *Cement and Concrete Research*, 40(9), 1341–1349. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.020>

Luna, Y., Cornejo, A., Leiva, C., Vilches Arenas, L. F., & Fernández Pereira, C. (2015). Properties of fly ash and metakaolín based geopolymer panels under fire resistance tests. *Materiales de Construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 319, 2015, 65(319), 3. <https://doi.org/10.3989/mc.2015.06114>

Martinez, D., & Cicuamía, C. (2014). *Síntesis y caracterización de zeolitas a partir de cenizas volantes de carbón*. Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales.

Mo, K. H., Alengaram, U. J., & Jumaat, M. Z. (2016). Structural performance of reinforced

- geopolymer concrete members: A review. *Construction and Building Materials*, 120, 251–264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.088>
- Norma Chilena. (2007). *Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas*. Santiago de Chile.
- NTC. (2010). *Concretos, Ensayo de resistencia a la compresion de especimenes cilindricos de concreto*. Bogotá: ICONTEC.
- NTC 3356. (2000). *Morteros Premezclados para Mamposteria*. Bogotá: ICONTEC.
- Peña Alvarez, C. M. (3 de 01 de 2011). *Avibert*. Obtenido de <http://avibert.blogspot.com/2011/01/determinacion-de-cenizas-por-el-metodo.html>
- Ortega Triana, L. R. (2014). *trabajo\_RENE\_final*. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Ossa, M., & Jorquera, H. (1984). Cementos con cenizas volantes. *Materiales de Construcción*, 34, 1–15. <https://doi.org/10.3989/mc.1984.v34.i193.956>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Provis, J., & van Deventer, J. (2014). *Alkali Activated Materials* (1st ed.). Springer Netherlands.
- Restrepo, J., Restrepo, O., & Tobon, J. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland. <Http://Www.Scielo.Org.Co/Pdf/Dyna/V73n150/A12v73n150.Pdf>. *Accesed 31 Oct 2015.*, 131–141.
- Salaverry Ramirez, M. A. (2008). *Inercia termica: Influencia de la masa de muros en el comportamiento termico de viviendas sociales*. Universidad de Chile.

- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Silicatos Especiales. (2016). *SE Silicatos Especiales*. Obtenido de <https://www.silicatosespeciales.com.mx/productos/silicato-de-sodio/>
- Superintendencia del Medio Ambiente. (2014). Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas, 25.
- Termotasajero. (2008). *Termotasajero Colgener*. Obtenido de [http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com\\_content&task=view&id=17&Itemid=36](http://www.termotasajero.com.co/page/index.php?option=com_content&task=view&id=17&Itemid=36)
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista Ingeniería de Construcción*, 32(2), 5–12. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- Valencia-Saavedra, W., Mejía de Gutiérrez, R., & Gordillo, M. (2018). Geopolymeric concretes based on fly ash with high unburned content. *Construction and Building Materials*, 165, 697–706. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.071>
- Van Chanh, N., Trung, B. D., & Van Tuan, D. (2008). Recent research geopolymer concrete. *International Conference of Asian Concrete Federation*, 18, 235–241. <https://doi.org/10.1007/s11280-013-0210-z>
- Wang, W., Lu, C., Li, Y., & Li, Q. (2017). An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 148, 148–

154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.068>

Wikipedia. (25 de 10 de 2017). *Wikipedia*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Nesosilicato>

**ANEXOS**

## Anexo 1. Resultados ensayo de conductividad a muestras sintetizadas.

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer		Test Report						
Test ID: C THERM27-317 Instrument: TH91-13-00644 Test Method: Liquids and Powders Default		Report Generated on: 04-Feb-2019 16:07:51  Software Version: 4.0.4.0 Test started on: 31-Jan-2019 Performed by: Administrator User ID: ADMIN						
Project: Cemento Geopolimerico Material: Distilled Water Material Lot: S/AI 2 - 60 C								
#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W \cdot s^{1/2}}{(m^2) \cdot K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	10:44:07	462	0.150	27.66	1.81	5,172.78
2	1	H271	10:45:19	464	0.150	27.61	1.81	5,172.38
3	1	H271	10:46:31	464	0.150	27.63	1.81	5,172.46
4	1	H271	10:47:43	465	0.150	27.61	1.81	5,172.91
5	1	H271	10:48:55	465	0.150	27.60	1.81	5,173.15
<b>Notes:</b> Last Edited By: _____ Last Edited On: _____								

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:03:20

**Test ID:** CTherm27-318  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA 2 - 60C (B)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	10:53:36	465	0.150	27.69	1.81	5,174.30
2	1	H271	10:54:51	469	0.150	27.75	1.80	5,175.28
3	1	H271	10:56:07	467	0.150	27.76	1.81	5,175.75
4	1	H271	10:57:18	471	0.150	27.83	1.80	5,176.04
5	1	H271	10:58:34	472	0.150	27.89	1.80	5,176.36

