



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**CARACTERIZACIÓN DE UN GEOPOLÍMERO A BASE DE PIEDRA  
PÓMEZ Y HUMO DE SÍLICE COMO MATERIAL PRECURSOR**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil**

**Autores:**

Castillo Cevallos, Jefferson Javier

Mieles Mariño, Mayte Lisbeth

**Tutor:**

Ing. Alexis Iván Andrade Valle MsC

**Riobamba, Ecuador. 2022**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

Nosotros, Jefferson Javier Castillo Cevallos, con cédula de ciudadanía 2200156111 y Mayte Lisbeth Mieles Mariño, con cédula de ciudadanía 2350239865, autores del trabajo de investigación titulado: Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 15 de agosto de 2022



Jefferson Javier Castillo Cevallos

C.I: 2200156111



Mayte Lisbeth Mieles Mariño

C.I: 2350239865

## **DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor, presentado por Jefferson Javier Castillo Cevallos, con cédula de ciudadanía 2200156111 y Mayte Lisbeth Mieles Mariño, con cédula de ciudadanía 2350239865, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 15 días del mes de agosto de 2022.

Ing. María Gabriela Zúñiga Rodríguez MsC  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO**



Ing. Luis Enrique Villafuerte Bermúdez MsC  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés MsC  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Alexis Iván Andrade Valle MsC  
TUTOR



## **CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL**

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor por Jefferson Javier Castillo Cevallos, con cédula de ciudadanía 2200156111 y Mayte Lisbeth Mieles Mariño, con cédula de ciudadanía 2350239865, bajo la tutoría de Ing. Alexis Iván Andrade Valle MsC; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 15 días del mes de agosto de 2022.

**Presidente del Tribunal de Grado**  
**Mgs./ PhD. Nombres y Apellidos**

**Miembro del Tribunal de Grado**  
**Ing. Luis Enrique Villafuerte Bermúdez Msc**

**Miembro del Tribunal de Grado**  
**Ing. Andrea Natali Zárate Villacrés MsC**

# CERTIFICADO ANTIPLAGIO



Dirección  
Académica  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



UNACH-RGF-01-04-02.20  
VERSIÓN 02: 06-09-2021

## CERTIFICACIÓN

Que, **CASTILLO CEVALLOS JEFFERSON JAVIER** con CC: **2200156111** y **MIELES MARIÑO MAYTE LISBETH** con CC: **2350239865**, estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**Caracterización de un geopolímero a base de piedras pómez y humo de sílice como material precursor**", cumple con el 2%, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **URKUND**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 02 día de agosto de 2022



firmado electrónicamente por:  
**ALEXIS IVAN  
ANDRADE**

Ing. Alexis Iván Andrade Valle MsC  
**TUTOR(A) TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi madre Rosario Cevallos y a mi padre Javier Castillo por haberme brindado su apoyo incondicional, por todo su amor, comprensión y consejos, por sacrificar todo lo que está a su alcance por mi bienestar y por confiar en mí.*

*A mi abuelita María Cevallos y mis tías que siempre me escucharon, aconsejaron y desearon lo mejor y que a pesar de la distancia siempre sentí su apoyo y amor.*

*A mis hermanas Adriana y Arleth quienes son mi motor, fortaleza, orgullo y saben lo esencial que son en mi vida.*

*A mis compañeros y amigos que son quienes me han acompañado día a día en esta aventura y con quienes he vivido experiencias inolvidables que llevare conmigo para siempre.*

*Jefferson J. Castillo C.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Ante todo, agradezco a Dios todo poderoso por bríndame la salud, fortaleza y sabiduría que me han permitido alcanzar mis objetivos y por poner en mi vida a las personas adecuadas que me han hecho crecer como persona y profesional.*

*A mi madre Rosario Cevallos y mi padre Javier Castillo por su infinito amor, sus sabios consejos y apoyo moral, por ser los pilares de mi vida y haber dedicado la suya a que nunca me falte nada para permitirme cumplir este sueño.*

*A mis hermanas Adriana y Arleth, mi abuelita María y mis tías que ayudaron con su granito de arena y estuvieron animándome a no rendirme y que luche por alcanzar mis sueños.*

*A mi pareja Mishelle por ser mi confidente y por brindarme su apoyo y compañía siempre que lo necesite y por darme la motivación necesario para continuar cuando todo parecía perdido.*

*A mis amigos Mishell, Marilyn, Jennifer, Alex, Angel, Hugo y Elías por haberme brindado su apoyo incondicional, por los momentos de alegría y de tristeza, por los éxitos y los fracasos.*

*A mi compañera de tesis Mayte, gracias por haberme permitido trabajar contigo que Dios te bendiga, guie tu camino y te permita alcanzar todos los objetivos.*

*A mi tutor de tesis el Ing. Alexis Andrade, gracias por habernos proporcionado las herramientas necesarias que nos permitieron alcanzar este propósito, por el tiempo y paciencia dedicado al desarrollo de esta tesis y de igual manera a todos mis docentes quienes inculcaron en mí valores éticos y profesionales.*

*Jefferson J. Castillo C.*

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo a mi madre Cecilia Violeta Mariño y a mi padre Jorge Luis Mieles por haberme brindado su apoyo incondicional, por todo su amor, comprensión y consejos, por sacrificar todo lo que está a su alcance por mi bienestar y por confiar en mí.*

*A mi tía Lucía por haberme abierto las puertas de su hogar y brindarme su apoyo incondicional.*

*A mis hermanos Bryan y Andrés y a mi sobrina Briana quienes son mi motor, fortaleza y orgullo.*

*A mis compañeros y amigos que son quienes me han acompañado día a día en esta aventura y con quienes he vivido experiencias inolvidables que llevare conmigo para siempre.*

*Mayte L. Mieles M.*



## **AGRADECIMIENTO**

*Ante todo, agradezco a Dios todo poderoso por bríndame la salud, fortaleza y sabiduría que me han permitido alcanzar mis objetivos y por poner en mi vida a las personas adecuadas que me han hecho crecer como persona y profesional.*

*A mi madre Cecilia Violeta Mariño y a mi padre Jorge Luis Mieles por su infinito amor, sus sabios consejos y apoyo moral, por ser los pilares de mi vida y haber dedicado la suya a que nunca me falte nada para permitirme cumplir este sueño.*

*A mis hermanos Bryan y Andrés, mi sobrina Briana y mi tía Lucía que ayudaron con su granito de arena y estuvieron alegrando mis días, animándome a no rendirme y a luchar por mis sueños.*

*A mis amigos Alex, Daniela y Katherine por haberme brindado su apoyo incondicional, por los momentos de alegría y de tristeza, por los éxitos y los fracasos.*

*A mi compañero de tesis Jefferson, gracias por haberme permitido trabajar contigo que Dios te bendiga, guíe tu camino y te permita alcanzar todos los objetivos.*

*A mi tutor de tesis el Ing. Alexis Andrade, gracias por habernos proporcionado las herramientas necesarias que nos permitieron alcanzar este propósito, por el tiempo y paciencia dedicado al desarrollo de esta tesis y de igual manera a todos mis docentes quienes inculcaron en mí valores éticos y profesionales.*

*Mayte L. Mieles M.*

## ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. Planteamiento del problema .....	21
1.2. Objetivos .....	21
1.2.1. General .....	21
1.2.2. Específicos.....	21
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Impacto ambiental la producción del cemento .....	22
2.1.1 Estrategias para la reducción de CO <sub>2</sub> .....	22
2.2. Geopolímeros.....	23
2.2.1. Fuentes de aluminosilicatos.....	24
2.2.2. Activadores alcalinos .....	27
2.2.3. Condiciones de curado.....	28
2.2.4. Contenido de agua .....	28
2.3. Conceptualización de los ensayos aplicados al polvo de piedra pómez ....	29
2.3.1. Densidad seca al horno y absorción.....	29
2.3.2. Granulometría y módulo de finura.....	29
2.3.3. Difracción de rayos X (XRD).....	29
2.4. Conceptualización de los ensayos aplicados al geopolímero .....	30
2.4.1. Resistencia a la compresión.....	30
2.4.2. Resistencia a la flexión.....	30
2.4.3. Densidad del geopolímero y absorción.....	30
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	31
3.1. Enfoque de Investigación .....	31
3.2. Tipo de Investigación .....	31
3.3. Pregunta de investigación.....	31

3.4.	Hipótesis .....	31
3.5.	Variables .....	31
3.6.	Población y muestra .....	32
3.7.	Técnicas de recolección de datos .....	32
3.7.1.	Densidad seca al horno y absorción.....	32
3.7.2.	Granulometría y módulo de finura.....	33
3.7.3.	Difracción de rayos X (XRD).....	34
3.7.4.	Resistencia a la compresión.....	34
3.7.5.	Resistencia a la flexión.....	34
3.7.6.	Densidad del geopolímero y absorción.....	35
3.8.	Tratamiento de datos .....	36
3.9.	Diseño Experimental .....	36
3.9.1.	Materiales .....	39
3.9.2.	Factores adoptados para el diseño del geopolímero .....	42
3.9.3.	Molienda y tamizado de la PP .....	42
3.9.4.	Preparación de la solución de NaOH .....	43
3.9.5.	Proceso de mezclado .....	44
3.9.6.	Curado .....	45
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....		48
4.1.	Caracterización de las propiedades físicas y químicas del polvo de piedra pómez	48
4.1.1.	Densidad seca al horno y absorción.....	48
4.1.2.	Granulometría y módulo de finura.....	49
4.1.3.	Difracción por rayos X.....	50
4.2.	Dosificación del geopolímero .....	52
4.2.1.	Dosificación de las probetas testigo.....	52
4.2.2.	Dosificación de las probetas con HS.....	54

4.3. Caracterización de física y mecánica del geopolímero .....	55
4.3.1. Resistencia a la compresión.....	55
4.3.2. Resistencia a la flexión.....	62
4.3.3. Densidad del geopolímero .....	69
4.3.4. Porcentaje de absorción.....	72
4.4. Discusión de los resultados.....	76
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>78</b>
5.1. Conclusiones .....	78
5.2. Recomendaciones.....	79
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Composición química del HS .....	40
<b>Tabla 2.</b> Especificaciones técnicas del $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ .....	41
<b>Tabla 3.</b> Especificaciones técnicas del NaOH .....	41
<b>Tabla 4.</b> Definición de los factores de resistencia.....	42
<b>Tabla 5.</b> Análisis granulométrico.....	49
<b>Tabla 6.</b> Resultados de la composición cuantitativa y cualitativa del polvo de PP.....	51
<b>Tabla 7.</b> Dosificación de probetas testigo. ....	53
<b>Tabla 8.</b> Dosificación de las probetas con HS .....	54
<b>Tabla 9.</b> Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días .....	56
<b>Tabla 10.</b> Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días .....	59
<b>Tabla 11.</b> Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 7 días..	63
<b>Tabla 12.</b> Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 28 días	66
<b>Tabla 13.</b> Análisis estadístico de los resultados de la densidad geopolímero a los 28 días	70
<b>Tabla 14.</b> Análisis estadístico de los resultados del porcentaje de absorción a los 28 días	73

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema general del proceso de geopolimerización .....	24
<b>Figura 2.</b> Esquema metodológico experimental. ....	38
<b>Figura 3.</b> Ubicación del área minera “Profuturo” .....	39
<b>Figura 4.</b> PP recolectada.....	39
<b>Figura 5.</b> Molienda y tamizado de la PP .....	43
<b>Figura 6.</b> Polvo de PP.....	43
<b>Figura 7.</b> Silicato de Sodio .....	40
<b>Figura 8.</b> a) Disolución del NaOH en agua destilada y b) Soluciones de NaOH a 8 y 12 M .....	44
<b>Figura 9.</b> a) Incorporación de materiales, b) Mezcla homogénea de la pasta de geopolímero .....	45
<b>Figura 10.</b> a) Reposo de 24 h de las probetas, b) Desmolde y etiquetado .....	45
<b>Figura 11.</b> Curado en horno a 60°C por 120 h, b) Curado en temperatura ambiente .....	46
<b>Figura 12.</b> Esquematización del proceso de fabricación del geopolímero .....	47
<b>Figura 13.</b> Valores de masa obtenidos con el método gravimétrico: a) Picnómetro + agua + muestra, b) picnómetro + agua y c) Masa seca al horno + recipiente.....	48
<b>Figura 14.</b> Curva granulométrica del polvo de PP.....	50
<b>Figura 15.</b> Diagrama de difracción del polvo de PP.....	51
<b>Figura 16.</b> Resistencia a la compresión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 8M .....	57
<b>Figura 17.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 7 días con dosificaciones a 8M .....	57
<b>Figura 18.</b> Resistencia a la compresión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M. ....	58
<b>Figura 19.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 7 días con dosificaciones a 12M .....	58
<b>Figura 20.</b> Resistencia a la compresión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M. ....	60
<b>Figura 21.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 28 días con dosificaciones a 8M .....	60

<b>Figura 22.</b> Resistencia a la compresión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M .....	61
<b>Figura 23.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 28 días con dosificaciones a 12M .....	61
<b>Figura 24.</b> Curvas de Resistencias a la compresión a diferentes % de HS con 8M .....	62
<b>Figura 25.</b> Curvas de Resistencias a la compresión a diferentes % de HS con 12M.....	62
<b>Figura 26.</b> Resistencia a la Flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M. ....	64
<b>Figura 27.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 7 días con dosificaciones a 8M .....	64
<b>Figura 28.</b> Resistencia a la Flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M. ....	65
<b>Figura 29.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 7 días con dosificaciones a 12M .....	65
<b>Figura 30.</b> Resistencia a la Flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M. ....	67
<b>Figura 31.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 28 días con dosificaciones a 8M .....	67
<b>Figura 32.</b> Resistencia a la Flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M. ....	68
<b>Figura 33.</b> Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 28 días con dosificaciones a 12M .....	68
<b>Figura 34.</b> Curvas de Resistencias a la flexión a diferentes % de HS con 8M.....	69
<b>Figura 35.</b> Curvas de Resistencias a la flexión a diferentes % de HS con 12M.....	69
<b>Figura 36.</b> Densidad del geopolímero a la edad de 28 día con dosificaciones a 8M.....	71
<b>Figura 37.</b> Diagrama de caja y bigotes de densidad del geopolímero a los 28 días con dosificaciones a 8M .....	71
<b>Figura 38.</b> Densidad del geopolímero a la edad de 28 día con dosificaciones a 8M.....	72
<b>Figura 39.</b> Diagrama de caja y bigotes de densidad del geopolímero a los 28 días con dosificaciones a 12M .....	72
<b>Figura 40.</b> Porcentaje de absorción a la edad de 28 día del geopolímero con dosificaciones a 8M .....	74

<b>Figura 41.</b> Diagrama de caja y bigotes de porcentaje de absorción a los 28 días con dosificaciones a 8M .....	74
<b>Figura 42.</b> Porcentaje de absorción a la edad de 28 día del geopolímero con dosificaciones a 12M .....	75
<b>Figura 43.</b> Diagrama de caja y bigotes de porcentaje de absorción a los 28 días con dosificaciones a 12M .....	75



## RESUMEN

Los geopolímeros son materiales alternativos al cemento porque demandan de menos energía de producción aportando así a la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, se obtienen a partir de la activación alcalina de un material rico en sílice y alúmina. Este proyecto de investigación busca evaluar la posibilidad de usar residuos industriales como el humo de sílice (HS) para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un geopolímero a base de piedra pómez (PP). Se inició con la extracción, molienda y tamizado de la materia prima obtenida del yacimiento de Cotopaxi para realizar la caracterización física y química del material resultante, seguido de la dosificación de la mezcla del geopolímero. Finalmente, del geopolímero se caracterizaron las propiedades mecánicas a los 7 y 28 días mientras que las propiedades físicas se determinaron a la edad de 28 días, para ello se emplearon probetas cúbicas de 50 mm y vigas de 40x40x160 mm según las normas INEN. A partir de la aplicación de estos ensayos, se verificó que la piedra pómez es una fuente de aluminosilicatos y que combinado con HS produce un material ligero que alcanza una resistencia máxima a la compresión y flexión de 14.10 MPa y 4.78 MPa, respectivamente, para un 10% de HS reemplazado y una molaridad de 12M. Estos resultados reflejaron que la resistencia está directamente relacionada con el contenido de HS, siendo el 10% el porcentaje óptimo de reemplazo para mejorar las propiedades físicas y mecánicas, al igual que la formación de la matriz geopolimérico.

**Palabras claves:** geopolímero, polvo de piedra pómez, humo de sílice, activación alcalina, concentración molar, propiedades mecánicas, propiedades físicas

## ABSTRACT

Geopolymers are sustainable alternative materials to portland cement concrete, because they require less production energy, due contributing to the reduction of CO<sub>2</sub> emissions produced , and are obtained from the alkaline activation of a material rich in silica and alumina. This research work seeks to evaluate the possibility of using industrial wastes such as silica fume (SF) to improve the physical and mechanical properties of a pumice-based geopolymer (PP). The first step was the extraction, grinding and sieving of the raw material obtained from the Cotopaxi deposit to perform the physical and chemical characterization of the resulting material, followed by the dosing of the geopolymer mixture. Finally, the mechanical properties of the geopolymer were determined at 7 to 28 days, while the physical properties at the age of 28 days, using 50 mm cubic specimens and 40x40x160 mm beams according to INEN standards. From the application of these conducting tests, it was verified that pumice is a source of aluminosilicates and that combined with HS it produces a lightweight material that reaches a maximum compressive and flexural strength of 14.10 MPa and 4.78 MPa, respectively, for 10% of replaced HS and a molarity of 12M. These results show that strength is directly related to HS content, with 10% being the optimum replacement percentage to improve physical and mechanical properties, as well as geopolymer matrix formation.

**Keywords:** Geopolymer, pumice powder, silica fume, alkali activation, molar concentration, mechanical properties, physical characterization.

DORIS  
ELIZABETH  
VALLE VINUEZA



Firmado digitalmente por  
DORIS ELIZABETH VALLE  
VINUEZA  
Fecha: 2022.08.17  
12:40:07 -05'00'

**Reviewed by:** Mgs. Doris Valle V.

**ENGLISH PROFESSOR**

c.c 0602019697

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material de construcción más usado en aplicaciones de ingeniería civil debido a sus propiedades físico-mecánicas, durabilidad y costo. Dichas ventajas frente a otros materiales implican el aumento del consumo de cemento cuya industria es la responsable del 8% de las emisiones del CO<sub>2</sub> a nivel mundial de acuerdo con Ulusu et al. (2016), esto debido a la significativa cantidad de energía necesaria para la producción del clinker que es su principal componente. La Agencia de Investigación Ambiental (IEA, 2021) manifiesta que se debe adoptar estrategias para optimizar el uso del cemento, como: mejorar la eficiencia energética, cambiar combustibles a unos con menos carbono, promover las innovaciones tecnológicas y promover la eficiencia de los materiales, este último para reducir la relación de producción clinker-cemento y la demanda total. La IEA también enfatiza que la incorporación de materiales aglutinantes alternativos podrían ser clave para reducir las emisiones de la producción de cemento.

Por ello, una de las nuevas alternativas que permiten disminuir el uso de cemento son los geopolímeros, los cuales se obtienen mediante la activación alcalina de materiales ricos en alúmina y sílice, tales como las puzolanas naturales, cenizas volantes y otros residuos industriales. (Vásquez, 2021)

Respecto al uso de puzolanas naturales como la PP en la elaboración de geopolímeros, Occhipinti et al. (2020) concluye que la PP en geopolímeros activados alcalinamente proporcionan una satisfactoria resistencia a la compresión a los 28 días de 12 MPa. Por su parte, Haddad & Lababneh (2020) determinaron que existe la posibilidad de usar de geopolímeros con aplicaciones estructurales y no estructurales que pueden alcanzar una resistencia a la compresión a los 28 días de hasta 24 MPa.

En cuanto al aprovechamiento de los residuos industriales las investigaciones se han enfocado en el uso de las cenizas volantes, sin embargo existen otros residuos industriales con gran potencial para ser utilizados como materiales precursores, como es el caso del HS. Del HS se ha demostrado que su incorporación en geopolímeros al 2% en peso significa un incremento de resistencia a la compresión mientras que al 4% lo disminuiría según Das et al. (2020), Huey Li et al. (2021) y (Min et al., 2022), sin embargo, Kockal et al. (2018) hace

referencia a incorporaciones de HS de hasta un 5% para obtener resultados satisfactorios de resistencia. Por otro lado, Khater (2013) concluye que hasta con un 7% de adiciones de HS en peso se obtiene un incremento de las propiedades mecánicas del geopolímero, aunque un aumento del 10% reduce la resistencia.

Por lo antes expuesto, se busca caracterizar las propiedades físicas y químicas de la PP para producir un geopolímero con HS activado alcalinamente con una solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio a distintas concentraciones. Para cumplir con tal propósito, el presente proyecto de investigación se ha estructurado en cinco capítulos como se describe a continuación:

En el capítulo I se realiza una introducción al tema de estudio con una breve descripción de la estructura del documento, adicionalmente se presenta el planteamiento del problema y los objetivos. En el capítulo II se plasma una descripción del estado actual de conocimiento, una revisión bibliográfica según las investigaciones más recientes acordes al tema de investigación y la conceptualización de los ensayos a realizarse. En el capítulo III se describe la metodología y diseño experimental empleado para la elaboración y caracterización del geopolímero. En el capítulo IV se reportan y discuten los resultados obtenidos de los ensayos aplicados en geopolímeros testigos y geopolímeros a base de PP con varios porcentajes de reemplazo de HS. Finalmente, en el capítulo V se concluye en función de los resultados obtenidos y se recomiendan condiciones a tener en cuenta para mejorar la resistencia del geopolímero, además de nuevas líneas de investigación derivadas del presente proyecto, se incluye también un apartado de anexos.

## **1.1.Planteamiento del problema**

La industria del cemento es la responsable de grandes emisiones de CO<sub>2</sub> por ello el sector de la construcción se encuentra desarrollando materiales alternativos y sostenibles, por lo que se busca geopolímeros a base de PP que cumplan con los criterios de calidad necesarios para ser empleado como material conglomerante.

Por lo antes mencionado se plantea evaluar si es posible usar residuos industriales como el HS para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de un geopolímero a base de PP, pues se sabe que este material presenta un gran potencial como alternativa a la reducción del uso de cemento lo que implica menores emisiones de CO<sub>2</sub> mitigando así los efectos del cambio climático.

Por consiguiente, en la investigación se pretende realizar una caracterización física y química del PP para acto seguido encontrar las dosificaciones idóneas que servirán en la elaboración del geopolímero con HS y por último realizar la caracterización física y mecánica de este material para conocer la factibilidad de uso en la industria de la construcción.

## **1.2.Objetivos**

### **1.2.1. General**

Desarrollar geopolímeros a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor

### **1.2.2. Específicos**

- Caracterizar las propiedades físicas de la piedra pómez obtenido de canteras de los alrededores del Cotopaxi para el desarrollo del geopolímero.
- Encontrar la dosificación óptima de piedra pómez y humo de sílice que garantice la activación del geopolímero.
- Caracterizar las propiedades físico-mecánicas del geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2. Impacto ambiental la producción del cemento**

El cambio climático está firmemente ligado a los gases de efecto invernadero producto de las emisiones de CO<sub>2</sub>, entre las principales fuentes de emisión se encuentran: los combustibles fósiles, el cambio del uso de suelo y producción del cemento. (Liu et al., 2020).

El hormigón es un material que ha dado paso al desarrollo de la construcción a lo largo de historia, debido a su durabilidad y resistencia que en comparación con su bajo costo lo ha constituido como un material indispensable en la actualidad (Romea, 2014). El hormigón está formado en un 10 a 15% por cemento que es el material responsable de generar el endurecimiento, desde un punto de vista ambiental la producción del cemento es el responsable de contribuir hasta con el 8% de las emisiones CO<sub>2</sub> a nivel global, teniendo un incremento en su producción de un 1.8% en el periodo de 2015 a 2020 (Andrew, 2018), (Costa & Ribeiro, 2020), (IEA, 2021) y (OMM, 2021). En la producción del cemento la fase de la clinkerización es la que está asociada a la emisión de CO<sub>2</sub>, pues en ella se producen reacciones químicas como la descomposición del carbonato de calcio (de la piedra caliza) en el horno, el mismo que calienta las materias primas a temperaturas mayores 1000°C a partir de la quema de combustibles fósiles. (Costa & Ribeiro, 2020).

En respuesta a esto, organismos internacionales como la IEA y la OMM se han planteado un escenario de cero emisiones netas para el 2050 a través de múltiples estrategias que contribuyan a la reducción de CO<sub>2</sub>.

#### **2.1.1 Estrategias para la reducción de CO<sub>2</sub>**

La producción de cemento implica consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>, situación que conlleva a adoptar estrategias para la descarbonización del sector a través de la innovación continua para producir nuevos tipos de cementos y materiales alternativos como los geopolímeros que podrían eliminar la necesidad del Clinker. (Rodgers, 2018)

Por lo tanto, las acciones recomendadas por la IEA (2021) para reducir la demanda del cemento incluyen:

- a) La aceleración de la eficiencia energética y de los materiales aprovechando los desechos o subproductos de un proceso para producir otro producto de valor.
- b) Aumentar la adopción de combustibles alternativos redirigiendo los desechos de los vertederos a la industria del cemento.
- c) La innovación y el despliegue de tecnología bajas en carbono, como el uso de materiales aglutinantes alternativos y el despliegue de procesos innovadores.
- d) Adoptar políticas obligatorias de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.
- e) Mejorar la recopilación, transparencia y la accesibilidad de las estadísticas de rendimiento energético y emisiones de CO<sub>2</sub>.

### **2.1. Geopolímeros**

Los geopolímeros son una alternativa eco amigable para minimizar la huella de carbono causada por la industria cementera y resulta de la reacción química entre aluminosilicatos (materiales ricos en silicio y aluminio) y activadores alcalinos los cuales desencadenan una serie de reacciones que conducen a la formación de un producto cementante.

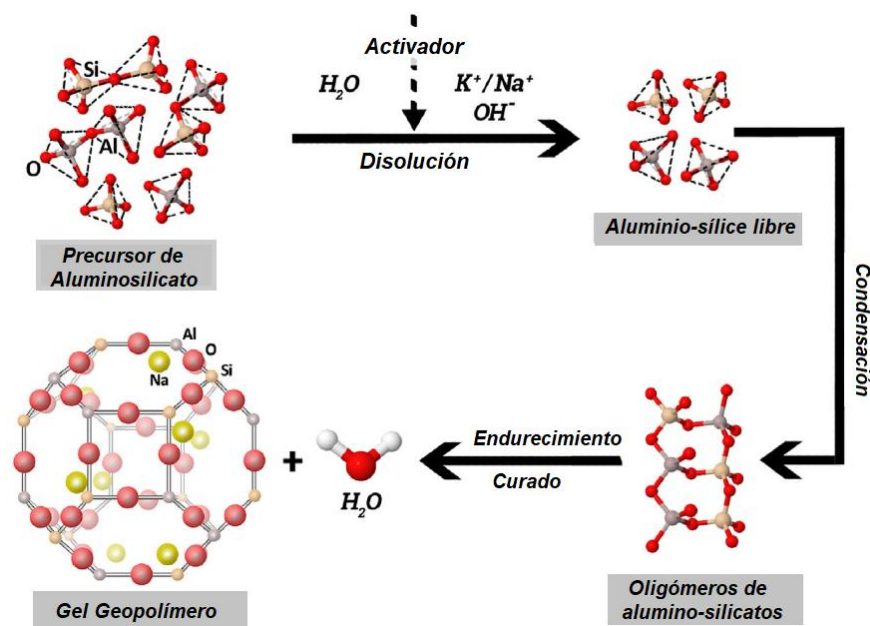
Su utilización data desde la antigüedad en las culturas como la egipcia, griega y romana con la aplicación de aglutinantes bajos en calcio (Ca) y ricos en álcalis, silicio (Si) y aluminio (Al). Para inicios del siglo XX surgen los primeros experimentos científicos para formar un material sólido producto de una fuerte solución alcalina con un precursor de aluminio y sílice patentado por el químico e ingeniero alemán H. Kühl en 1908, en los siguientes años la investigación en tecnologías de activación alcalina se posicionó en la antigua Unión Soviética y China con el desarrollo de materiales alternativos. En la década de 1950 Viklor Glukhovsky propuso un mecanismo general para la activación alcalina de materiales compuestos principalmente de sílice y alúmina reactiva. En 1978, el científico e ingeniero francés Joseph Davidovits patentó varias formulaciones para la creación de sustancias poliméricas inorgánicas a base de metacaolín y acuñó el término “geopolímero”. (Calderón, 2019).

Mendes et al. (2022) describe a la activación alcalina como la mezcla de una fase sólida con proporciones adecuadas de aluminosilicato y una fase líquida rica en iones alcalinos esta última consiste generalmente en una solución de hidróxido de sodio y de

silicato sodio; sin embargo, también se ha empleado hidróxido de potasio, hidróxido de calcio y carbonato sódico (Vásquez, 2021).

La figura 1 describe de forma general el proceso de geopolimerización, en donde se aprecia que cuando el material precursor se encuentra en el medio alcalino inicia el proceso de disolución de silicatos y aluminatos para promover la reacción de polimerización. Liew et al. (2016) en su investigación acota que la geopolimerización es una reacción exotérmica que se produce en varios pasos simultáneamente y estos son:

- Disolución de aluminosilicatos en un medio alcalino.
- Reorganización y difusión de iones disueltos con la formación de pequeñas estructuras coaguladas.
- Policondensación para formar fases del gel de aluminosilicatos.
- Transformación en estado sólido y endurecimiento.



**Figura 1.** Esquema general del proceso de geopolimerización  
**Fuente:** (Mabroum et al., 2020)

## 2.2. Fuentes de aluminosilicatos

La problemática medioambiental que circula en torno a la huella de carbono a raíz de la producción cementera da paso a lo que se conoce como la simbiosis industrial es decir, el



aprovechamiento de los residuos industriales infrautilizados de otros sectores económicos, mediante este tipo de sinergia se logra reducir la explotación de materias primas naturales, el usos de combustibles y la huella de carbono (CEMA & Institut Cerdà, 2021) teniendo como resultado el diseño de nuevos materiales como por ejemplo los geopolímeros (Garcia et al., 2020).

Las fuentes de aluminosilicatos son materiales ricos en  $\text{SiO}_2$  (Sílice u óxido de silicio) y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Alúmina u óxido de aluminio) son conocidos como materiales “base” o “precursores” lo cuales pueden ser sintéticos como el metacaolín u obtenerse de desperdicios industriales. En investigaciones como la de Pintos et al. (2020) se recalca que el uso del metacaolín de alta pureza en combinación de un filler de calizo produce geopolímeros de altas resistencias. Mendes et al.(2022) refieren que los subproductos industriales más estudiados en la última década son las cenizas volantes y la escoria de altos hornos también mencionan la posibilidad de usar el lodo rojo y HS como precursores en geopolímeros. Adicionalmente, en la investigación realizada por Mehta & Siddique (2016), sobre geopolímeros derivados a partir de residuos industriales concluyeron que la finura de los precursores es directamente proporcional a la resistencia. Cabe recalcar que tanto el tipo como la calidad del precursor al igual que la del activador definen el rendimiento del sistema aglutinante.

#### **2.2.1.1. Humo de sílice**

Como expresa Payá et al. (2022) el HS, también conocido como microsíllice, es un residuo que proviene de la reducción del cuarzo de gran pureza para producir aleaciones de silicio y de ferrosilicio. De acuerdo con Das et al. (2020), Huey Li et al. (2021) y Min et al. (2022) la adición del 2% en peso de HS en geopolímeros aumenta la resistencia a la compresión, sin embargo, el 4% de HS la reduce. Por otro lado, Kockal et al. (2018) hace referencia a incorporaciones de HS de hasta un 5% para obtener resultados satisfactorios de resistencia.

Khater (2013) refiere que el HS por su finura y composición es un material eficaz para mejorar la resistencia a la compresión al igual que el proceso de geo polimerización con adiciones de hasta el 7% de HS, sin embargo, el aumento de la cantidad de HS en un 10% conduce a la disminución de las propiedades mecánicas del geopolímero.

De la misma forma Torres et al. (2021) precisa que el HS genera un efecto de relleno en los espacios vacíos de la mezcla aumentando así la densidad y por consiguiente su resistencia a la compresión. Giménez et al. (2018) señala que el uso de HS genera una disminución de la trabajabilidad debido a la absorción del agua por parte de sílice.

#### **2.2.1.2. Piedra pómez**

Es un material de origen volcánico y estructura porosa generado a partir de la solidificación y liberación de gases de lava durante el enfriamiento. Está formada por burbujas y vacíos de aire que son alargados, paralelos entre sí o interconectados, lo que le proporciona una densidad muy baja (500 – 1000 kg/m<sup>3</sup>). El uso más convencional de este material es el de agregado grueso para obtener hormigones livianos es decir dos o tres veces más livianos que un hormigón tradicional. (Ulusu et al., 2016).

Sin embargo, la PP tiene otros usos que se consiguen al pasar este material por un proceso de molienda mecánica y tamizado, obteniendo polvo de PP el cual presenta propiedades puzolánicas y de acuerdo con literatura de análisis químico este es rico en sílice, pero su contenido de aluminato es bajo, no obstante, esto abre la posibilidad de que este material sea usado para la elaboración de geopolímeros a través de un proceso de activación alcalina. (Mobasheri et al., 2022).

Dicho geopolímero se obtiene agregando un activador alcalino en cantidades adecuadas al polvo de PP. Según Haddad & Lababneh (2020) la relación entre activador y polvo de PP de 0.3 a 0.4 permite obtener geopolímeros con resistencia a la compresión de hasta 24 MPa, mientras que Safari et al. (2020) menciona que dicha relación debe ser de 0.35 para producir un geopolímero rentable y económicamente viable con una resistencia a la compresión de hasta 76.73 MPa.

En Ecuador, existen yacimientos de PP en las provincias de Pichincha, Tungurahua y Cotopaxi, siendo esta última la provincia con el yacimiento más grande con un total de 14 canteras de acuerdo con la Agencia de Regulación y Control Minero (2019). Además, en el estudio realizado por Andrade et al., (2022) en el que se evaluó la factibilidad de elaborar geopolímeros a base de PP de distintos yacimientos del país, se concluyó que el

geopolímero elaborado con material de la cantera “Profuturo” ubicada en la provincia de Cotopaxi proporciona la mejor resistencia a la compresión.

### 2.2.2. Activadores alcalinos

La activación alcalina o síntesis de un geopolímero es un término que hace referencia a la producción de un aglutinante endurecido producto de la reacción de un material precursor (aluminosilicato sólido) en un medio alcalino (Provis, 2018). Dicho medio se obtiene con el uso de activadores los mismos que tienen un papel importante en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, pues los procesos químicos tradicionales necesarios para la síntesis de estos reactivos conllevan altos consumos de energía es por ello que los esfuerzos en el ámbito de los geopolímeros se centran también en la búsqueda activadores alternativos provenientes de la revalorización de residuos agrícolas o industriales, de esta manera Payá et al. (2022) menciona que los activadores se pueden clasificar en:

- a) Activadores tradicionales como hidróxidos, silicatos y carbonatos.
- b) Activadores alternativos basado en sílice o álcali.
- c) Activadores alternativos resultado de la combinación de sílice-álcali.

Los activadores tradicionales en la elaboración de geopolímeros a base PP son el silicato de sodio ( $Na_2SiO_3$ ) y el hidróxido de sodio ( $NaOH$ ) los cuales cumple con la función de acelerar la solubilización de aluminosilicatos (Mobasheri et al., 2022). Las características mecánicas de un geopolímero se ven afectadas por varios factores entre ellos están la relación entre los activadores alcalinos y la molaridad del hidróxido de sodio usado en la solución (Haddad & Lababneh., 2020).

Haddad & Lababneh (2020) menciona que el valor de la relación de activadores alcalinos ( $Na_2SiO_3/NaOH$ ) en un rango de 2.5 a 3 permiten encontrar un equilibrio óptimo entre la disolución de los precursores y la formación de la red del gel, concordando con Asayesh et al. (2021) que recomienda una relación de 2.5.

En cuanto a la molaridad del hidróxido de sodio Safari et al. (2020) establece en su estudio que la molaridad óptima del hidróxido de sodio es de 12M, esto después de experimentar con molaridades de 8, 10, 12, 14, 16 y 18M con una relación entre los

activadores de 2.5. Adicionalmente Mobasheri et al. (2022) establece que geopolímeros elaborados con hidróxido de sodio de molaridad entre 8 y 12M presentan resistencias a la compresión entre los 60 y 65.1 MPa, además menciona que las concentraciones excesivas de hidróxido de sodio producen reducción de la resistencia a la compresión.

### **2.2.3. Condiciones de curado**

Los geopolímeros son materiales sometidos a un proceso cuidadoso de curado, algo difícil de asegurar in situ, este parámetro es uno de los factores que intervienen directamente en la resistencia. Liew et al. (2016) en su investigación donde precisa que la resistencia aumenta con el incremento de la temperatura de curado, sin embargo eso podría ser contraproducente a largo plazo lo cual concuerda con lo expuesto por Livi & Repette (2017), quienes indican que para un mayor tiempo de curado a temperaturas más altas se podría obtener efectos perjudiciales para la estructura del geopolímero induciendo una pérdida de agua que provocaría agrietamiento.

Safari et al. (2020) acota que existe una fuerte relación entre la temperatura de curado y el periodo de curando y sus resultados demuestran que a 60°C la ganancia de resistencia a es proporcional con el aumento del tiempo de curado concluyendo que para lograr una alta resistencia a la compresión y flexión en geopolímeros a base de PP, el periodo óptimo es de 120h a 60°C.

### **2.2.4. Contenido de agua**

El uso de agua en la elaboración de geopolímeros a base de PP se divide en dos grupos, que son: los que usan agua y los que usan superplastificantes, el objetivo del uso de agua o superplastificantes es conseguir trabajabilidad en mezcla del geopolímero. La principal diferencia de ambos grupos radica en la resistencia, siendo así que los geopolímeros en los que se emplea agua tienen menores resistencias en comparación a los que usan superplastificantes, pues el contenido de agua es inversamente proporcional a la resistencia a la compresión debido que la presencia de agua aumenta la concentración de iones OH<sup>-</sup> y por ende la porosidad producto de la evaporación del agua libre. (Corrales, 2015)

El contenido de agua en geopolímeros habitualmente se agrega en función del peso del material aglutinante, para ello se establece una relación agua/aglutinante que de acuerdo con Haddad & Lababneh (2020) esta relación puede estar entre 0.40 a 0.45, mientras que Khater (2013) establece que este valor es de 0.30, adicionalmente Segura-Sierpe et al. (2016) recomienda usar el valor de 0.45.

## **2.3. Conceptualización de los ensayos aplicados al polvo de piedra pómez**

### **2.3.1. Densidad seca al horno y absorción.**

Densidad es la masa por unidad de volumen de un material seco al horno expresada en kilogramos por metro cúbico, mientras que la absorción es el incremento de masa del árido producto de la penetración de agua en los poros, se expresa en porcentaje (%). El método de ensayo para ambas características está establecido en la NTE INEN 856 (2010).

### **2.3.2. Granulometría y módulo de finura**

La granulometría es la medición del tamaño del grano y el cálculo de la cantidad correspondiente a cada tamaño, por otra parte el módulo de finura es el índice de finura del agregado mientras menor sea este valor más fino es el material, el método de ensayo de ambos parámetros está establecido la NTE INEN 696 (2011).

### **2.3.3. Difracción de rayos X (XRD)**

El análisis de difracción de rayos X es un método no destructivo que permite conocer la composición cualitativa y cuantitativa de un material cristalino o polvo, el análisis cualitativo se realiza debido a que cada componente genera un diagrama característico e independiente de los otros, mientras que el análisis cuantitativo se obtiene a partir de que cada componente genera una intensidad de líneas de difracción la misma que es proporcional a la cantidad del componente presente en la muestra analizada. A través de este análisis se puede constatar la presencia o no de aluminosilicatos en un material.

## **2.4. Conceptualización de los ensayos aplicados al geopolímero**

### **2.4.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión es la capacidad de soportar una carga por unidad de área indicada en megapascales (MPa), el método de ensayo está establecido en la NTE INEN 488 (2009).

### **2.4.2. Resistencia a la flexión**

La resistencia a la flexión es la capacidad de soportar una fuerza aplicada perpendicularmente al eje longitudinal del miembro estructural indicada en megapascales (MPa), el método de ensayo está establecido la NTE INEN 198 (1987).

### **2.4.3. Densidad del geopolímero y absorción.**

La densidad del geopolímero es la masa por unidad de volumen del material endurecido indicada en kilogramos por metro cúbico, mientras que la absorción es el incremento de masa del material endurecido debido de la penetración de agua en los poros, se expresa en porcentaje (%), el método de ensayo para ambas características está establecido en la UNE - EN 1015-10 (2007).

## **CAPÍTULO III. METODOLOGIA**

En el presente capítulo se describe el enfoque y tipo de investigación bajo el cual se desarrolló el proyecto, se plantea y definen la hipótesis, variables, población y muestra de estudio, el diseño experimental, las técnicas de recolección de datos, así mismo se presenta una descripción de la materia prima, materiales y procesos experimentales.

### **3.1. Enfoque de Investigación**

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo el cual consiste en la recolección y análisis de valores numéricos obtenidos de forma experimental a partir de la manipulación de variables independientes en condiciones controladas.

### **3.2. Tipo de Investigación**

La investigación es del tipo experimental porque se trató de un estudio de naturaleza científica que consistió en la elaboración de probetas de geopolímeros de PP con diferentes adiciones controladas de HS que posteriormente fueron sometidas a diversos ensayos de laboratorio, de esta manera se obtuvo una serie de datos que permitieron la caracterización física y mecánica de dicho material.

### **3.3. Pregunta de investigación**

¿La incorporación de residuos industriales en la dosificación de un geopolímero a base de piedra pómez mejora sus propiedades físicas y mecánicas?

### **3.4. Hipótesis**

La inclusión del humo de sílice como material precursor mejora las propiedades físicas y mecánicas de un geopolímero a base de piedra pómez.

### **3.5. Variables**

#### **3.5.1. Variable independiente**

La variable independiente corresponde al porcentaje de humo de sílice reemplazado en la dosificación de la mezcla de geopolímero a base de piedra pómez.

### **3.5.2. Variables dependientes**

Las variables dependientes corresponden a las propiedades a caracterizadas del geopolímero como lo son: resistencia mecánica a la compresión, resistencia mecánica a la flexión, densidad y absorción.

### **3.6. Población y muestra**

Debido a la naturaleza experimental de la investigación se tuvo una población finita en donde el número de muestras a emplear está sujeta a los parámetros establecidos por las normas para realizar los ensayos que permitan la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de las probetas prismáticas de geopolímeros.

### **3.7. Técnicas de recolección de datos**

Para conocer las propiedades físicas y químicas del polvo de PP se realizaron los ensayos de densidad y absorción, granulometría y módulo de finura, difracción de rayos X bajo los lineamientos de la INEN e ISO según corresponda. Mientras que para la elaboración y determinación de las propiedades físicas y mecánicas del geopolímero se debe tomar en cuenta que no existe una normativa específica para la fabricación de este por ello se adoptó el proceso definido en las normas INEN y UNE relacionadas a morteros para la determinar densidad y absorción, resistencia a la compresión y flexión.