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:



**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:08:21

**Test ID:** CTherm27-323  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA 2 - 95C (A)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:38:22	587	0.190	28.34	1.70	5,184.47
2	1	H271	11:39:41	594	0.190	28.47	1.70	5,185.75
3	1	H271	11:40:52	599	0.190	28.55	1.69	5,186.61
4	1	H271	11:42:09	599	0.190	28.58	1.68	5,187.12
5	1	H271	11:43:29	602	0.190	28.64	1.69	5,186.96

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:09:41

**Test ID:** CTherm27-325  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA 2 - 95C (B.)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:53:32	626	0.200	28.53	1.67	5,186.77
2	1	H271	11:54:50	629	0.200	28.64	1.66	5,187.96
3	1	H271	11:56:02	635	0.200	28.70	1.66	5,188.56
4	1	H271	11:57:17	637	0.200	28.72	1.65	5,188.85
5	1	H271	11:58:30	635	0.200	28.74	1.66	5,188.85

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:04:17

**Test ID:** CTherm27-319  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA1 3 - 60C (A)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:01:44	281	0.100	27.78	2.04	5,178.33
2	1	H271	11:02:56	283	0.100	27.85	2.04	5,177.04
3	1	H271	11:04:12	284	0.100	27.87	2.04	5,177.74
4	1	H271	11:05:24	285	0.100	27.92	2.04	5,178.10
5	1	H271	11:06:35	287	0.100	27.96	2.03	5,178.47
6	1	H271	11:07:53	289	0.100	27.96	2.03	5,178.34

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:05:02

**Test ID:** CTherm27-320  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA1 3 - 60C (B)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:11:01	314	0.110	28.00	2.00	5,179.21
2	1	H271	11:12:17	316	0.110	28.06	2.00	5,179.96
3	1	H271	11:13:30	319	0.110	28.08	1.99	5,180.42
4	1	H271	11:14:42	320	0.110	28.13	1.99	5,180.72
5	1	H271	11:15:54	322	0.110	28.13	1.99	5,180.89

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:10:10

**Test ID:** CTherm27-328  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIIAI 3 - 95C (A)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	12:01:31	582	0.190	28.42	1.73	5,185.24
2	1	H271	12:02:50	605	0.190	28.54	1.71	5,187.10
3	1	H271	12:04:07	620	0.200	28.64	1.69	5,187.78
4	1	H271	12:05:19	631	0.200	28.68	1.68	5,188.50
5	1	H271	12:06:30	642	0.210	28.70	1.68	5,188.62

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:10:40

**Test ID:** CTherm27-327  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA1 3 - 95C (B)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	12:09:47	578	0.190	28.44	1.70	5,185.77
2	1	H271	12:10:58	582	0.190	28.56	1.70	5,187.11
3	1	H271	12:12:18	588	0.190	28.62	1.70	5,187.93
4	1	H271	12:13:37	590	0.190	28.66	1.69	5,188.64
5	1	H271	12:14:49	595	0.190	28.74	1.68	5,189.20
6	1	H271	12:16:01	594	0.190	28.78	1.68	5,189.47

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:05:32

**Test ID:** CTherm27-321  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA1 4 - 60C (A)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W \cdot s}{(m^2) \cdot K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:19:32	533	0.170	28.07	1.74	5,180.65
2	1	H271	11:20:45	539	0.170	28.15	1.73	5,181.65
3	1	H271	11:21:57	541	0.170	28.18	1.73	5,182.05
4	1	H271	11:23:10	544	0.170	28.22	1.73	5,182.50
5	1	H271	11:24:22	548	0.180	28.25	1.73	5,182.94

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:08:37

**Test ID:** CTherm27-322  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA1 4 - 60C (B)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	11:28:30	364	0.120	28.43	1.93	5,184.76
2	1	H271	11:29:42	365	0.120	28.54	1.93	5,185.97
3	1	H271	11:31:03	365	0.120	28.56	1.93	5,186.10
4	1	H271	11:32:14	367	0.120	28.59	1.92	5,186.67
5	1	H271	11:33:26	368	0.120	28.60	1.93	5,187.08

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:



**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:11:17

**Test ID:** CTherm27-328  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIIAI 4 - 95C (A)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W \cdot s^{1/2}}{(m^2 \cdot K)}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	12:19:04	698	0.220	28.57	1.63	5,187.32
2	1	H271	12:20:17	708	0.230	28.68	1.62	5,188.38
3	1	H271	12:21:34	713	0.230	28.78	1.61	5,189.50
4	1	H271	12:22:46	721	0.230	28.82	1.60	5,190.55
5	1	H271	12:23:58	727	0.230	28.87	1.60	5,190.74