#### **3.7.1. Densidad seca al horno y absorción.**

El método de ensayo está establecido en la NTE INEN 856 (2010) para el desarrollo del ensayo fueron necesarios los siguientes materiales: balanza de capacidad de 1 kg con sensibilidad de 0.1 g, picnómetro de 500 cm<sup>3</sup> con un volumen de contenido legible dentro de  $\pm 0.1$  cm<sup>3</sup> y un horno capaz de mantener temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

La preparación de la muestra empezó con el secado en horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener una masa constante posteriormente se cubrió de agua y dejó reposar por  $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$ , se decantó el exceso de agua y extendió la muestra sobre una superficie plana no absorbente que consto de una corriente de aire a la vez que se movió frecuentemente el material para un secado homogéneo. Una vez lista la muestra, se agregó al picnómetro 500 g  $\pm 10$  g de árido, se llenó con agua el picnómetro hasta un 90% de su capacidad y agitó con el objetivo de eliminar las burbujas de aire, posteriormente se ajustó la temperatura del



picnómetro a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , se llenó de agua hasta la marca de calibración y se tomó el peso junto con el árido. Se retiró y seco el árido del picnómetro a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener una masa constante, se enfrió durante  $1 \text{ h} \pm \frac{1}{2} \text{ h}$ , se pesó el árido seco y el picnómetro lleno hasta la marca de calibración.

La densidad se calculó con la siguiente expresión.

$$\text{Densidad SH (kg/m}^3\text{)} = \frac{997.5 A}{(B+S-C)} \quad (1)$$

Donde:

$A$  = masa de la muestra seca al horno (g).

$B$  = masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración (g).

$C$  = masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca (g).

$S$  = masa de muestra saturada superficialmente seca (g).

El porcentaje de absorción se calculó como sigue a continuación:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(S-A)}{A} * 100 \quad (2)$$

Donde:

$A$  = masa de la muestra seca al horno (g).

$S$  = masa de muestra saturada superficialmente seca (g).

### 3.7.2. Granulometría y módulo de finura.

Es el método de ensayo está establecido en la NTE INEN 696 (2011) para el desarrollo del ensayo fueron necesarios los siguientes materiales: balanza de capacidad de 1 kg con sensibilidad de 0.1 g, tamices (No. 200, No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No.4, 1½", ¾", ⅜" y mayores incrementando en la relación 2 a 1, un horno capaz de mantener temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  y agitador de tamices mecánicos.

El procedimiento empezó con el secado del árido en un horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener una masa constante, se seleccionó los tamices necesarios y se ordenaron en forma decreciente según el tamaño de su abertura, se colocó el material sobre el tamiz (mínimo 300 gramos), se realizó el tamizado mecánico y determino la masa de cada incremento de tamaño en una balanza con sensibilidad de 0.1 g. Con estos datos se pueden calcular el porcentaje retenido y el porcentaje que pasa, con este último y la abertura de los tamices en milímetros se realizó la curva granulométrica (semilogarítmica), además el cálculo del módulo de finura se realizó mediante la sumatoria de los porcentajes totales de

material que es más grueso que cada uno de los tamices mencionados en los materiales y dividiendo la para 100, como lo muestra la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ret. acu.}(1\frac{1}{2}''+3/4''+3/8''+N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100} \quad (3)$$

### 3.7.3. Difracción de rayos X (XRD)

El procedimiento, modelo de difractómetro de rayos X, radiación, monocromador, intensidad y voltaje usados fueron establecidos por el Laboratorio de Evaluación de Materiales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral el cual cuenta con Sistema de Gestión de Calidad de acuerdo con la ISO 9001:2015

### 3.7.4. Resistencia a la compresión

La NTE INEN 488 (2009) proporciona el método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm de arista, estos cubos fueron compactados por apisonado en dos capas. Se dejaron reposar, fueron desamoldados y curados hasta las diferentes edades de ensayo, Se requirió un mínimo de 3 probetas por cada edad de ensayo y dosificación. Se uso de la máquina universal para ensayar las muestras colocándolas de manera que la carga se aplicó en dos caras del cubos a una velocidad de carga con incremento en el rango de 900 a 1800 N/s por último, se registró la carga total máxima de rotura con la que se determinó la resistencia a la compresión con la siguiente expresión:

$$f_m = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Donde:

$f_m$  = Resistencia a la compresión en MPa

$P$  = Carga total máxima de la falla, en N

$A$  = Área de la sección transversal del cubo a la que se aplica la carga, en mm<sup>2</sup>

### 3.7.5. Resistencia a la flexión

El método de ensayo esta descrito por la NTE INEN 198 (1987), se basó en la aplicación de una carga progresiva sobre la cara lateral de un prisma de 40x40x160 mm que se aumentó a una velocidad de 50 ±10 N/s, este prisma estaba apoyado sobre cilindros con su eje

longitudinal perpendicular a estos apoyos. La carga se aplicó en el centro de la probeta, dejando un claro o luz de 100 mm, para el desarrollo de este ensayo se requirió un mínimo de 3 probetas por cada edad de ensayo y dosificación.

Se registró la carga de rotura  $P_f$  para determinar la resistencia a flexión mediante la siguiente ecuación:

$$R_f = 1.5 \frac{P_f * l}{b^3} \quad (5)$$

Donde:

$R_f$  = Resistencia a la flexión en MPa

$b$  = arista de la sección cuadrada del prisma, en mm.

$l$  = distancia entre los apoyos, en mm

### 3.7.6. Densidad del geopolímero y absorción.

El método de ensayo está establecido en la UNE - EN 1015-10 (2007), para el desarrollo del ensayo fueron necesarios los siguientes materiales: balanza de sensibilidad de 0.1 g, un recipiente (canasta) idóneo para la inmersión de la probeta y un horno capaz de mantener temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

El ensayo empezó con la obtención de la masa seca en el horno, para ello se inició con el secado de las probetas durante un tiempo de al menos 24 horas a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , se enfriaron las probetas a temperatura ambiente y determinó su masa. Se estableció la masa satura después de inmersión para ello se sumergió las probetas en agua durante al menos durante 48 horas y usando una toalla se removió la humedad superficial para así obtener la masa saturada superficialmente seca. Por último, se colocó la probeta en la canasta de inmersión y se establece la masa sumergida aparente.

La densidad aparente se calculó con la siguiente expresión:

$$\text{Densidad aparente (kg/m}^3\text{)} = \left[ \frac{A}{(A-D)} \right] \rho \quad (6)$$

Donde:

$A$  = masa de la probeta seca al horno (g).

$D$  = masa de la probeta sumergida aparente (g).

$\rho = \text{densidad del agua (1000 kg/m}^3\text{)}$

El porcentaje de absorción se calculó como sigue a continuación:

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{(B-A)}{A} * 100 \quad (7)$$

Donde:

$A = \text{masa de la probeta seca al horno (g)}$ .

$B = \text{masa de la probeta en condición saturada superficialmente seca (g)}$ .

### **3.8. Tratamiento de datos**

El tratamiento de datos se realizó mediante un análisis estadístico descriptivo en el software SPSS en cual se analizó los resultados de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad y porcentaje de absorción del geopolímero para cada dosificación y edad de ensayo, de dicho análisis se extrajo la media, mediana, varianza, entre otros parámetros estadísticos, además se realizó prueba de normalidad de Shapiro – Wilk que se aplica a muestras de tamaño menor a 50 y permite determinar si un conjunto de datos siguen o no una distribución normal y se realizó los diagramas de cajas y bigotes para evidenciar la presencia o no de datos atípicos.

### **3.9. Diseño Experimental**

La fase experimental de esta investigación se llevó a cabo en varias etapas empezando por la caracterización de la materia prima, seguido de la determinación de la dosificación óptima de mezcla para el geopolímero y por último la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de dicho material. Estos procedimientos se realizaron en las instalaciones de la Universidad Nacional de Chimborazo en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Civil en conjunto con los laboratorios de la Corporación de Estudios Especializados y la Escuela Superior Politécnica del Litoral, en la secuencia descrita a continuación:

En primera instancia, se llevó a cabo la extracción, molienda y tamizado de la PP la cuál fue obtenida del yacimiento de Cotopaxi específicamente de la cantera “Profuturo” debido a los favorables resultados de resistencia obtenidos en la investigación de Andrade et al. (2022), para seguidamente caracterizar el polvo de PP a través de los ensayos de granulometría, módulo de finura, densidad, absorción y una prueba de difracción de rayos X para determinar el contenido de aluminosilicatos. Una vez lista la materia prima se continuó con el diseño de la mezcla del geopolímero, para ello fue necesario recurrir a investigaciones

afines para definir los valores óptimos de los factores que influyen en la resistencia de dicho material como: la relación entre la solución alcalina y aglutinante, la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio, la relación entre el silicato de sodio y la solución de hidróxido de sodio, el tiempo y la temperatura de curado, el contenido de agua y por último, el porcentaje de reemplazo de HS a la mezcla.

Teniéndose definidos todos parámetros de dosificación se dio paso a la elaboración de las probetas prismáticas de 40x40x160 mm y 50x50x50 mm de acuerdo con las normativas de morteros como la NTE INEN 198 (1987), NTE INEN 488 (2009) y UNE - EN 1015-10 (2007) para determinar la resistencia a la flexión, compresión, densidad y absorción, respectivamente, se adoptaron dichas normativas por el hecho de que los geopolímeros son materiales que aún se encuentran en estudio y por ende no están normados. Al cabo de 7 y 28 días de edad se realizaron los ensayos de caracterización mecánica de las probetas testigos que sirvieron como punto comparación versus las probetas con porcentajes de reemplazo de HS, la caracterización física se realiza a la edad de 28 días. A continuación, en la Figura 2 se muestra en un diagrama de flujo del diseño experimental:

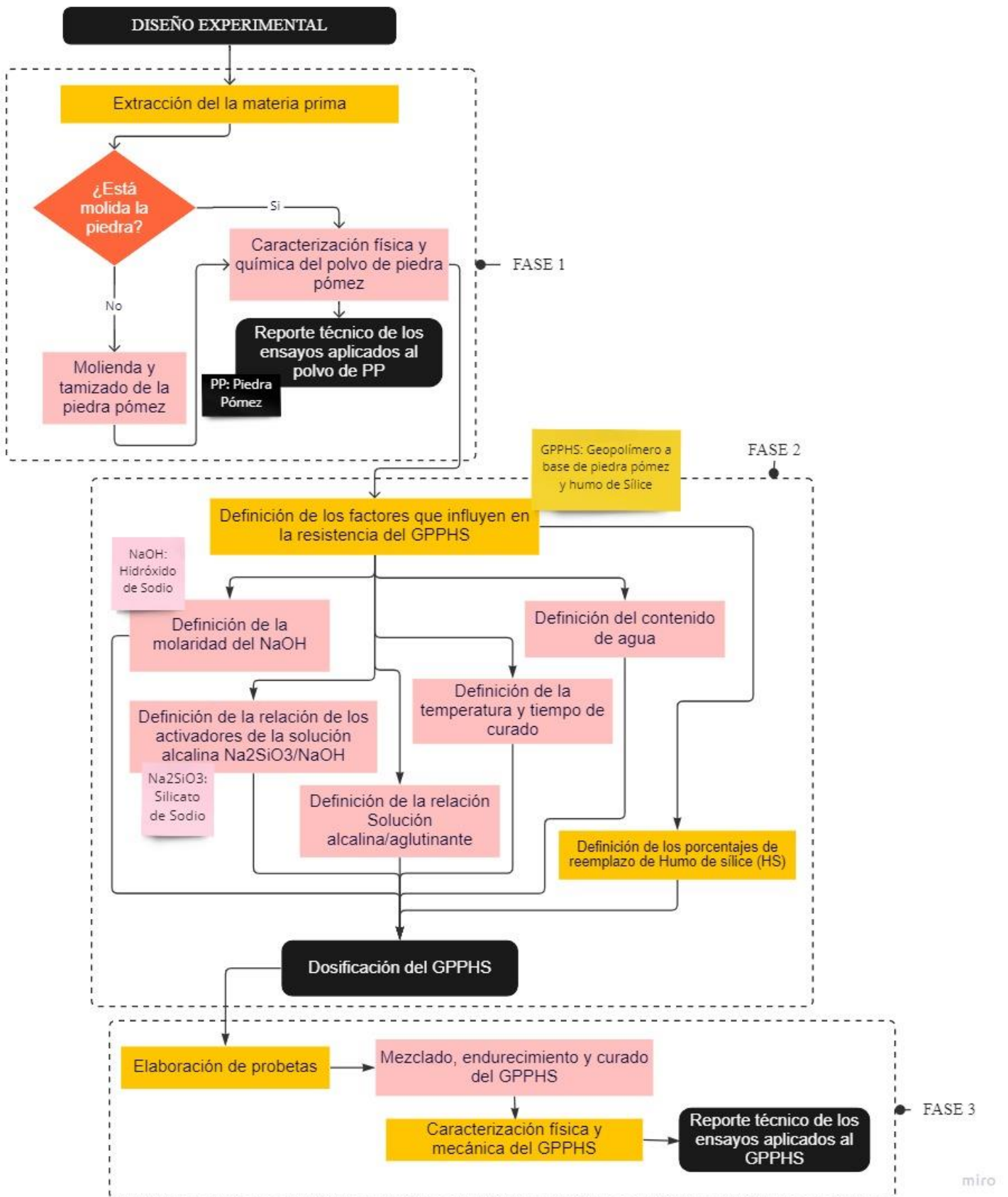


Figura 2. Esquema metodológico experimental.

### 3.9.1. Materiales

#### 3.9.1.1. Piedra pómez

La PP fue obtenida del área minera “Profuturo” de código “201004”, ubicada en la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, con coordenadas UTM 764747.34 m E, 9893327. 94 m S, 2760 m elevación. (Ver Figura 3 y 4)



**Figura 3.** Ubicación del área minera “Profuturo”  
**Fuente:** Google Earth



**Figura 4.** PP recolectada

#### 3.9.1.2. Humo de sílice

Este residuo industrial fue adquirido a la empresa “Ferrekret” ubicada en la ciudad de Guayaquil en una presentación de 5 kg y fue almacenado en las bodegas de los Laboratorios de Ingeniería Civil de la UNACH, garantizando un ambiente fresco y ventilado (Ver figura 5).



**Figura 5.** Humo de sílice (HS)

**Tabla 1.** Composición química del HS

<b>Componente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>
SiO <sub>2</sub>	% w/w	91.10
C libre	% w/w	-
SiC	% w/w	-
MgO	% w/w	0.27
Si libre	% w/w	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% w/w	0.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% w/w	6.82
CaO	% w/w	0.47
Na <sub>2</sub> O	% w/w	0.96
K <sub>2</sub> O	% w/w	0.34
S total	% w/w	-

**Fuente:** Composición química de “Ferrekret”

### 3.9.1.3. Silicato de Sodio

Esta sustancia química se adquirió a la empresa “Relubquim” ubicada en la ciudad de Quito en una presentación de 30 kg. El silicato de sodio usado fue almacenado una las bodegas de los Laboratorios de Ingeniería Civil de la UNACH, siempre garantizando un ambiente fresco, ventilado y oscuro para evitar su evaporación (Ver figura 6).



**Figura 6.** Silicato de Sodio



**Tabla 2.** Especificaciones técnicas del Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Parámetro	Unidades	Especificaciones	Resultado
Alcalinidad	%Na <sub>2</sub> O	9.2% - 11%	9.76
Dióxido de silicio	%SiO <sub>2</sub>	27.5 % - 29.5%	28.5
Relación	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	2.9 - 3.2	2.92
Concentración	°Be	41- 43	42.4
Solidos totales	% m/m	-	38.26

**Fuente:** Certificado de análisis de “Relubquim”

### 3.9.1.4. Hidróxido de sodio

Esta sustancia química se adquirió a la empresa “Largo Rivera Herwin Roger – Novachem del Ecuador” ubicada en la ciudad de Quito. El hidróxido de sodio usado fue sólido en forma de escamas/lentejas el mismo fue almacenado una la bodega de los Laboratorios de Ingeniería Ambiental de la UNACH, siempre garantizando un ambiente fresco, ventilado y oscuro para evitar reacción (Ver figura 7)



**Figura 7.** Hidróxido de sodio

**Tabla 3.** Especificaciones técnicas del NaOH

Nombre del resultado	Unidad	Especificaciones	Resultado
Apariencia		Reporte	Gránulos blancos
NaOH	%	≥ 97.0	98.4
Calcio	%	≤ 0.005	< 0.005
Cloruro	%	≤ 0.005	< 0.005
Metales pesados (como Ag)	%	≤ 0.002	< 0.002
Hierro (Fe)	%	≤ 0.001	< 0.001
Magnesio	%	≤ 0.002	< 0.002
Mercurio (Hg)	ppm	≤ 0.1	< 0.1
Nickel (Ni)	%	≤ 0.001	< 0.001
Nitrógeno compuesto	%	≤ 0.001	< 0.001
Fosfato (PO <sub>4</sub> )	%	≤ 0.001	< 0.001
Potasio (K)	%	≤ 0.02	< 0.02
Carbonato de sodio	%	≤ 1	0.63
Sulfato (SO <sub>4</sub> )	%	≤ 0.003	< 0.003

**Fuente:** Certificado de análisis de “Largo Rivera Herwin Roger – Novachem del Ecuador”

### 3.9.2. Factores adoptados para el diseño del geopolímero

Para calcular las cantidades a utilizar de los materiales involucrados en la fabricación del geopolímero fue identificar los factores que influyen en la resistencia de este material de acuerdo con la revisión documental preliminar, en la tabla 5 se muestran los valores adoptados para cada uno de ellos.

**Tabla 4.** Definición de los factores de resistencia.

<b>Factores</b>	<b>Valor Adoptado</b>	<b>Referencias</b>
Concentración Alcalina	8 M y 12 M	(Safari et al., 2020) y (Mobasheri et al. 2022)
Relación Solución Alcalina/Aglutinante	0.35	(Safari et al., 2020) y (Haddad & Lababneh 2020)
Relación Silicato de sodio/Hidróxido de sodio	2.5	(Safari et al., 2020), (Haddad, 2020) y (Asayesh, 2021)
Relación Agua/Aglutinante	0.4	(Corrales, 2015) y (Segura-Sierpe et al., 2016)
Temperatura de curado	120 h	(Safari et al., 2020) y (Salehi et al., 2017)
Tiempo de curado	60°	(Safari et al., 2020), (Salehi et al., 2017) (Liew et al., 2016) (Livi & Repette, 2017)

Por lo tanto, el geopolímero tiene 2 componentes principales: el aglutinante y la solución alcalina activadora, el primero consiste en la fuente de aluminosilicatos en este caso el polvo de PP del cual se reemplazó un porcentaje HS en función de su peso y la segunda se trata del silicato de sodio e hidróxido de sodio. Estos servirán para definir los sistemas de ecuaciones que permitirán calcular las cantidades para la dosificación de la mezcla del geopolímero lo cual se presenta en el capítulo IV de Resultados.

### 3.9.3. Molienda y tamizado de la PP

La molienda de la PP se realizó en la marmolería “Corazón de la Patria” Sector Parque Industrial de Riobamba, colocando la materia prima en un molino que funciona mediante un árbol de martillos para posteriormente se pasó material por un tambor rotatorio de tamizado a través de láminas perforadas que clasificaron el material en diámetros que van de 2 a 5mm. Este proceso se repitió con el material que no paso por los tamices del tambor rotatorio (Ver figura 8).



**Figura 8.** Molienda y tamizado de la PP

Para obtener el polvo de PP se realizó el tamizado manual del material obtenido de la molienda con una zaranda con malla de diámetro de 0.6 mm, el material que pasó por la zaranda fue sellado y almacenado en una bodega ventilada conservando el material seco. Posteriormente el material se transportó a los Laboratorios de Ingeniería Civil de la UNACH, donde se secó en un horno industrial a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  hasta obtener una masa constante (Ver figura 9).



**Figura 9.** Polvo de PP

#### **3.9.4. Preparación de la solución de NaOH**

Se preparó las soluciones de hidróxido de sodio a las concentraciones ya definidas, 8 y 12 M, para posteriormente mezclarlo con el silicato de sodio. Siendo así, las soluciones de NaOH se obtienen disolviendo los copos o escamas en agua destilada, la cantidad disuelta varía en función de la concentración molar o molaridad (M) (Ver figura 10 a). Por ejemplo,

para la solución con una concentración de 8M la cantidad de gramos de NaOH se obtienen con la siguiente expresión:

$$M = \frac{m}{PM * V} \quad (8)$$

$$m = M * (PM * v) \quad (9)$$

Donde:

$M$  = Concentración molar de la solución = 8M

$m$  = masa del soluto en gramos

$PM$  = Peso molecular del soluto = 40 g/mol

$V$  = volumen de la solución en litros = 1 L

$$m = M * (PM * V)$$

$$m = 8 * (40 * 1)$$

$$m = 320 \text{ g de NaOH}$$

Por lo tanto, se requieren 320 gramos de NaOH por cada litro de solución a 8M y de la misma forma se obtiene que son necesarios 480 gramos de NaOH por cada litro de solución a 12 M, en total se preparó 1 litro por cada molaridad (Ver figura 10 b). Estas soluciones de hidróxido de sodio se preparan 24 horas antes de ser usadas en la mezcla y se las deja enfriar a temperatura ambiente.

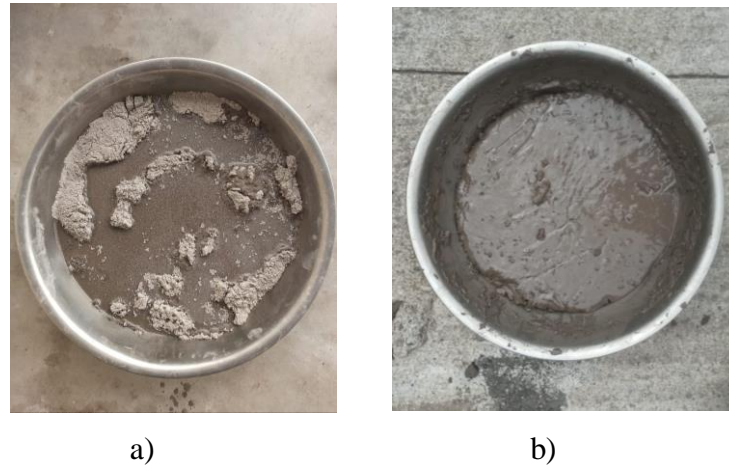


**Figura 10.** a) Disolución del NaOH en agua destilada y b) Soluciones de NaOH a 8 y 12 M

### 3.9.5. Proceso de mezclado

El silicato de sodio y las soluciones de hidróxido de sodio fueron mezcladas en una relación de 2.5 durante 2 minutos para formar la solución alcalina activadora y a esta se le agrega la cantidad de agua resultante de la relación agua/aglutinante de 0.40, se mezcla por otros 2 minutos. Por otra parte, durante 3 minutos se integró el polvo de PP con el HS para

verter la solución alcalina y mezclar por otros 5 minutos hasta conseguir una pasta homogénea. (Ver figura 11)



**Figura 11.** a) Incorporación de materiales, b) Mezcla homogénea de la pasta de geopolímero

Una vez lista la mezcla se procedió a la fabricación de las probetas prismáticas de 40x40x160 mm y 50x50x50 mm de acuerdo con el proceso establecido en la INEN 198 e INEN 488 respectivamente. Para ello se confeccionaron moldes de madera, los cuales fueron limpiados y engrasados y en ellos se vertió la mezcla, se compactó y eliminó los espacios vacíos dejándolas reposar por 24 horas a temperatura ambiente para posteriormente proceder con el desmolde y etiquetado. (Ver figura 12)



**Figura 12.** a) Reposo de 24 h de las probetas, b) Desmolde y etiquetado

### 3.9.6. Curado

Después de las 24 horas de reposo las probetas fueron colocadas en un horno industrial Humboldt Mfg. Co. para someterlas a un curado de 120 horas a una temperatura constante

de 60°C una vez finalizado este proceso todas las probetas fueron cubiertas por una película de plástico film y se conservaron en un ambiente con temperatura de 18°C y una humedad relativa del 50% hasta cumplir con el tiempo de prueba de 7 y 28 días (Ver figura 13).



a)



b)

**Figura 13.** Curado en horno a 60°C por 120 h, b) Curado en temperatura ambiente

A continuación, en la figura 14 se presenta un esquema del flujo de trabajo seguido para la fabricación de los geopolímeros:





**Figura 14.** Esquematización del proceso de fabricación del geopolímero

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización de las propiedades físicas y químicas del polvo de piedra pómez

#### 4.1.1. Densidad seca al horno y absorción

Una vez desarrollado el procedimiento de la NTE INEN 856 para la determinación de la gravedad específica mediante el procedimiento gravímetro (Figura 15), se obtuvo lo siguiente:

Datos:

*Masa de la muestra seca al horno (A) = 483.5 g*

*Masa del picnómetro lleno con agua (B) = 1211.0 g*

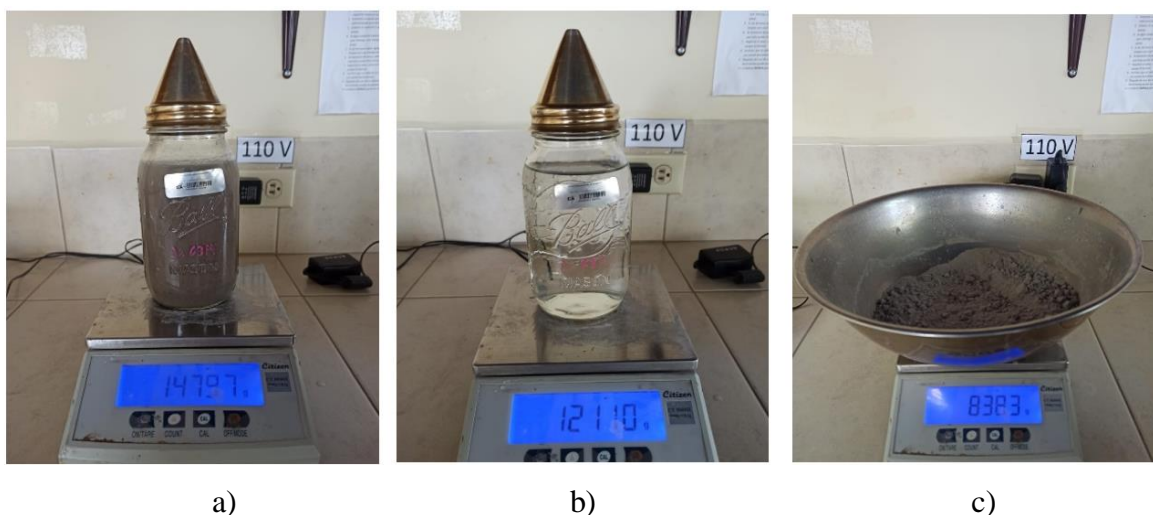
*Masa del picnómetro lleno con muestra y agua (C) = 1479.6 g*

*Masa de la muestra saturada superficialmente seca (S) = 500.0 g*

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 A}{(B+S-C)} \quad (1)$$

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 (483.5)}{(1211.0 + 500.0 - 1479.6)}$$

$$\text{Densidad (SH)} = 2084.23 \text{ kg/m}^3$$



**Figura 15.** Valores de masa obtenidos con el método gravimétrico: a) Picnómetro + agua + muestra, b) picnómetro + agua y c) Masa seca al horno + recipiente



Utilizando los valores de masa obtenidos en el método gravimétrico, se estima el parámetro de absorción de una porción de 500 g de polvo de PP en condición saturada superficialmente seca sometida a 110° C.

$$Absorción \% = \frac{(S-A)}{A} * 100 \quad (2)$$

$$Absorción \% = \frac{(500 - 483.5)}{483.5} * 100$$

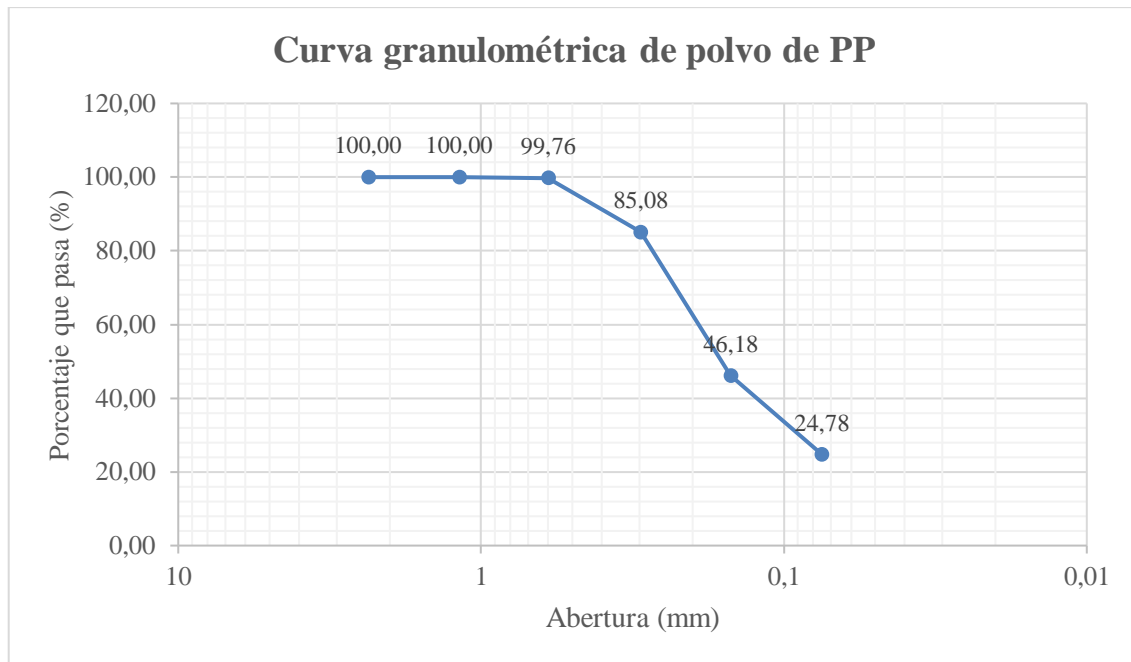
$$Absorción \% = 3.41\%$$

#### 4.1.2. Granulometría y módulo de finura

Una vez efectuado el procedimiento de la NTE INEN 696, para realizar el análisis granulométrico del polvo de PP para 500 gr de muestra, se obtuvieron los resultados de la tabla 5, resultando la curva granulométrica de la figura 16.

**Tabla 5.** Análisis granulométrico.

Tamiz		Peso retenido parcial (gr)	Peso retenido acumulado (gr)	% Retenido	% Que pasa
(pulg)	(mm)				
1½"	37.5	0.00	0.00	0.00	100.00
¾"	19	0.00	0.00	0.00	100.00
⅜"	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°8	2.36	0.00	0.00	0.00	100.00
N°16	1.18	0.00	0.00	0.00	100.00
N°30	0.6	1.20	1.20	0.24	99.76
N°50	0.297	73.40	74.60	14.92	85.08
N°100	0.15	194.50	269.10	53.82	46.18
N°200	0.075	107.00	376.10	75.22	24.78
<b>Bandeja</b>		123.90	500.00	100.00	0.00



**Figura 16.** Curva granulométrica del polvo de PP

La figura 16 indica que el 99.76% de las partículas tienen un diámetro menor a 0.6 mm, el 38.90% un tamaño que oscila entre 0.297 mm y 0.15 mm, mientras que el 24.78% tiene un tamaño menor al 0.075mm.

Aplicando el proceso de cálculo del numeral 5.4 de la NTE INEN 696, para la determinación del módulo de finura (MF) del polvo de PP, se obtuvo el siguiente resultado.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ ret. acu. } (1\frac{1}{2}''+3/4''+3/8''+N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100} \quad (3)$$

$$MF = \frac{0.00 + 0.00 + 0.00 + 0.00 + 0.00 + 0.00 + 0.24 + 14.92 + 53.82}{100}$$

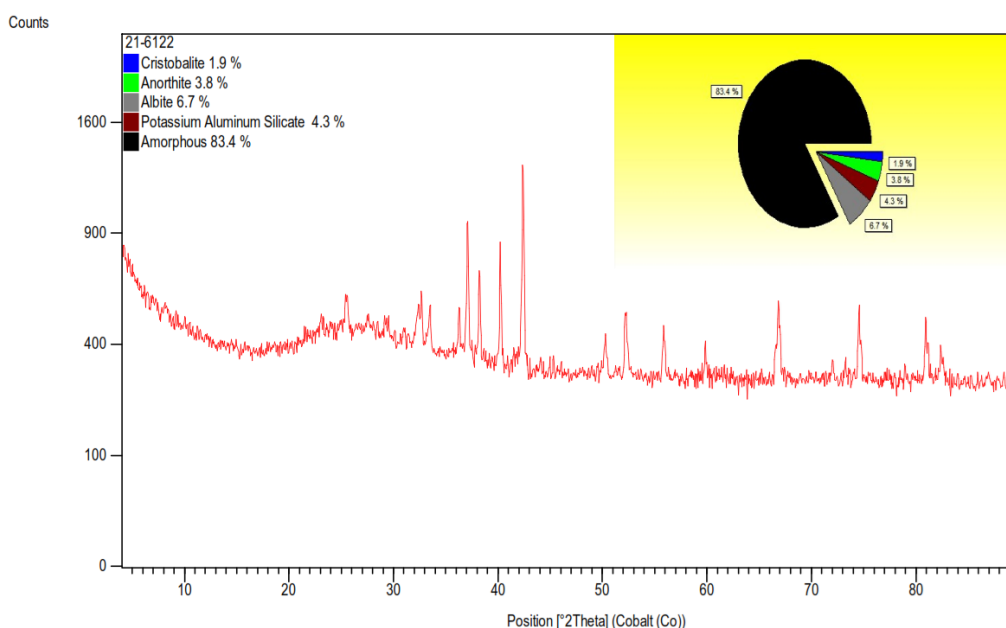
$$MF = 0.69$$

El módulo de finura es 0.69 lo que corresponde a un material muy fino.

#### 4.1.3. Difracción por rayos X

La composición cualitativa y cuantitativa del polvo de PP se obtuvo de un estudio previo de Andrade, (2022), estudio en el cual se realizó la caracterización del material pomez de

distintas canteras incluida la cantera del área minera “Profuturo” que es la cantera de la cual se obtuvo el material para el presente proyecto.



**Figura 17.** Diagrama de difracción del polvo de PP

**Fuente:** (Andrade, 2022)

A continuación, se resumen el nombre del compuesto, su fórmula química y porcentaje presente en el polvo de PP.

**Tabla 6.** Resultados de la composición cuantitativa y cualitativa del polvo de PP.

Código de referencia	Nombre del compuesto	Formula química	Porcentaje
00-039-1425	Cristobalita, syn	Si O <sub>2</sub>	1.9%
00-041-1486	Anortita, ordenada	Ca Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	3.8%
00-041-1480	Albita, calcita, ordenada	(Na, Ca) Al (Si, Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	6.7%
00-033-0988	Silicato de aluminio y potasio	K Al Si O <sub>4</sub>	4.3%

A partir de la tabla 6 se pudo apreciar la presencia de silicio, oxígeno, calcio, aluminio, sodio y potasio en diferentes proporciones y composiciones.

## 4.2. Dosificación del geopolímero

### 4.2.1. Dosificación de las probetas testigo

El cálculo de las cantidades de materiales se realizó a partir del volumen total del geopolímero a emplearse para cada dosificación. Para el presente proyecto fue necesario un total de 6 cubos de 50 mm de aristas y 6 vigas de 40x40x160 mm dando un volumen de 750  $cm^3$  y 1536  $cm^3$ , respectivamente, además se tomó de referencia una densidad promedio de 2200  $kg/m^3$  obtenida de la investigación de Osorio (2021); se considera también un desperdicio del 5%.

$$\text{Peso de cubos} = 750 \text{ cm}^3 * 0.0022 \text{ kg/cm}^3 = 1.650 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de vigas} = 1536 \text{ cm}^3 * 0.0022 \text{ kg/cm}^3 = 3.379 \text{ kg}$$

$$\text{Peso total con desperdicio} = (1.65 \text{ kg} + 3.379 \text{ kg}) * 1.05 = 5.281 \text{ kg}$$

El geopolímero está compuesto principalmente de una solución alcalina y polvo de PP (aglutinante), las cantidades necesarias de ambos materiales se calcularon a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Solución alcalina}}{\text{Aglutinante}} = 0.35 \\ \text{Peso del aglutinante} + \text{Peso de la solución alcalina} = \text{Peso total con desperdicio} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\text{Solución alcalina}}{\text{Aglutinante}} = 0.35 \\ \text{Peso del aglutinante} + \text{Peso de la solución alcalina} = \text{Peso total con desperdicio} \end{array} \right. \quad (11)$$

Despejando el peso de la solución alcalina de la Ecuación 10 y sustituyéndola en la Ecuación 11 se tiene lo siguiente:

$$\text{Peso del aglutinante} = \frac{\text{Peso total con desperdicio}}{\left(1 + \frac{\text{Solución alcalina}}{\text{Aglutinante}}\right)}$$

$$\text{Peso del aglutinante} = \frac{5.281 \text{ kg}}{(1 + 0.35)} = 3.912 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de la solución alcalina} = \text{Peso del aglutinante} * \frac{\text{Solución alcalina}}{\text{Aglutinante}}$$

$$\text{Peso de la solución alcalina} = 3.912 \text{ kg} * 0.35 = 1.369 \text{ kg}$$

La solución alcalina está compuesta por silicato de sodio ( $Na_2SiO_3$ ) e hidróxido de sodio ( $NaOH$ ), las cantidades de ambos se calcularon a partir del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{Na_2SiO_3}{NaOH} = 2.5 & (12) \\ NaOH + Na_2SiO_3 = \text{Peso de la solución alcalina} & (13) \end{cases}$$

Despejando el peso de  $Na_2SiO_3$  de la Ecuación 12 y sustituyéndola en la Ecuación 13 se tiene lo siguiente:

$$\text{Peso de } NaOH = \frac{\text{Peso de la solución alcalina}}{(1 + \frac{Na_2SiO_3}{NaOH})}$$

$$\text{Peso de } NaOH = \frac{1.369 \text{ kg}}{(1 + 2.5)} = 0.391 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de } Na_2SiO_3 = \text{Peso de } NaOH * \frac{Na_2SiO_3}{NaOH}$$

$$\text{Peso de } Na_2SiO_3 = 0.391 \text{ kg} * 2.5 = 0.978 \text{ kg}$$

Por último, el contenido de agua es el encargado de proporcionar trabajabilidad a la mezcla y se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{\text{Agua}}{\text{Aglutinante}} = 0.40$$

$$\text{Peso del agua} = \text{Peso del aglutinante} * \frac{\text{Agua}}{\text{Aglutinante}} \quad (14)$$

$$\text{Peso del agua} = 3.912 \text{ kg} * 0.4 = 1.565 \text{ kg}$$

A continuación, en la tabla 7 se presenta de forma resumida la dosificación de los materiales:

**Tabla 7.** Dosificación de probetas testigo.

Concentración de NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH	Solución Alcalina/ Aglutinante	Solución Alcalina (Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> + NaOH)	Aglutinante (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	Agua / Aglutinante	Peso del agua (kg)
8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	0.978	0.391	0.40	1.565
12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	0.978	0.391	0.40	1.565

#### 4.2.2. Dosificación de las probetas con HS

La definición de los porcentajes de reemplazo de HS para la elaboración de las probetas se realizó de acuerdo con la revisión bibliográfica en la que se constató que dichos porcentajes son en peso en función del aglutinante y varían desde el 2% hasta el 10%, por ello en el presente estudio se planteó que el porcentaje de reemplazo de HS sea de 2.5%, 5%, 7.5% y 10%.

Los cálculos de las cantidades utilizadas se realizaron de la misma manera que las probetas testigos con la excepción de que el aglutinante estará formado por polvo de PP y HS en los porcentajes de reemplazo ya mencionados como se muestra a continuación:

$$\text{Peso del humo de sílice} = \text{Peso del aglutinante} * \% \text{ de reemplazo} \quad (15)$$

$$\text{Peso del humo de sílice} = 3.912 \text{ kg} * \frac{2.5\%}{100\%} = 0.980 \text{ kg}$$

$$\text{Peso del polvo de piedra pómez} = \text{Peso del aglutinante} - \text{Peso del humo de sílice} \quad (16)$$

$$\text{Peso del polvo de piedra pómez} = 3.912 \text{ kg} - 0.980 \text{ kg} = 3.814 \text{ kg}$$

Este procedimiento se repite para todos los porcentajes de reemplazo, en la tabla 8 se presenta de forma resumida la dosificación de los materiales.

**Tabla 8.** Dosificación de las probetas con HS

% de reemplazo HS	Concentración de NaOH	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	Solución Alcalina/Aglutinante	Solución Alcalina	Aglutinante (kg)	Polvo de PP (kg)	HS (kg)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (kg)	NaOH (kg)	Agua / Aglutinante	Peso del agua (kg)
2.5%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.814	0.098	0.978	0.391	0.40	1.565
2.5%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.814	0.098	0.978	0.391	0.40	1.565
5.0%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.716	0.196	0.978	0.391	0.40	1.565
5.0%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.716	0.196	0.978	0.391	0.40	1.565
7.5%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.618	0.293	0.978	0.391	0.40	1.565
7.5%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.618	0.293	0.978	0.391	0.40	1.565
10.0%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.520	0.391	0.978	0.391	0.40	1.565
10.0%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.520	0.391	0.978	0.391	0.40	1.565

### **4.3. Caracterización de física y mecánica del geopolímero**

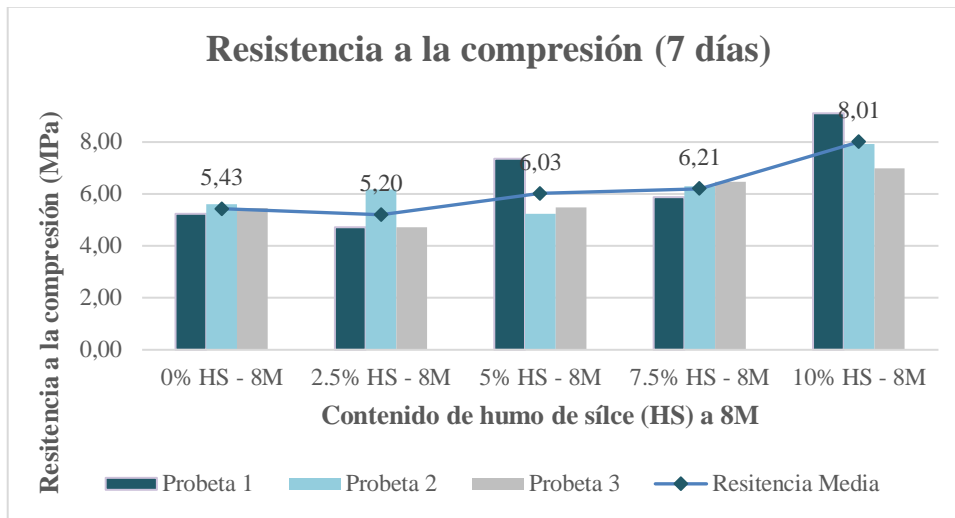
#### **4.3.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión a los 7 días fue medida a partir de probetas de 40 mm de arista aplicando la NTE INEN 198 (1987) mientras que la resistencia a la compresión a los 28 días fue determinada con probetas de 50 mm de aristas de acuerdo a los lineamiento de la NTE INEN 488 (2009). Para cada edad y dosificación se elaboraron 3 probetas, obteniendo los siguientes resultados del análisis descriptivo como se muestra en las tablas 9 y 10, que corresponde a la de edad de 7 y 28 días, respectivamente.

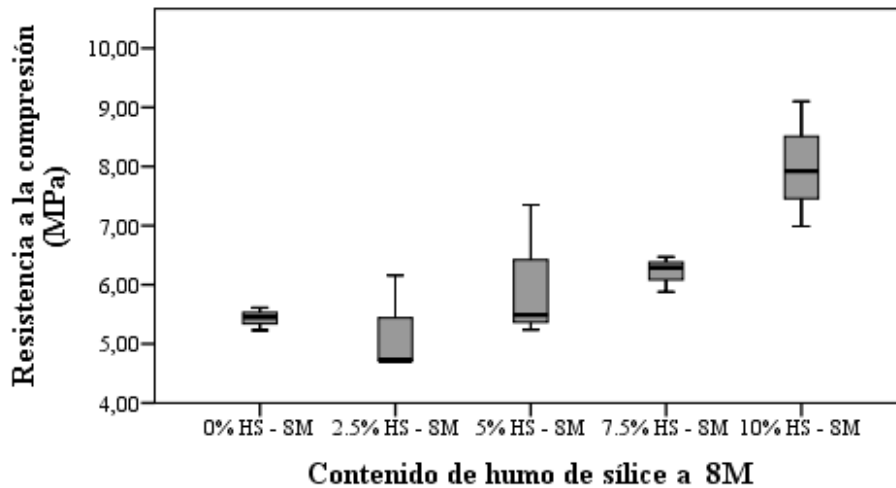
**Tabla 9.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días

<b>Código</b>	<b>Media</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Mediana</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Asimetría</b>
0% HS – 8M	5.4300	4.9561	5.9039	5.4500	0.0360	0.1908	5.2300	5.6100	0.3800	-0.4670
	Error típ. 0.110									Error típ. 1.225
2.5% HS – 8M	5.200	3.135	7.265	4.720	0.691	0.831	4.720	6.160	1.440	1.732
	Error típ. 0.480									Error típ. 1.2250
5.0% HS – 8M	6.027	3.163	8.891	5.490	1.329	1.153	5.240	7.350	2.110	1.641
	Error típ. 0.6656									Error típ. 1.225
7.5% HS – 8M	6.213	5.462	6.965	6.290	0.091	0.302	5.880	6.470	0.590	-1.068
	Error típ. 0.1746									Error típ. 1.225
10% HS – 8M	8.003	5.376	10.630	7.920	1.118	1.057	6.990	9.100	2.110	0.352
	Error típ. 0.611									Error típ. 1.225
0% HS – 12M	5.617	4.147	7.087	5.720	0.350	0.592	4.980	6.150	1.170	-0.762
	Error típ. 0.342									Error típ. 1.225
2.5% HS – 12M	5.783	5.311	6.256	5.770	0.036	0.190	5.600	5.980	0.380	0.314
	Error típ. 0.110									Error típ. 1.225
5.0% HS – 12M	6.450	2.349	10.551	7.180	2.725	1.651	4.560	7.610	3.050	-1.601
	Error típ. 0.953									Error típ. 1.225
7.5% HS – 12M	6.483	3.528	9.438	7.020	1.415	1.190	5.120	7.310	2.190	-1.617
	Error típ. 0.687									Error típ. 1.225
10% HS – 12M	8.000	6.509	9.491	8.090	0.360	0.600	7.360	8.550	1.190	-0.660
	Error típ. 0.346									Error típ. 1.225



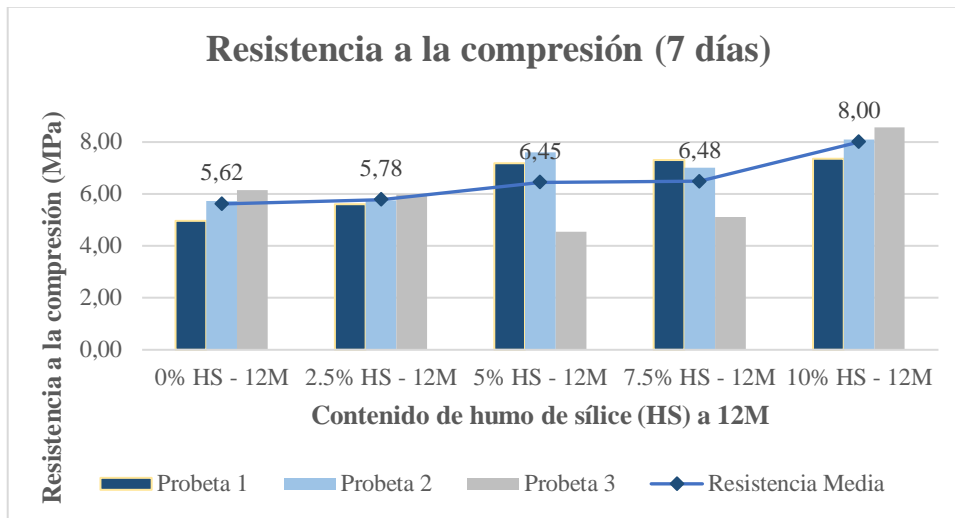


**Figura 18.** Resistencia a la compresión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 8M

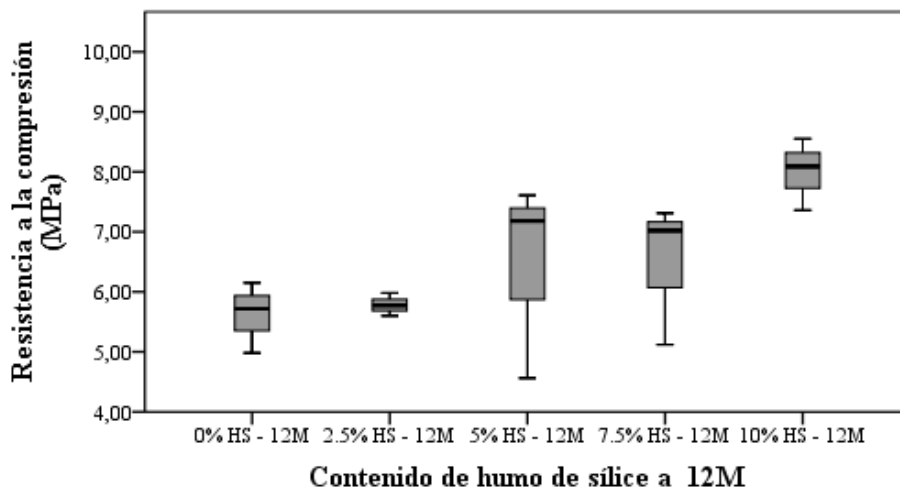


**Figura 19.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 7 días con dosificaciones a 8M

La figura 18 indica que a los 7 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la compresión a partir del 5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 8.01 MPa lo que representa un incremento de 32.21% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 8M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 19) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo las dosificaciones de 5% y 10% aquellas que presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.



**Figura 20.** Resistencia a la compresión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M.

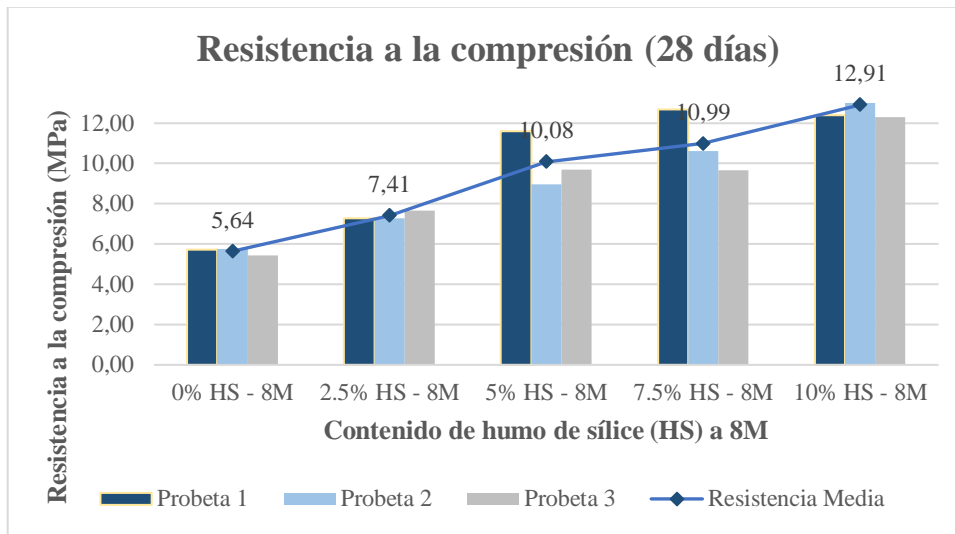


**Figura 21.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 7 días con dosificaciones a 12M

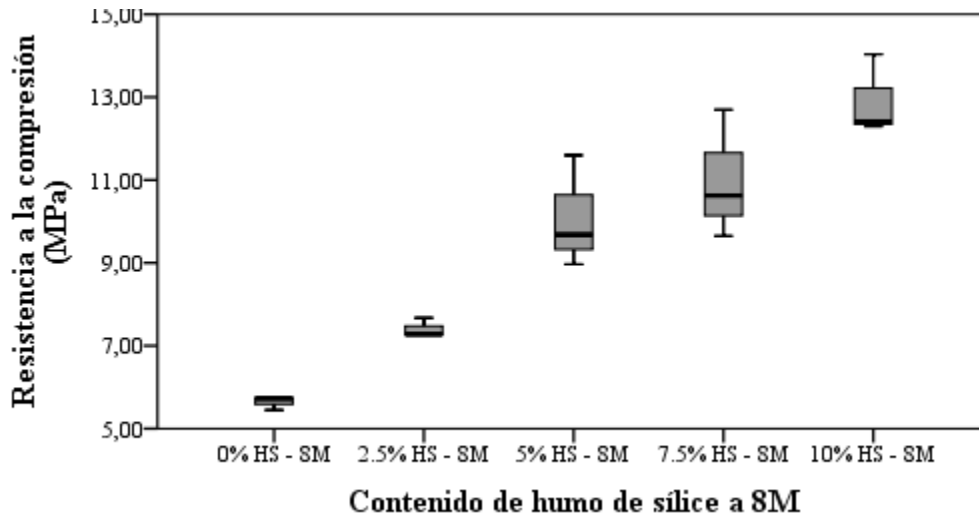
La figura 20 indica que a los 7 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la compresión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 8.00 MPa lo que representa un incremento de 29.75% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 12M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 21) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo las dosificaciones de 5% y 7.5% aquellas que presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.

**Tabla 10.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la compresión a los 28 días

<b>Código</b>	<b>Media</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Mediana</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Asimetría</b>
0% HS – 8M	5.643	5.227	6.060	5.730	0.028	0.168	5.450	5.750	0.300	-1.704
	Error típ. 0.968									Error típ. 1.225
2.5% HS – 8M	7.409	6.835	7.983	7.278	0.053	0.231	7.270	7.680	0.400	1.731
	Error típ. 0.133									Error típ. 1.225
5.0% HS – 8M	10.083	6.704	13.461	9.682	1.850	1.360	8.970	11.600	2.630	1.211
	Error típ. 0.785									Error típ. 1.225
7.5% HS – 8M	10.992	7.129	14.854	10.624	2.418	1.555	9.650	12.700	3.040	1.006
	Error típ. 0.898									Error típ. 1.225
10% HS – 8M	12.910	10.485	15.336	12.400	0.953	0.976	12.290	14.040	1.740	1.709
	Error típ. 0.564									Error típ. 1.225
0% HS – 12M	7.390	5.368	9.412	7.860	0.663	0.814	6.450	7.860	1.410	-1.732
	Error típ. 0.470									Error típ. 1.225
2.5% HS – 12M	8.449	7.710	9.188	8.485	0.089	0.298	8.130	8.730	0.590	-0.546
	Error típ. 0.172									Error típ. 1.225
5.0% HS – 12M	10.859	8.087	13.632	11.397	1.245	1.116	9.580	11.600	2.030	-1.665
	Error típ. 0.644									Error típ. 1.225
7.5% HS – 12M	11.845	10.975	12.716	11.931	0.123	0.350	11.460	12.140	0.680	-1.034
	Error típ. 0.202									Error típ. 1.225
10% HS – 12M	14.102	12.393	15.812	14.234	0.473	0.688	13.360	14.710	1.360	-0.831
	Error típ. 0.397									Error típ. 1.225



**Figura 22.** Resistencia a la compresión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M.



**Figura 23.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 28 días con dosificaciones a 8M

La figura 22 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la compresión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 12.91 MPa lo que representa un incremento de 56.31% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 8M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 23) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo las dosificaciones de 5% y 7.5% aquellas que presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.

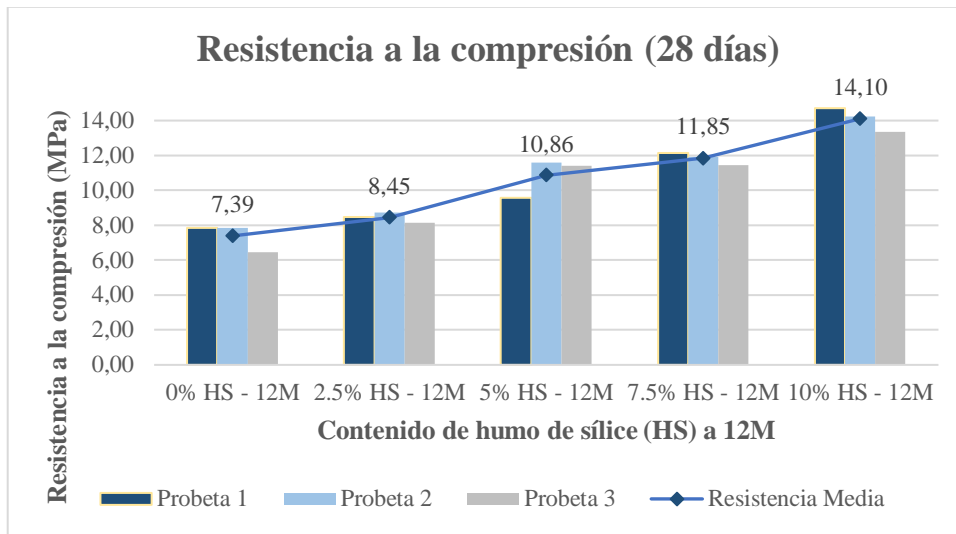


Figura 24. Resistencia a la compresión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 12M

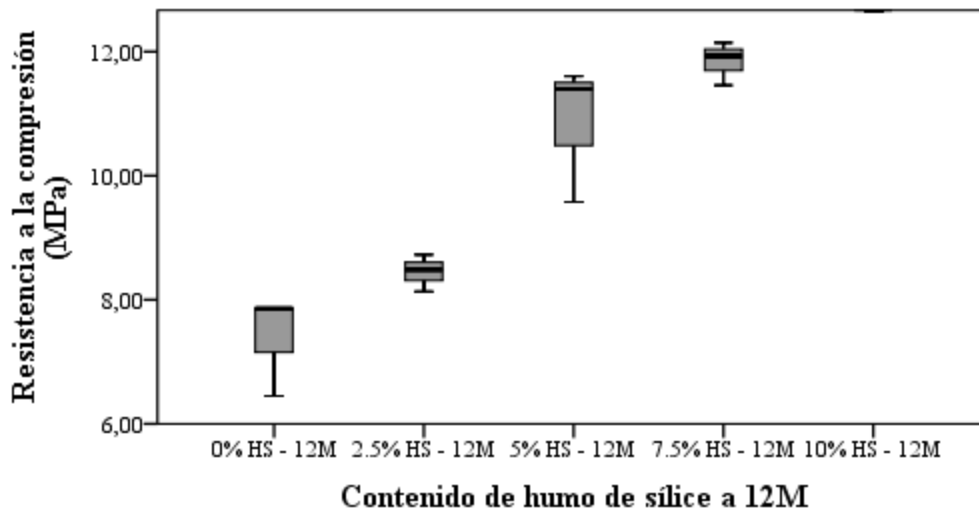


Figura 25. Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la compresión a los 28 días con dosificaciones a 12M

La figura 24 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la compresión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 14.10 MPa lo que representa un incremento de 47.59% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 12M.

La figura 26 representa la curva resistencia a compresión versus tiempo de los diferentes porcentajes de reemplazo a una concentración de 8M, en dicha grafica se pudo apreciar que en promedio la resistencia a los 7 días es un 69% de la resistencia a los 28 días.

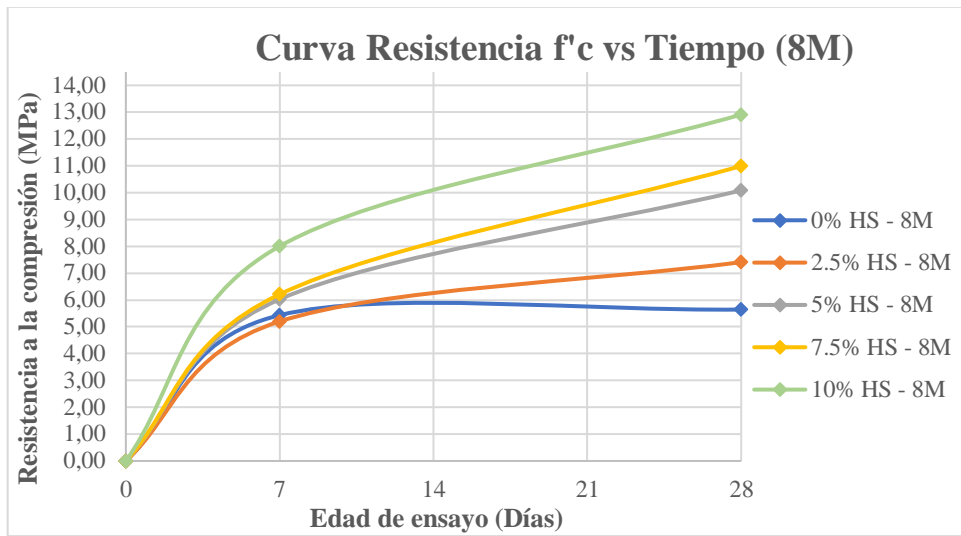


Figura 26. Curvas de resistencias a la compresión a diferentes porcentajes de HS a 8M

La figura 27 representa la curva resistencia a compresión versus tiempo de los diferentes porcentajes de reemplazo a una concentración de 12M, en dicha grafica se pudo apreciar que en promedio la resistencia a los 7 días es un 63% de la resistencia a los 28 días.

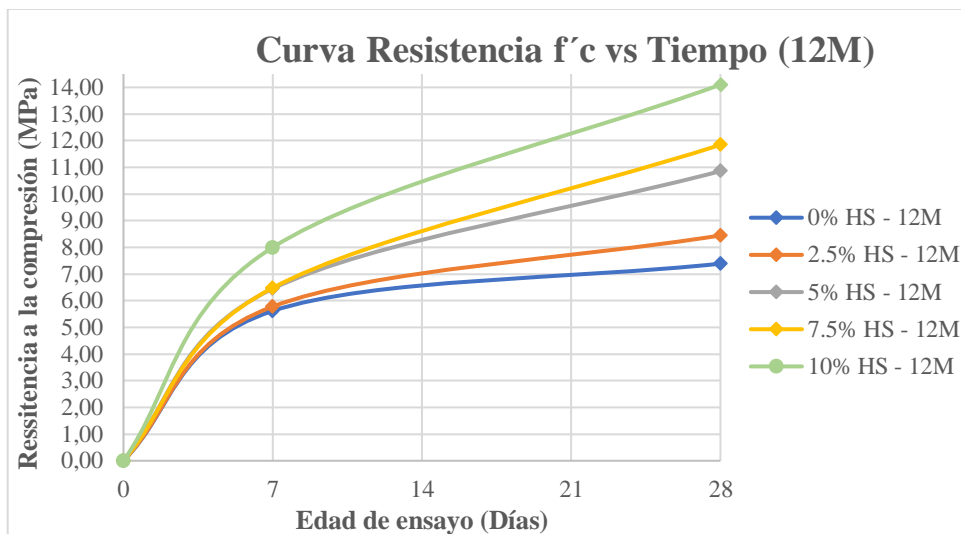


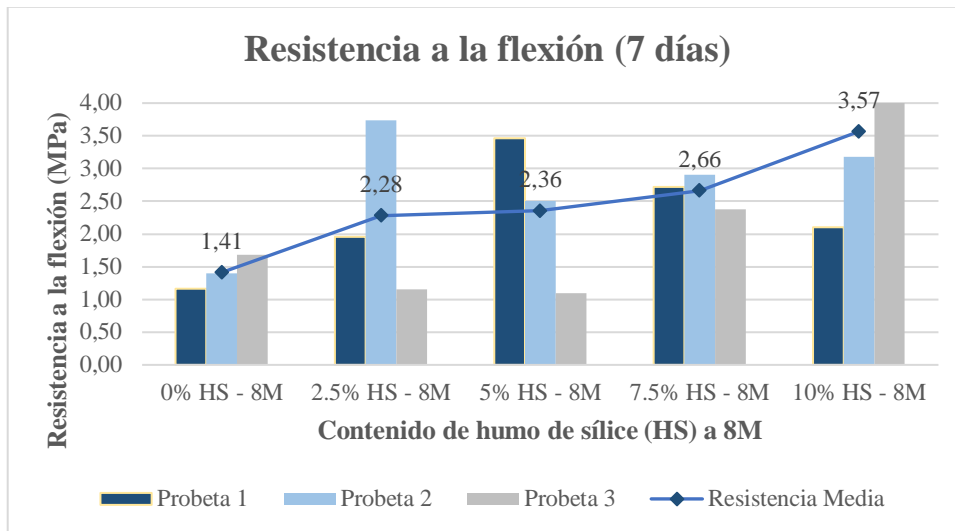
Figura 27. Curvas de resistencias a la compresión a diferentes porcentajes de HS a 12M

#### 4.3.2. Resistencia a la flexión

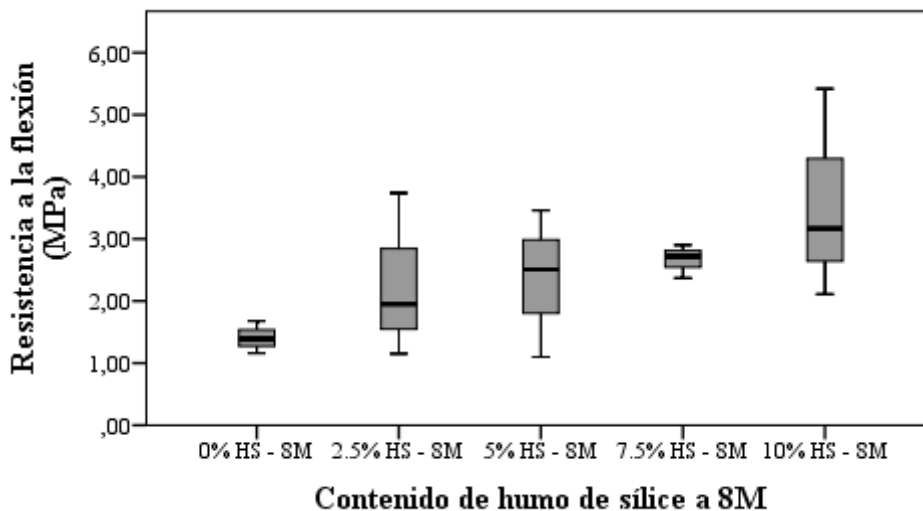
La resistencia a la flexión a los 7 y 28 días fue medida a partir de probetas de 40x40x160 mm aplicando la NTE INEN 198 (1987), para cada edad y dosificación se elaboraron 3 probetas, obteniendo los resultados que se muestra en las tablas 11 y 12, que corresponde a la de edad de 7 y 28 días, respectivamente.

**Tabla 11.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 7 días

Código	Media	Límite inferior	Límite superior	Mediana	Varianza	Desviación típica	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría
0% HS – 8M	1.410	0.763	2.057	1.390	0.068	0.261	1.160	1.680	0.520	0.343
	Error típ. 0.150									Error típ. 1.225
2.5% HS – 8M	2.280	-1.014	5.574	1.950	1.759	1.326	1.150	3.740	2.590	1.050
	Error típ. 0.766									Error típ. 1.225
5.0% HS – 8M	2.357	-0.593	5.307	2.510	1.410	1.187	1.100	3.460	2.360	-0.571
	Error típ. 0.686									Error típ. 1.225
7.5% HS – 8M	2.663	1,994	3,333	2,720	0,073	0,270	2,370	2,900	0,530	-0,904
	Error típ. 0.156									Error típ. 1.225
10% HS – 8M	3,567	-0,632	7,766	3,170	2,857	1,690	2,110	5,420	3,310	0,998
	Error típ. 0.976									Error típ. 1.225
0% HS – 12M	2,407	0,581	4,233	2,410	0,540	0,735	1,670	3,140	1,470	-0,020
	Error típ. 0.424									Error típ. 1.225
2.5% HS – 12M	2,640	2,030	3,251	2,740	0,060	0,246	2,360	2,820	0,460	-1,528
	Error típ. 0.142									Error típ. 1.225
5.0% HS – 12M	2,743	1,331	4,156	2,630	0,323	0,569	2,240	3,360	1,120	0,861
	Error típ. 0.328									Error típ. 1.225
7.5% HS – 12M	3,003	1,710	4,297	2,770	0,271	0,521	2,640	3,600	0,960	1,611
	Error típ. 0.301									Error típ. 1.225
10% HS – 12M	3,840	-1,447	9,127	4,900	4,529	2,128	1,390	5,230	3,840	-1,685
	Error típ. 1.229									Error típ. 1.225



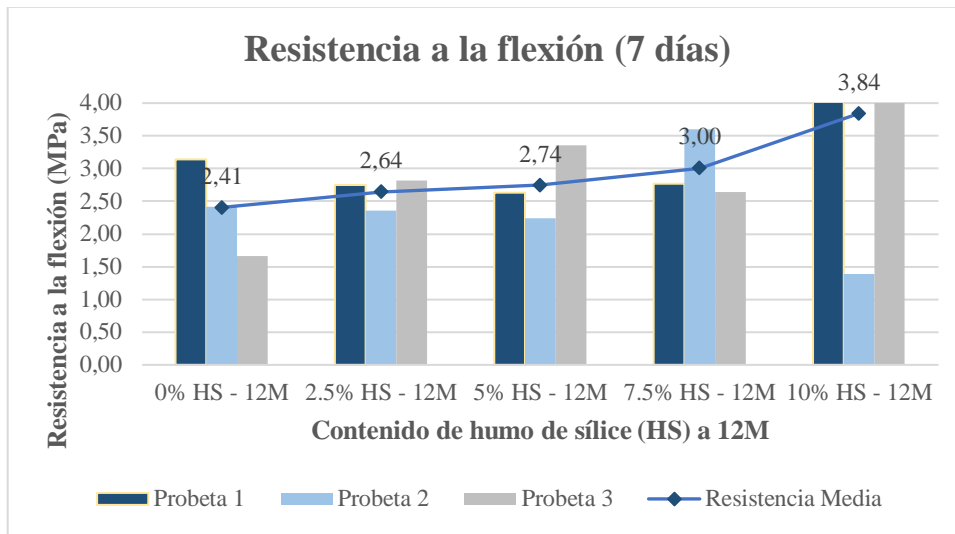
**Figura 28.** Resistencia a la flexión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M.



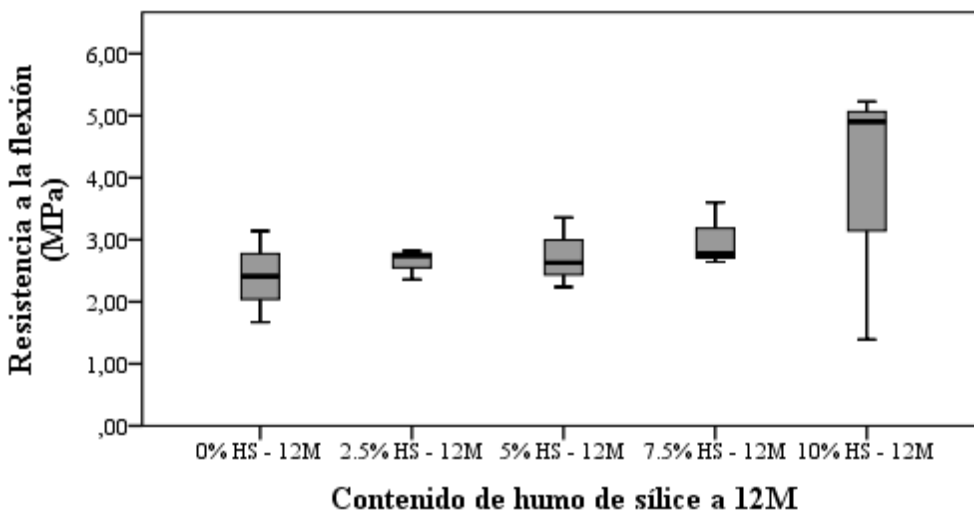
**Figura 29.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 7 días con dosificaciones a 8M

La figura 28 indica que a los 7 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la flexión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 3.57 MPa lo que representa un incremento de 60.50% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 8M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 29) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo las dosificaciones de 2.5%, 5% y 7.5% aquellas que presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.





**Figura 30.** Resistencia a la flexión a la edad de 7 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M.

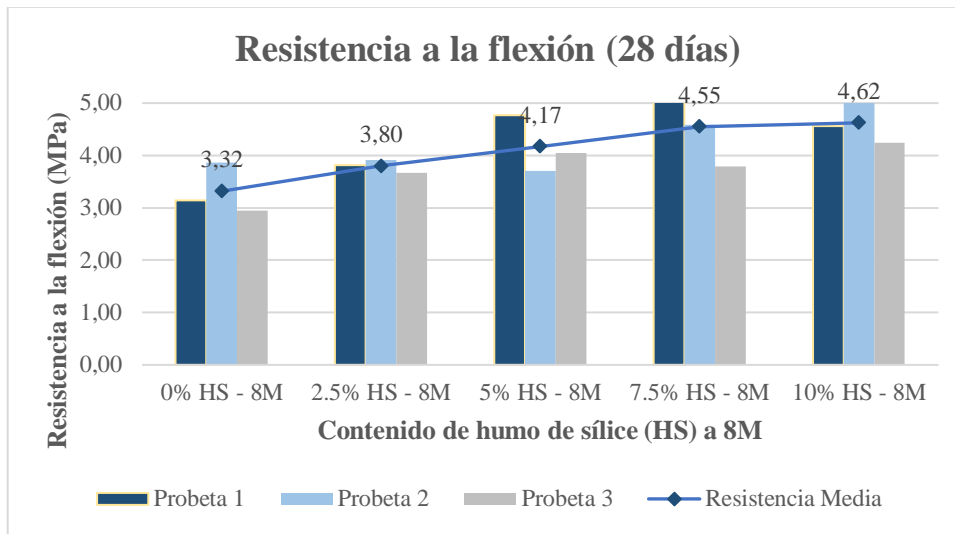


**Figura 31.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 7 días con dosificaciones a 12M

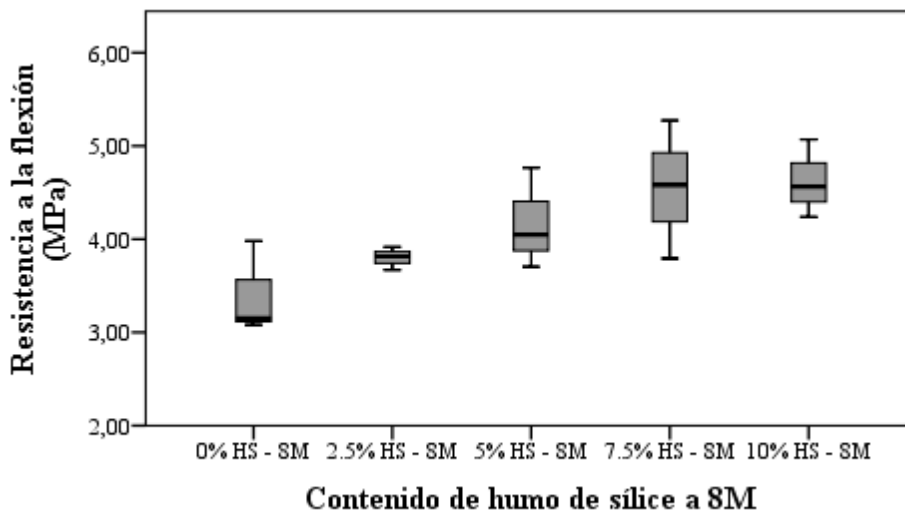
La figura 30 indica que a los 7 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la flexión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 3.84 MPa lo que representa un incremento de 37.24% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 12M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 31) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo la dosificación de 10% aquella que presentó una mayor dispersión en la distribución de datos.

**Tabla 12.** Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 28 días

<b>Código</b>	<b>Media</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Mediana</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Asimetría</b>
0% HS – 8M	3.320	2.132	4.508	3.150	0.229	0.478	2.950	3.860	0.910	1.398
	Error típ.									Error típ.
	0.276									1.225
2.5% HS – 8M	3.800	3.492	4.108	3.813	0.015	0.124	3.670	3.920	0.250	-0.489
	Error típ.									Error típ.
	0.716									1.225
5.0% HS – 8M	4.173	2.829	5.516	4.049	0.292	0.541	3.700	4.760	1.060	0.977
	Error típ.									Error típ.
	0.312									1.225
7.5% HS – 8M	4.549	2.709	6.390	4.582	0.549	0.741	3.790	5.270	1.480	-0.200
	Error típ.									Error típ.
	0.428									1.225
10% HS – 8M	4.623	3.583	5.663	4.563	0.175	0.419	4.240	5.070	0.830	0.630
	Error típ.									Error típ.
	0.242									1.225
0% HS – 12M	3.933	2.487	5.380	3.730	0.339	0.582	3.480	4.590	1.110	1.380
	Error típ.									Error típ.
	0.336									1.225
2.5% HS – 12M	4.108	3.629	4.587	4.105	0.037	0.193	3.920	4.300	0.390	0.067
	Error típ.									Error típ.
	0.111									1.225
5.0% HS – 12M	4.327	1.038	7.617	4.506	1.753	1.324	2.920	5.550	2.630	-0.597
	Error típ.									Error típ.
	0.764									1.225
7.5% HS – 12M	4.662	3.583	5.741	4.751	0.189	0.434	4.190	5.050	0.860	-0.883
	Error típ.									Error típ.
	0.251									1.225
10% HS – 12M	4.781	4.063	5.499	4.661	0.084	0.289	4.570	5.110	0.540	1.546
	Error típ.									Error típ.
	0.167									1.225

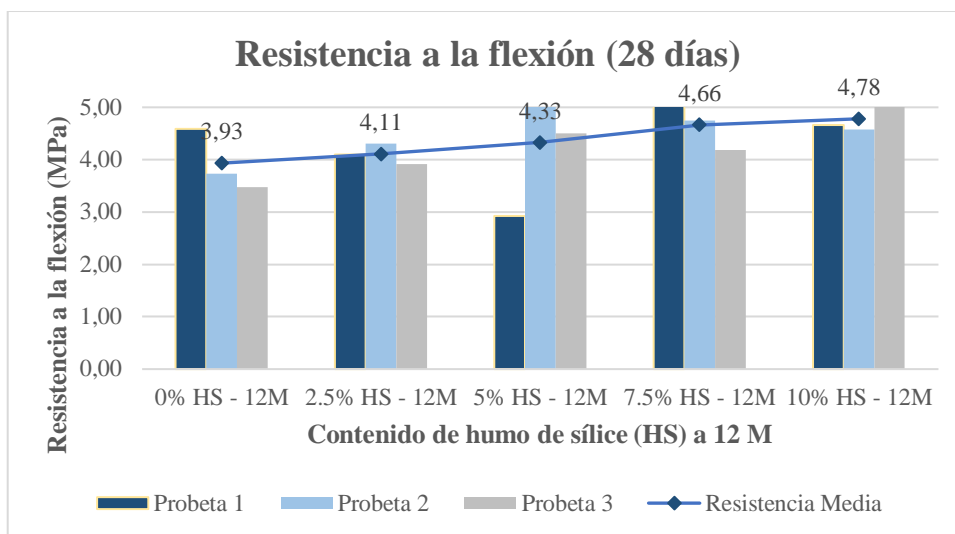


**Figura 32.** Resistencia a la flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 8 M.

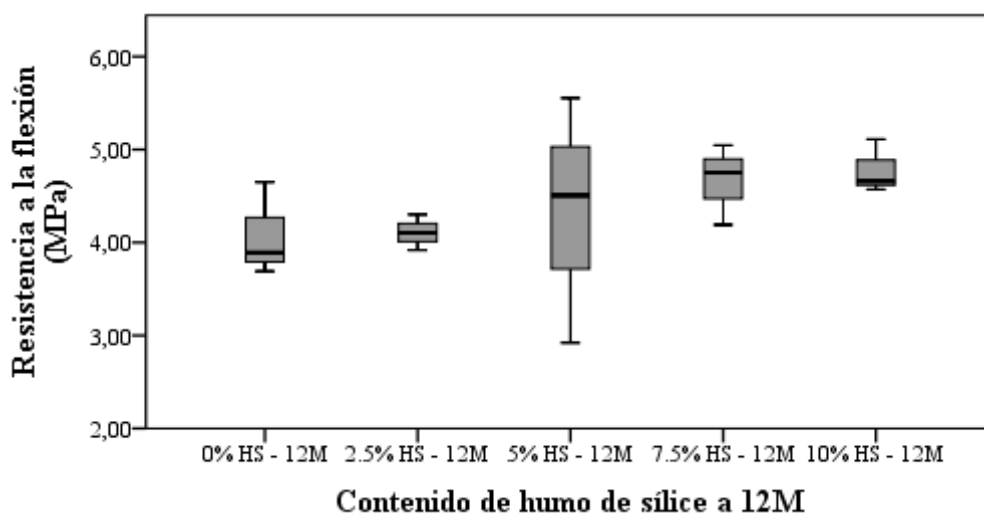


**Figura 33.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 28 días con dosificaciones a 8M

La figura 32 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la flexión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 4.62 MPa lo que representa un incremento de 28.14% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 8M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 33) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, siendo las dosificaciones de 5% y 7.5% aquellas que presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.



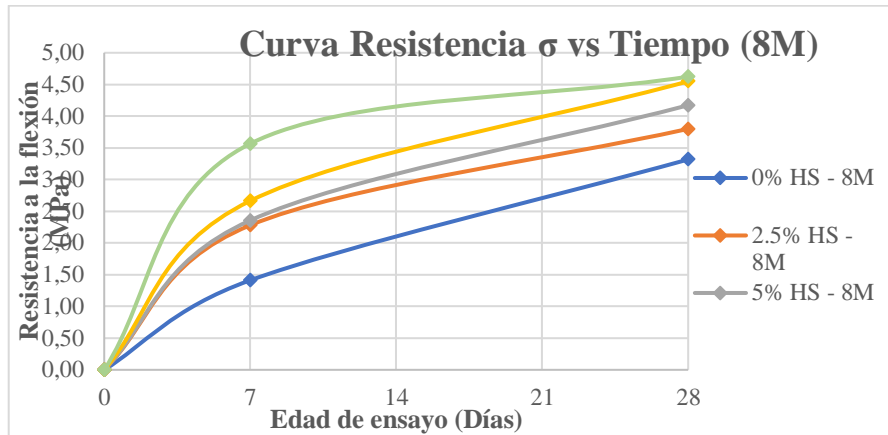
**Figura 34.** Resistencia a la flexión a la edad de 28 días del geopolímero con dosificaciones a 12 M.



**Figura 35.** Diagrama de caja y bigotes de la resistencia a la flexión a los 28 días con dosificaciones a 12M

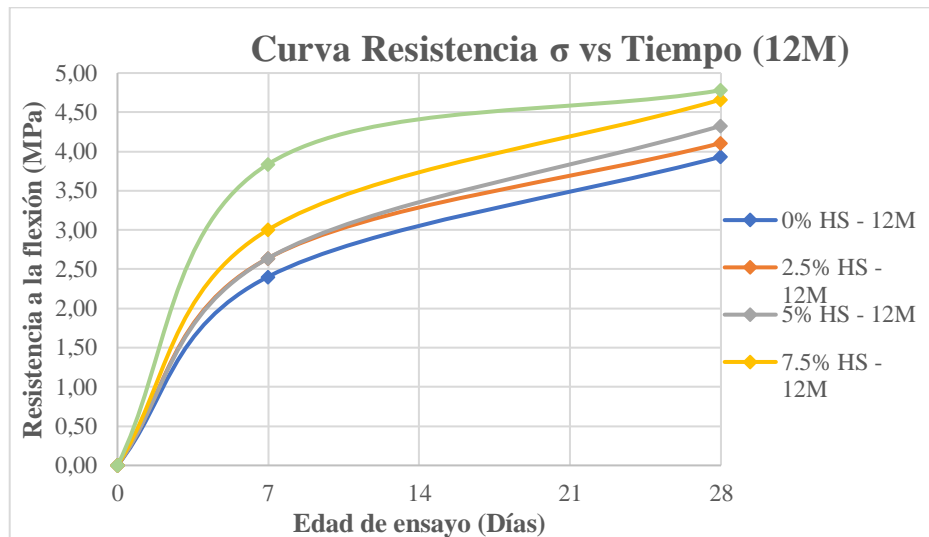
La figura 34 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la resistencia media a la flexión a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 4.78 MPa lo que representa un incremento de 17.78% si se compara las dosificaciones sin HS versus aquellas que tienen un 10% de HS en su mezcla, todo ello a una concentración de hidróxido de sodio de 12M.

La figura 36 representa la curva resistencia a flexión versus tiempo de los diferentes porcentajes de reemplazo a una concentración de 8M, en dicha grafica se pudo apreciar que en promedio la resistencia a los 7 días es un 59% de la resistencia a los 28 días.



**Figura 36.** Curvas de resistencias a la flexión a diferentes % de HS con 8M

La figura 37 representa la curva resistencia a flexión versus tiempo de los diferentes porcentajes de reemplazo a una concentración de 12M, en dicha grafica se pudo apreciar que en promedio la resistencia a los 7 días es un 67% de la resistencia a los 28 días.



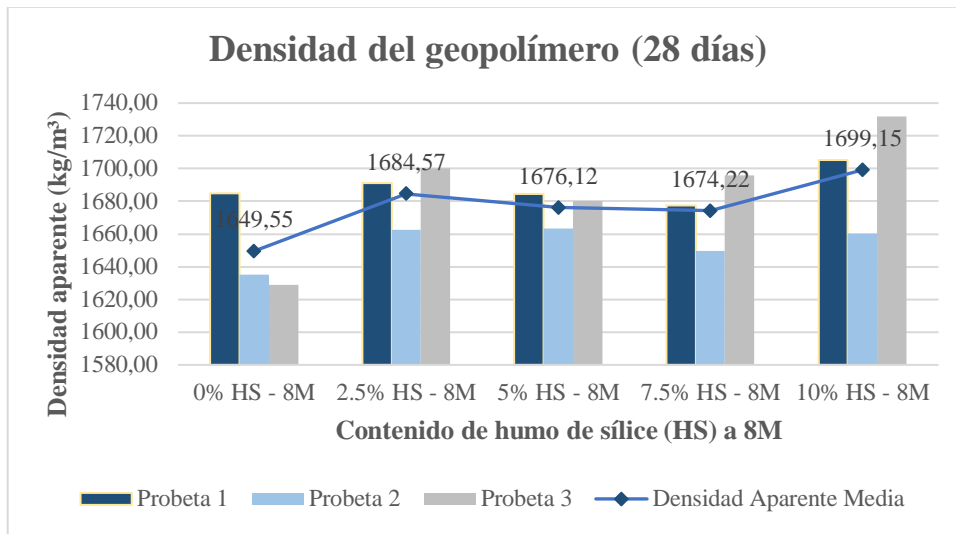
**Figura 37.** Curvas de resistencias a la flexión a diferentes % de HS con 12M

#### 4.3.3. Densidad del geopolímero

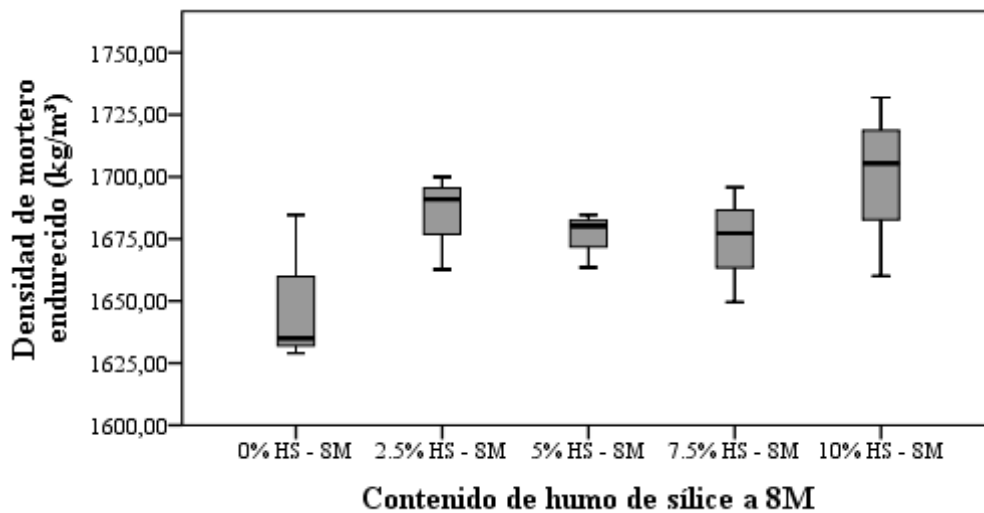
La densidad del geopolímero a los 28 días se determinó en base a la UNE - EN 1015-10 (2007), obteniendo los resultado de la tabla 13.

**Tabla 13.** Análisis estadístico de los resultados de la densidad geopolímero a los 28 días

<b>Código</b>	<b>Media</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Mediana</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Asimetría</b>
0% HS – 8M	1 649.554	1 573.635	1 725.473	1 634.994	934.005	30.562	1 629.000	1 684.670	55.680	1.657
	Error típ. 17.645									Error típ. 1.225
2.5% HS – 8M	1 684.573	1 636.253	1 732.894	1 690.998	378.370	19.452	1 662.720	1 700.000	37.280	-1.324
	Error típ. 11.230									Error típ. 1.225
5.0% HS – 8M	1 676.118	1 648.370	1 703.867	1 680.240	124.773	11.170	1 663.470	1 684.640	21.170	-1.434
	Error típ. 6.449									Error típ. 1.225
7.5% HS – 8M	1 674.219	1 616.372	1 732.065	1 677.305	542.257	23.286	1 649.540	1 695.810	46.270	-0.586
	Error típ. 13.444									Error típ. 1.225
10% HS – 8M	1 699.151	1 608.871	1 789.431	1 705.389	1 320.796	36.343	1 660.090	1 731.970	71.880	-0.750
	Error típ. 20.983									Error típ. 1.225
0% HS – 12M	1 644.458	1 565.326	1 723.590	1 660.996	1 014.739	31.855	1 607.740	1 664.640	56.910	-1.707
	Error típ. 18.391									Error típ. 1.225
2.5% HS – 12M	1 725.980	1 682.357	1 769.602	1 731.884	308.369	17.560	1 706.230	1 739.830	33.600	-1.342
	Error típ. 10.139									Error típ. 1.225
5.0% HS – 12M	1 702.526	1 686.693	1 718.359	1 701.124	40.624	6.374	1 696.970	1 709.480	12.510	0.942
	Error típ. 3.680									Error típ. 1.225
7.5% HS – 12M	1 681.192	1 636.561	1 725.824	1 681.871	322.799	17.967	1 662.900	1 698.810	35.910	-0.170
	Error típ. 10.373									Error típ. 1.225
10% HS – 12M	1 703.643	1 677.354	1 729.931	1 698.614	111.992	10.583	1 696.510	1 715.800	19.290	1.655
	Error típ. 6.110									Error típ. 1.225

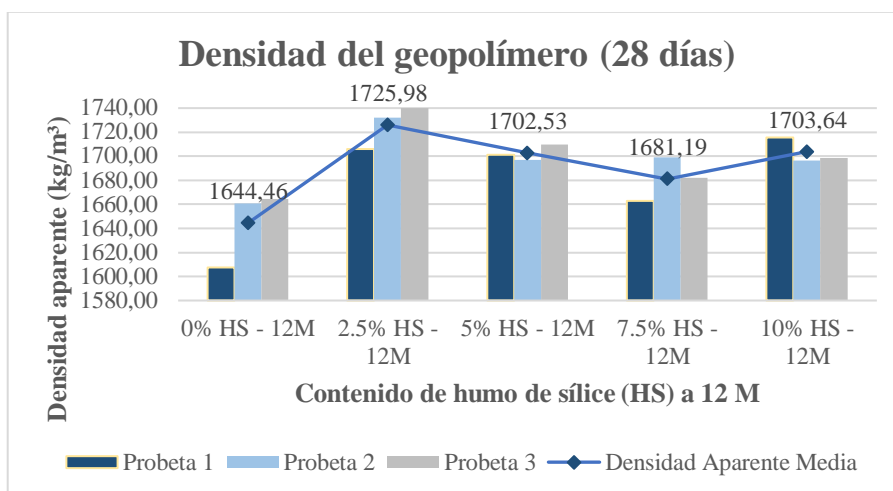


**Figura 38.** Densidad del geopolímero a la edad de 28 días con dosificaciones a 8M

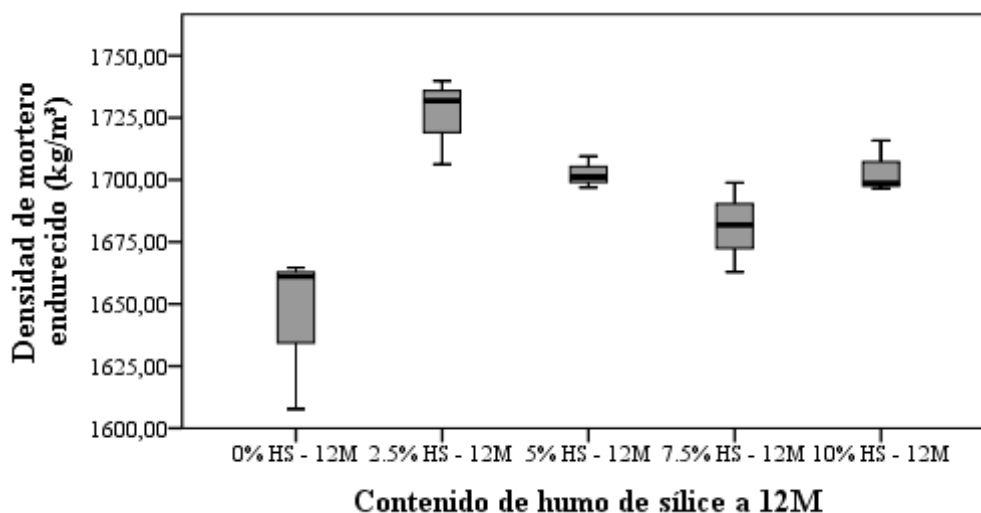


**Figura 39.** Diagrama de caja y bigotes de densidad del geopolímero a los 28 días con dosificaciones a 8M

La figura 38 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la densidad aparente media a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 1699.15 kg/m<sup>3</sup> con el 10% de reemplazo, sin embargo, dicho incremento no es directamente proporcional al porcentaje de HS reemplazado pues la densidad con el 5% y 7.5% son menores a la densidad con el 2.5%, esto para una concentración de hidróxido de sodio de 12M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 39) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, no obstante, las dosificaciones de 0%, 7.5% y 10% presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.



**Figura 40.** Densidad del geopolímero a la edad de 28 días con dosificaciones a 12M



**Figura 41.** Diagrama de caja y bigotes de densidad del geopolímero a los 28 días con dosificaciones a 12M

La figura 40 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó un incremento de la densidad aparente media a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor máximo de 1725.98 kg/m<sup>3</sup> con ese mismo valor, sin embargo, dicho incremento no es directamente proporcional al porcentaje de HS reemplazado pues la densidad con el 5%, 7.5% y 10% son menores a la densidad con el 2.5%, esto para una concentración de hidróxido de sodio de 12M.

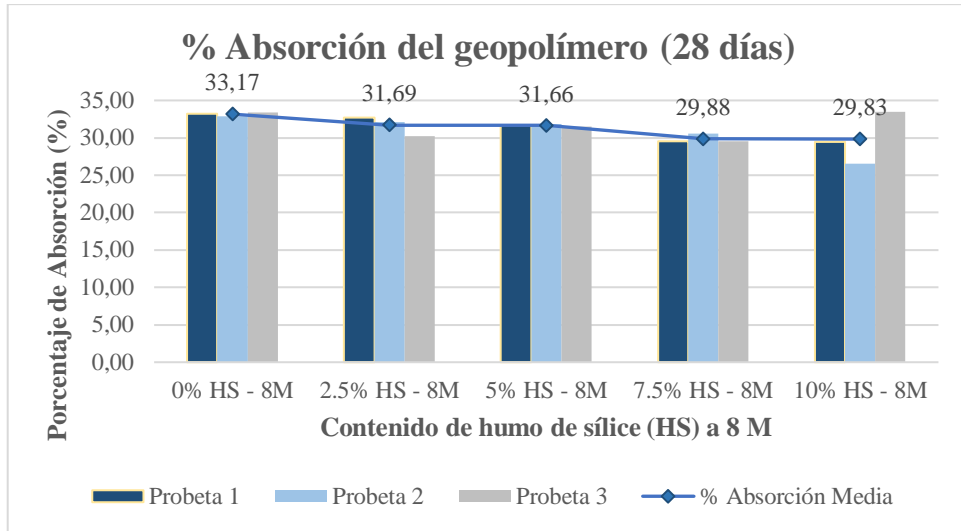
#### 4.3.4. Porcentaje de absorción

El porcentaje de absorción se obtuvo con los mismos datos obtenidos en ensayo de densidad.

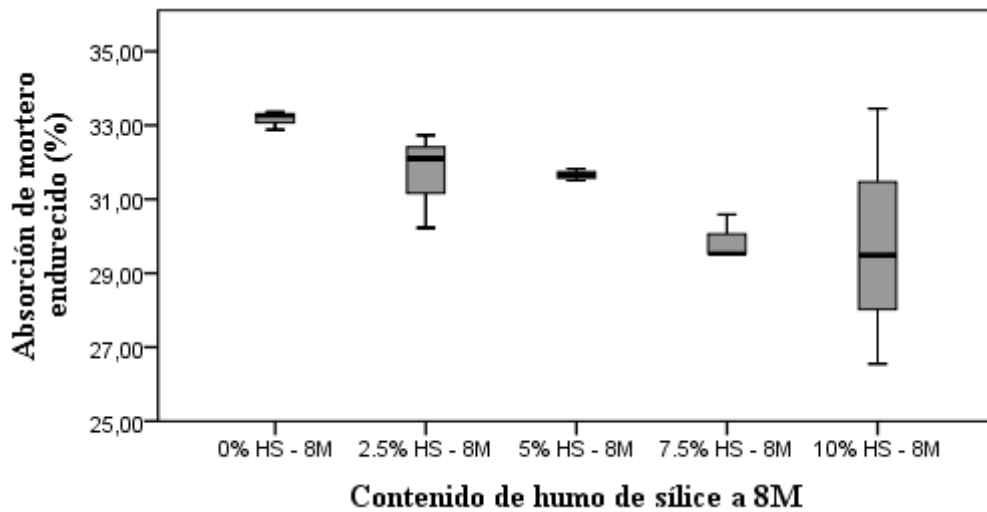


**Tabla 14.** Análisis estadístico de los resultados del porcentaje de absorción a los 28 días

<b>Código</b>	<b>Media</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>Mediana</b>	<b>Varianza</b>	<b>Desviación típica</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Asimetría</b>
0% HS – 8M	33,167	32,538	33,796	33,260	0,064	0,253	32,880	33,360	0,480	-1,433
	Error típ. 0.146									Error típ. 1.225
2.5% HS – 8M	31,687	28,457	34,917	32,100	1,691	1,300	30,230	32,730	2,500	-1,286
	Error típ. 0.751									Error típ. 1.225
5.0% HS – 8M	31,660	31,263	32,058	31,660	0,026	0,160	31,500	31,820	0,320	0,000
	Error típ. 0.092									Error típ. 1.225
7.5% HS – 8M	29,880	28,353	31,408	29,530	0,378	0,615	29,520	30,590	1,070	1,732
	Error típ. 0.355									Error típ. 1.225
10% HS – 8M	29,830	21,229	38,431	29,490	11,989	3,463	26,550	33,450	6,900	0,438
	Error típ. 1999									Error típ. 1.225
0% HS – 12M	31,333	29,820	32,847	31,530	0,371	0,609	30,650	31,820	1,170	-1,301
	Error típ. 0.352									Error típ. 1.225
2.5% HS – 12M	31,373	30,536	32,211	31,330	0,114	0,337	31,060	31,730	0,670	0,569
	Error típ. 0.195									Error típ. 1.225
5.0% HS – 12M	29,417	27,919	30,914	29,350	0,363	0,603	28,850	30,050	1,200	0,492
	Error típ. 0.348									Error típ. 1.225
7.5% HS – 12M	30,507	26,628	34,386	30,070	2,438	1,561	29,210	32,240	3,030	1,160
	Error típ. 0.901									Error típ. 1.225
10% HS – 12M	29,057	26,257	31,857	28,800	1,270	1,127	28,080	30,290	2,210	0,972
	Error típ. 0.651									Error típ. 1.225

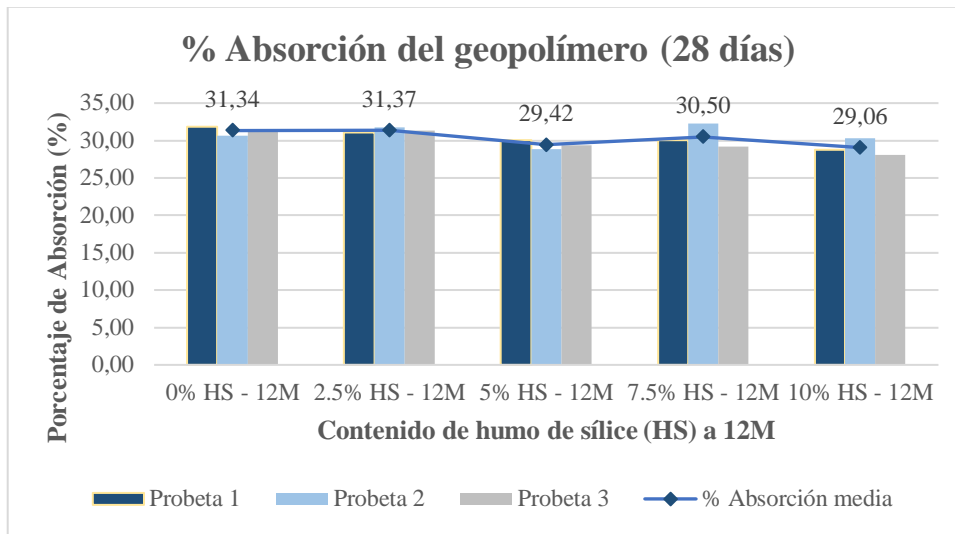


**Figura 42.** Porcentaje de absorción a la edad de 28 día del geopolímero con dosificaciones a 8M

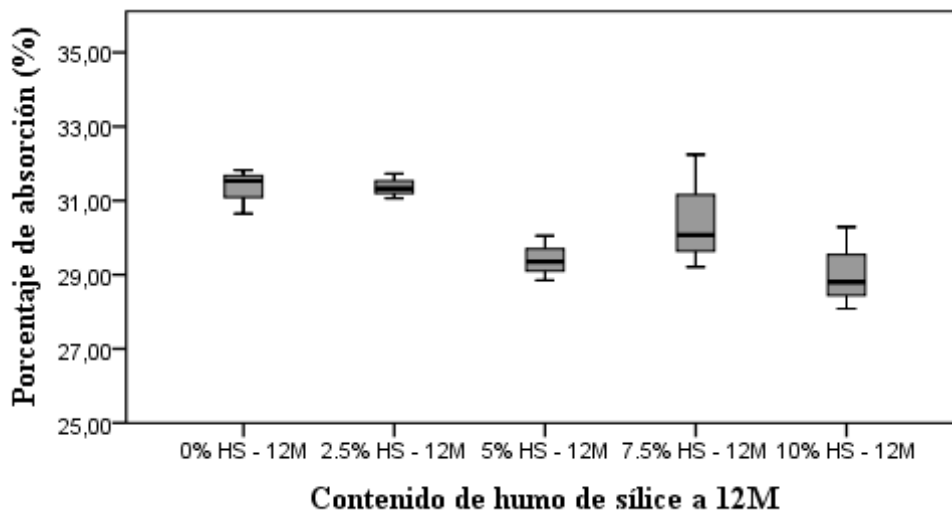


**Figura 43.** Diagrama de caja y bigotes de porcentaje de absorción a los 28 días con dosificaciones a 8M

La figura 42 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó una disminución del porcentaje de absorción media a partir del 2.5% de reemplazo de HS alcanzando un valor mínimo de 29.83% con el 10% de reemplazo, esto para una concentración de hidróxido de sodio de 8M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 43) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, no obstante, la dosificación 10% presentó una mayor dispersión en la distribución de datos.



**Figura 44.** Porcentaje de absorción a la edad de 28 día del geopolímero con dosificaciones a 12M



**Figura 45.** Diagrama de caja y bigotes de porcentaje de absorción a los 28 días con dosificaciones a 12M

La figura 44 indica que a los 28 días de edad el geopolímero presentó una disminución del porcentaje de absorción media a partir del 5% de reemplazo de HS alcanzando un valor mínimo de 29.06% con el 10% de reemplazo, esto para una concentración de hidróxido de sodio de 12M. Además, con el diagrama de caja y bigotes (figura 45) se pudo apreciar que no existen valores atípicos dentro del conjunto de datos recopilados, no obstante, las dosificaciones del 7.5% y 10% presentaron una mayor dispersión en la distribución de datos.

#### 4.4. Discusión de los resultados

De los resultados obtenidos en la caracterización física del material base, la densidad del polvo de PP es de 2084.23 kg/m<sup>3</sup> la cual es menor a la de otras investigaciones como por ejemplo la de Mobasheri et al. (2022) en donde se usa un polvo de PP con densidad de 2500 kg/m<sup>3</sup>, además si compara la curva granulométrica del material usado en la presente investigación se aprecia que solo el 24.78% del material para por el tamiz N°200 (0.075 mm) mientras en la investigación de Safari et al. (2020) el 57% del material usado pasa por el tamiz N°200, estos datos indican que el material usado en la presente investigación es más grueso y esto se puede atribuir al proceso de molienda y tamizado del material, cabe mencionar que de la finura del material base incide en la resistencia del geopolímero según lo mencionado por Mehta & Siddique (2016).

Por otro lado, en la caracterización química del material base realizada a partir del ensayo de Difracción de Rayos X (tabla 6) se puede verificar que el Silicio (Si) y Aluminio (Al) son el común denominador en la composición del polvo de PP de la cantera de Cotopaxi, lo que indica la presencia de aluminosilicatos que de acuerdo a Mobasheri et al. (2022), Occhipinti et al. (2020) y Haddad & Lababneh (2020) este material tiene el potencial para ser usado como precursor en elaboración de geopolímeros.

La resistencia a la compresión fue evaluada para dos molaridades una de 8M y otra de 12 M siendo esta última, la concentración que permite alcanzar una resistencia a la compresión de 14.10 MPa a un 10% de reemplazo de HS, estos resultados concuerdan con el estudio realizado por Safari et al. (2020) del cual concluye que la resistencia a la compresión está ligada a la concentración molar además reporta que una concentración de hidróxido de sodio de 12 M es la más óptima. Asimismo, se puede apreciar que la hipótesis planteada inicialmente se cumple pues la resistencia aumenta a medida que aumenta el porcentaje de HS reemplazado teniendo un aumento de 56.31% para la concentración de 8M y 47.59% para la de 12M, esto si comparamos la resistencia de las probetas testigos versus aquellas que tienen 10% de reemplazo de HS.

Para la resistencia a la flexión los mejores resultados se obtuvieron bajo las mismas condiciones que la resistencia a la compresión, siendo así que el máximo valor obtenido es de 4.78 MPa y que el aumento de resistencia entre las probetas testigos y aquellas que tienen

10% de reemplazo de HS es del 28.14% y 17.78% para las molaridades de 8M y 12M, respectivamente.

En cuanto a la caracterización física del geopolímero, se obtuvieron valores de densidad que oscilan en un rango de 1645 kg/m<sup>3</sup> a 1726 kg/m<sup>3</sup>, este material resulta ser 25% más ligero si se compara la densidad máxima obtenida con la de otros autores como la obtenida de 2200 kg//m<sup>3</sup> por Osorio (2021). Las densidades de las probetas con HS son mayores a las densidades obtenidas de las probetas testigos debido al efecto densificación otorgado por el HS, las variaciones de densidad en las probetas con HS observadas en las figuras 38 y 40 se atribuyen a errores constructivos durante la elaboración de las probetas. El geopolímero obtenido presenta un porcentaje de absorción promedio es del 30.79% es decir presenta una gran cantidad de poros y con la presencia de agua aumenta su peso.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- El polvo de PP usado en la elaboración del geopolímero presenta una composición química que favorece su uso como precursor dado que se compone en su gran mayoría por silicio y aluminio. Físicamente es un material amorfo y fino con un tamaño de partícula inferior a 0.6 mm y una densidad de 2084.23 kg/m<sup>3</sup>.
- En el diseño de la dosificación de un geopolímero existen varios factores que influyen en la resistencia como: la relación entre silicato de sodio e hidróxido de sodio, el contenido de agua, la temperatura y el tiempo de curado, la molaridad del hidróxido de sodio y la relación solución alcalina y aglutinante, siendo estos dos últimos los factores más importantes a considerar en cuanto a la factibilidad ambiental y económica debido a que el uso excesivo de solución alcalina es contraproducente al aporte en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> pues la producción de estos activadores demandan un considerable consumo de energía lo que a su vez representa altos costos de producción.
- Tras el análisis de los resultados mecánicos obtenidos del geopolímero se puede evidenciar que existe una relacional de proporcionalidad directa entre la resistencia mecánica y el aumento del porcentaje de HS reemplazado. Si se compara las probetas con el 10% de HS versus las probetas testigos, ambas a una molaridad de 12M, las resistencias a la compresión y flexión aumentan hasta un 47% y 16% respectivamente.
- Del geopolímero obtenido se puede concluir que no es apto para ser empleado como material estructural debido que la máxima resistencia a la compresión es de 14.10 MPa, sin embargo, esta resistencia se puede mejorar disminuyendo el tamaño de las partículas del polvo de PP a un diámetro inferior a 0.075 mm para así garantizar la disolución y reacción del sílice y aluminio dando cabida al proceso de geopolimerización de la totalidad del material.
- En cuanto a las propiedades físicas del geopolímero, la densidad de las probetas con HS es mayor a la de las probetas testigos dado que la finura y composición del HS cumple con la función de rellenar vacíos densificando así la mezcla, además de aportar a la formación del gel geopolimérico, este material resulta ser 25% más ligero

si se compara la densidad máxima obtenida con la de otros autores. También se reporta un elevado porcentaje de absorción causada por el agua libre que se almacena al interior de las probetas y que posteriormente se evapora durante el curado en horno generando una considerable cantidad de poros que provocan la disminución de la resistencia.

## **5.2.Recomendaciones**

- Realizar un proceso de molienda mecánica que garantice que al menos el 50% de las partículas pasen el tamiz N°200 (0.075 mm), pues el proceso de geopolimerización y las características mecánicas se ven influenciadas por el tamaño de partículas del material base, es decir, mientras más fino mayores resistencias se obtienen.
- Buscar medios alternativos para proporcionar trabajabilidad a la mezcla, estos pueden ser el uso de plastificantes o una combinación de plastificantes y agua, de tal forma que el contenido de agua libre en el interior de la probeta a evaporarse sea mínimo, con ello se controla la porosidad del material y la disminución de resistencias.
- Evaluar los tiempos y temperaturas de curado que se adapten a la elaboración geopolímeros con materiales alternativos del Ecuador.
- Investigar la factibilidad de empleo de nuevos materiales que sean fuente de aluminosilicatos como residuos industriales propios del país.
- La elaboración de este material geopolimérico demanda de estrictas condiciones de mezclado y curado, mismas que resultan ser complejas de controlar in situ es por ello que se figura como un potencial material para la elaboración de prefabricados en la industria de la construcción.

## BIBLIOGRAFÍA

- Agencia de Regulación y Control Minero. (2019). *Seguimiento, control y fiscalización de labores mineras a gran escala 2012 - 2021*.
- Andrade, A., Castillo, T., Paredes, M., Gimenez, E., & García, V. (2022). Geopolymer Designed with Pumice Stone from Ecuador. *Civil Engineering and Architecture*, 10(5), 1864–1880. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100513>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO2 emissions from cement production, 1928-2017. *Earth System Science Data*, 10(4), 2213–2239. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2213-2018>
- Asayesh, S., Shirzadi Javid, A. A., Ziari, H., & Mehri, B. (2021). Evaluating fresh state, hardened State, thermal expansion and bond properties of geopolymers for the repairing of concrete pavements under restrained conditions. *Construction and Building Materials*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123398>
- Calderón, J. (2019). *Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- CEMA, & Institut Cerdà. (2021). La aportación a la simbiosis industrial de la industria cementera. *Retema*. <https://www.retema.es/articulo/la-aportacion-a-la-simbiosis-industrial-de-la-industria-cementera-Fvt6a>
- Corrales, G. M. (2015). *Síntesis de Cementantes Hidráulicos Alternativos mediante la Geopolimerización de Escorias de Fundición de Concentrados de Pb-Zn*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Costa, F. N., & Ribeiro, D. V. (2020). Reduction in CO2 emissions during production of cement, with partial replacement of traditional raw materials by civil construction waste (CCW). *Journal of Cleaner Production*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123302>
- Das, S. K., Mustakim, S. M., Adesina, A., Mishra, J., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., & Kaze, C. R. (2020). Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash. *Journal of Building Engineering*, 32(September), 101780. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101780>
- García, I., Cristelo, N., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2020). Use of industrial by-products as alkaline cement activators. *Construction and Building Materials*, 253. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.119000>
- Giménez, A., Olavarrieta, M., Escalona, L., & Gallegos, H. (2018). Estudio físico mecánico



- de concretos sustituidos con polvo de sílice expuesto en ambiente agresivo simulado. *Gaceta Técnica*, 19, 37–50. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11020.62086>
- Haddad, R. H., & Lababneh, Z. K. (2020). Geopolymer composites using natural pozzolan and oil-shale ash base materials: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117899>
- Huey Li, O., Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bayuaji, R., Mustafa Al Bakri Abdullah, M., Kai Loong, F., Soo Jin, T., Hui Teng, N., Nabiałek, M., Je, B., & Yong Sing, N. (2021). *Evaluation of the Effect of Silica Fume on Amorphous Fly Ash Geopolymers Exposed to Elevated Temperature*. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7010009>
- IEA. (2021). Cement. In IEA. <https://www.iea.org/reports/cement>
- INEN 198. (1987). Resistencia a la flexión y compresión de morteros. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- INEN 488. (2009). Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de 50 mm de Arista. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 19.
- INEN 696. (2011). Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- INEN 856. (2010). Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- Khater, H. M. (2013). Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-12>
- Kockal, N. U., Beycan, O., & Gulmez, N. (2018). Effect of binder type and content on physical and mechanical properties of geopolymers. *Sādhanā*, 43(4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S12046-018-0806-1>
- Liew, Y. M., Heah, C. Y., Mohd Mustafa, A. B., & Kamarudin, H. (2016). Structure and properties of clay-based geopolymer cements: A review. *Progress in Materials Science*, 83, 595–629. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.08.002>
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Davis, S. J., Zheng, B., Wang, Y., Cui, D., Zhu, B., Dou, X., Ke, P., Sun, T., Guo, R., Zhong, H., Boucher, O., Bréon, F. M., Lu, C., Guo, R., Xue, J., Boucher, E., ... Chevallier, F. (2020). Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel and cement production. *Scientific Data*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00708-7>
- Livi, C. N., & Repette, W. L. (2017). Effect of NaOH concentration and curing regime on

- geopolymer. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(6), 1174–1181. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000600003>
- Mabroum, S., Moukannaa, S., El Machi, A., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2020.100014>
- Mehta, A., & Siddique, R. (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136>
- Mendes, B. C., Pedroti, L. G., Vieira, C. M. F., Carvalho, J. M. F., Ribeiro, J. C. L., Albuini-Oliveira, N. M., & Andrade, I. K. R. (2022). Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00847>
- Min, F. S., Yong, H. C., Ming, L. Y., Mustafa, M., Bakri, A., Razi, H., Low, F. W., Hui-teng, N., & Yong-sing, N. (2022). Effect of Silica Fume and Alumina Addition on the Mechanical and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Polska Akademia Nauk*, 67, 197–202. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.137489>
- Mobasheri, F., Shirzadi Javid, A. A., Mirvalad, S., Azizi, S., & Mowlaei, R. (2022). Durability and Mechanical Properties of Pumice-based Geopolymers: A Sustainable Material for Future. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 46(1), 223–235. <https://doi.org/10.1007/s40996-021-00651-6>
- Occhipinti, R., Stroschio, A., Finocchiaro, C., Fugazzotto, M., Leonelli, C., José Lo Faro, M., Megna, B., Barone, G., & Mazzoleni, P. (2020). Alkali activated materials using pumice from the Aeolian Islands (Sicily, Italy) and their potentiality for cultural heritage applications: Preliminary study. *Construction and Building Materials*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120391>
- OMM. (2021). *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*. <https://ig3is.wmo.int/>,
- Osorio, B. (2021). *Nuevos conglomerantes sostenibles de activación con residuos de tierra de diatomeas y cenizas de cáscara de almendra*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., & Tashima, M. M. (2022). Activadores alternativos para cementos de activación alcalina. *ALCONPAT*, 1, 16–31. <https://doi.org/10.4322/conpat2021.686>
- Pintos, S., Freire, L., Rodriguez, P., Guzmán, G., Fernández, J., Lago, J., & Trancón, C.

- (2020). Geopolímeros celulares: desarrollo de hormigones ligeros ecológicos sin cemento ( proyecto GEOCEL ). *Revista de La Asociación Española de Materiales Compuestos*, 4, 52–58.
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 114, pp. 40–48). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Rodgers, L. (2018, December 17). Climate change: The massive CO2 emitter you may not know about - BBC News. *BBC*. <https://www.bbc.com/news/science-environment-46455844>
- Romea, C. (2014). El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. In *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación* (pp. 1–18). OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/oms.199>
- Safari, Z., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mahmood, F., & Tapan, M. (2020). Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105055>
- Salehi, S., Khattak, M. J., Rizvi, H., Karbalaei, S. F., & Kiran, R. (2017). Sensitivity analysis of fly ash geopolymer cement slurries: Implications for oil and gas wells cementing applications. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 37, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.025>
- Segura-Sierpe, Y. P., Borrachero-Rosado, M. V., Monzó-Balbuena, J. M., & Payá-Bernabeu, J. (2016). Estudios preliminares sobre cemento hidratado para su reutilización en geopolímeros. *DYNA (Colombia)*, 83(196), 229–238. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.54189>
- Torres, R., Quiñonez, E., Tejada, C., García, Y., & Cabarcas, I. (2021). High-strength Concrete with Natural Aggregates, Silica Fume, and Polypropylene Macrofibers. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 27–40. <https://doi.org/10.18359/RCIN.4394>
- Ulus, H., Aruntas, H. Y., & Gencil, O. (2016). Investigation on characteristics of blended cements containing pumice. *Construction and Building Materials*, 118, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.030>
- UNE - EN 1015-10. (2007). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. *Normalización Española*.
- Vásquez, L. (2021, June 20). Situación actual de la síntesis y utilización de geopolímeros. *Gaceta Técnica*. <https://www.redalyc.org/journal/5703/570367986003/html/>

## ANEXOS



DIRECCIÓN ACADÉMICA  
VICERRECTORADO ACADÉMICO



Riobamba, 11 de abril de 2022

Dr.  
Juan Carlos Lara Romero  
**REPRESENTANTE TÉCNICO DE LA UNACH EN EL MINISTERIO DEL  
GOBIERNO**

Yo, **Jefferson Javier Castillo Cevallos**, portador de la cédula de identidad N° **2200156111**, estudiante de la **Carrera de Ingeniería Civil** de la Facultad de Ingeniería, solicito a usted de la manera más comedida gestione la compra de 1 kg de **hidróxido de sodio** el mismo que será usado en el proyecto de tesis "**Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor**" a cargo del tutor Mgs. Alexis Iván Andrade Valle.

Por la atención a la presente, anticipo mi agradecimiento.

Atentamente,

Jefferson Javier Castillo Cevallos  
C.I. 2200156111

Recibido  
11/04/2022  
JUAN LARA

# LARCO RIVERA HERWIN ROGER

LARCO RIVERA HERWIN ROGER  
MATRIZ: AV REAL AUDIENCIA N66 97 Y DE LOS EUCALIPTOS  
TELEFONOS: 3463699 - 3463695  
Correo Electronico : contabilidad@novacheim.com.ec  
OBLIGADO A LLEVAR CONTABILIDAD : SI  
Agente de Retención: Resolución No. NAC-DNCRASC20-00000001

RUC: **1201527379001**

FACTURA N°: **001201 - 000014215**

NUMERO DE AUTORIZACIÓN

1705202201120152737900120012010000142150000000111

FECHA: 17/05/2022

AMBIENTE: Produccion

EMISIÓN: Normal

CLAVE DE ACCESO



1705202201120152737900120012010000142150000000111  
1705202201120152737900120012010000142150000000111

RAZÓN SOCIAL/NOMBRES Y APELLIDOS: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

RUC/Ci: 0660001840001

FECHA DE EMISIÓN: 17/05/2022

FECHA DE VENCIMIENTO: 17/05/2022

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	P. UNITARIO	DESC.	PRECIO TOTAL
S3181	SODIO HIDROXIDO ACS LENTEJAS KG	1	25.71	0.00	25.71
LOGIS	SERVICIO DE LOGISTICA	1	7.00	0.00	7.00
LOGIS	SERVICIO DE LOGISTICA	1	5.50	0.00	5.50

#### INFORMACIÓN ADICIONAL

Vendedor: ANDREA PROAÑO

Dirección: KM 1 1/2 A GUANO AV. ANTONIO JOSE DE SUCRE

Telefono:

Forma Pago: OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO USD-42.80

Plazo: 0 DIAS

ORDEN DE COMPRA:





Subtotal 12% :	38.21
Subtotal 0% :	0.00
Descuento :	0.00
Subtotal :	38.21
Subtotal No Imp :	0.00
IVA 12% :	4.59
TOTAL :	42.80

NOTA: De acuerdo a la RTI Art. 50: Se debe enviar el Comprobante de Retención en un plazo no mayor a 5 días luego de recibida la Factura, caso contrario se cobrará el valor total de la misma.

Facturación	Despacho	FORMA DE PAGO: OTROS CON UTILIZACION DEL SISTEMA FINANCIERO	
Nombre:	Nombre: <u>JUAN LARA</u>		
Entregado por:	<u>[Firma]</u> FIRMA RECIBI CONFORME	<u>17/05/2022</u> FECHA	

Nota : Esta es una constancia impresa del original electrónico autorizado por el SRI  
Consulte su validez en [www.sri.gob.ec](http://www.sri.gob.ec)

Página: 001

	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL</b>		
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor.			
<b>Localización:</b> UNACH	<b>Fecha de ensayo:</b> 06/04/2022		
<b>Muestra N°:</b> -	<b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Mayte Mieles		
<b>Descripción:</b> Polvo de piedra pómez	<b>Aprobado por:</b> Técnico responsable		
<b>ENSAYO</b>	DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE FINOS (MÉTODO GRAVIMÉTRICO)	<b>NORMA</b>	NTE INEN 856
<b>DATOS DE LABORATORIO</b>			
Vol. Picnómetro	ml	1000	
Masa de la muestra seca al horno (A)	g	483.5	
Masa del picnómetro con agua (B)	g	1211	
Masa del picnómetro con muestra y agua (C)	g	1479.6	
Masa de la muestra SSS (S)	g	500	
Temperatura	°C	24	
<b>Densidad en condición seca al horno (SH)</b> $Densidad = \frac{997.5 A}{(B + S - C)}$ $Densidad = 2084.23 \text{ kg/m}^3$			
<b>Porcentaje de absorción de la muestra</b> $Absorción \% = \frac{(S - A)}{A} \cdot 100$ $Absorción = 3.41\%$			
Revisado por  Ing. Alexis Andrade <b>TUTOR DE TESIS</b>		Aprobado por  Ing. Cristina Polo <b>TÉCNICO RESPONSABLE</b>	

**Anexo 3.** Reporte del ensayo de densidad y absorción de finos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Proyecto: Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como precursor.  
Localización: UNACH Fecha de ensayo: 04/04/2022  
Muestra N°: - Elaborado por: Jefferson Castilla & Mayte Mielles  
Descripción: Polvo de piedra pómez Aprobado por: Técnica responsable

ENSAYO GRANULOMETRÍA Y MÓDULO DE FINURA EN FINOS NORMA NTE INEN 696

Muestra total: 500 gr

Tamiz		Peso retenido parcial	Peso retenido acumulado	% Retenido acumulado	% Que pasa
(pulg)	(mm)				
1 1/2"	37.5	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
3/8"	9.5	0	0	0	100
N°4	4.75	0	0	0	100
N°8	2.4	0	0	0	100
N°16	1.2	0	0	0	100
N°30	0.600	1.2	1.2	0.24	99.76
N°50	0.297	73.4	74.6	14.92	85.08
N°100	0.150	194.5	269.1	53.82	46.18
N°200	0.075	107	376.1	75.22	24.78
Bandeja		123.9	500	100	0

$$MF = \frac{\sum \% \text{ ret. acu.} (1\% + 3/4 + 3/8 + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100)}{100}$$

Módulo de finura 0.690



Revisado por:





Ing. Alexis Andrade  
TUTOR DE TESIS

Aprobado por:

Ing. Crisliana Polo  
TÉCNICO RESPONSABLE



Anexo 4. Reporte del ensayo de granulometría y módulo de finura en finos



	<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL</b>									
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílica como precursor.										
<b>Localización:</b> UNACH		<b>Fecha de ensayo:</b> Correspondiente a las edades de ensayo								
<b>Muestra N°:</b> -		<b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Nayra Mejías								
<b>Descripción:</b> Geopolímero		<b>Aprobado por:</b> Técnico responsable								
<b>ENSAYO</b>	Resistencia a la compresión en cubos de mortero	<b>NOE/MA</b>								
NTE INEN 198										
<b>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN</b>										
Código	N° Pruebas	Edad de ensayo (días)	Peso (g)	Ancho (mm)	Longo (mm)	Alto (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN) a compresión	Fc (MPa)	Fc medio (MPa)
8M	1	7	272.70	40.88	157.91	39.73	6455.34	8.30	5.23	5.43
	2	7	272.70	40.68	157.47	39.84	6405.86	9.10	5.61	
	3	7	274.30	40.76	158.53	39.15	6461.68	8.70	5.45	
12M	1	7	271.80	40.55	157.57	39.14	6309.46	7.90	4.98	5.40
	2	7	272.60	39.81	156.80	39.51	6242.21	9.00	5.72	
	3	7	272.80	40.23	157.55	39.59	6300.24	9.80	6.15	
2.5% HS - 8M	1	7	248.90	43.72	157.53	39.77	6886.42	8.20	4.72	5.20
	2	7	272.83	40.50	158.09	40.85	6465.88	10.50	6.16	
	3	7	247.50	39.77	158.09	40.48	6387.34	7.60	4.79	
2.5% HS - 12M	1	7	281.50	41.43	157.77	41.41	6536.41	9.60	5.60	5.78
	2	7	274.70	39.66	156.29	41.98	6198.45	9.60	5.77	
	3	7	280.00	40.40	157.22	41.37	6331.69	10.00	5.98	
5% HS - 8M	1	7	273.50	39.65	157.56	40.48	6247.25	11.80	7.35	6.03
	2	7	273.10	40.02	157.61	40.56	6307.55	8.80	5.24	
	3	7	278.70	41.20	155.59	40.69	6410.31	9.20	5.49	
5% HS - 12M	1	7	248.40	41.44	156.77	40.44	6496.55	12.10	7.18	6.40
	2	7	277.90	41.01	157.11	40.37	6443.68	12.60	7.61	
	3	7	286.30	43.11	155.30	40.71	6694.98	8.00	4.54	
7.5% HS - 8M	1	7	274.90	42.00	158.72	41.23	6666.24	10.20	5.88	6.21
	2	7	280.20	40.73	158.58	40.63	6499.69	10.40	6.29	
	3	7	280.10	41.58	157.10	40.88	6533.79	11.00	6.47	
7.5% HS - 12M	1	7	278.70	42.91	160.18	38.51	6679.32	12.20	7.31	6.48
	2	7	268.40	41.00	155.85	40.30	6389.85	11.40	7.02	
	3	7	268.30	39.00	157.93	40.04	6139.37	8.00	5.12	
10% HS - 8M	1	7	250.20	36.96	155.65	39.25	5752.62	13.20	9.10	8.01
	2	7	257.80	40.09	156.88	40.62	6281.20	12.90	7.92	
	3	7	283.10	42.09	157.07	38.74	6611.08	11.70	6.99	
10% HS - 12M	1	7	267.90	41.48	155.66	40.29	6447.65	12.30	7.34	8.00
	2	7	260.90	41.13	153.74	39.69	6323.53	13.20	8.09	
	3	7	278.10	40.62	154.75	40.29	6285.55	14.00	8.55	
Revisado por:  Ing. Alexis Andrade TERCER DE JEFE			Aprobado por:  Ing. Cristina Polo TÉCNICO RESPONSABLE							

Anexo 5. Reporte del ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 7 días







UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como precursor. <b>Localización:</b> UNACH <b>Muestra N°:</b> - <b>Descripción:</b> Geopolímero										
			<b>Fecha de ensayo:</b> Correspondiente a las edades de ensayo <b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Mayra Méles <b>Aprobado por:</b> Técnico responsable							
<b>ENSAYO</b>	Resistencia a la compresión en cubos de mortero				<b>NORMA</b>	NTE INEN 400				
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN										
Código	N° Probetas	Edad de ensayo (días)	Peso(g)	Ancho (mm)	Largo (mm)	Alto (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN) = compresión	Fc (MPa)	Fc media (MPa)
8M	1	28	132.40	46.54	50.44	50.92	2469.08	14.10	5.73	5.44
	2	28	134.30	50.49	51.42	48.42	2424.48	15.00	5.75	
	3	28	140.04	50.38	50.47	50.84	2552.78	13.40	5.