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 04-Feb-2019 16:11:45

**Test ID:** CTherm27-330  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 31-Jan-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** SIVA 4 - 95 C (B)

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	12:35:50	598	0.190	28.87	1.71	5,190.92
2	1	H271	12:37:02	608	0.190	28.96	1.70	5,191.61
3	1	H271	12:38:13	615	0.200	28.95	1.69	5,192.14
4	1	H271	12:39:32	616	0.200	28.97	1.69	5,191.99
5	1	H271	12:40:44	623	0.200	28.98	1.68	5,192.06

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

## Anexo 2. Resultados ensayo de conductividad a materia prima.

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer		Test Report						
Test ID: C THERM27-331 Instrument: TH91-13-00644 Test Method: Liquids and Powders Default		Report Generated on: 07-Feb-2019 17:37:13  Software Version: 4.0.4.0 Test started on: 07-Feb-2019 Performed by: Administrator User ID: ADMIN						
Project: Cemento Geopolimerico Material: Distilled Water Material Lot: Ceniza tamizada								
#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W \cdot s^{1/2}}{(m^2) \cdot K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	17:31:35	234	0.090	27.28	2.04	5,168.05
2	1	H271	17:32:46	232	0.090	27.30	2.04	5,168.03
3	1	H271	17:33:58	233	0.090	27.31	2.04	5,168.48
4	1	H271	17:35:11	232	0.090	27.32	2.04	5,168.94
5	1	H271	17:36:22	231	0.090	27.37	2.04	5,169.52
<b>Notes:</b> Last Edited By: _____ Last Edited On: _____								

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 07-Feb-2019 17:50:59

**Test ID:** CTherm27-332  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 07-Feb-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** Ceniza tamizada calcinada

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	17:44:52	240	0.090	28.51	2.03	5,183.27
2	1	H271	17:46:11	239	0.090	28.47	2.03	5,183.28
3	1	H271	17:47:23	240	0.090	28.47	2.03	5,183.08
4	1	H271	17:48:34	240	0.090	28.45	2.03	5,182.90
5	1	H271	17:49:46	240	0.090	28.43	2.03	5,182.47

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On:

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 20-Dec-2018 12:50:38

**Test ID:** CTherm27-300  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 20-Dec-2018  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Silicato  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** Silicato

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	12:24:03	1,661	0.650	27.56	1.03	5,175.68
2	1	H271	12:25:15	1,662	0.650	27.41	1.03	5,174.18
3	1	H271	12:26:27	1,659	0.650	27.32	1.03	5,173.19

**Notes:**

Last Edited By: \_\_\_\_\_ Last Edited On: \_\_\_\_\_

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 07-Feb-2019 18:04:06

**Test ID:** CTherm27-333  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 07-Feb-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** Arena de silice triturada

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	17:58:12	443	0.140	28.86	1.80	5,188.40
2	1	H271	17:59:25	443	0.140	28.88	1.80	5,188.85
3	1	H271	18:00:42	444	0.150	28.87	1.80	5,189.09
4	1	H271	18:01:55	443	0.140	28.87	1.80	5,189.22
5	1	H271	18:03:12	444	0.150	28.84	1.79	5,188.90

**Notes:**

Last Edited By: \_\_\_\_\_ Last Edited On: \_\_\_\_\_

**C-THERM TCI™**  
 Thermal Conductivity Analyzer

**Test Report**

Report Generated on: 07-Feb-2019 18:17:11

**Test ID:** C THERM27-334  
**Instrument:** TH91-13-00644  
**Test Method:** Liquids and Powders Default

**Software Version:** 4.0.4.0  
**Test started on:** 07-Feb-2019  
**Performed by:** Administrator  
**User ID:** ADMIN

**Project:** Cemento Geopolimerico  
**Material:** Distilled Water  
**Material Lot:** Cemento Tipo Portland

#	Repeat	Sensor ID	Start Time	Effusivity $\frac{W\sqrt{s}}{(m^2)K}$	Conductivity (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H271	18:11:32	294	0.100	29.03	1.95	5,191.58
2	1	H271	18:12:44	294	0.100	29.06	1.94	5,191.44
3	1	H271	18:14:02	294	0.100	29.00	1.95	5,191.58
4	1	H271	18:15:20	295	0.100	29.06	1.95	5,191.00
5	1	H271	18:16:31	295	0.100	28.96	1.95	5,190.61

**Notes:**

Last Edited By:

Last Edited On: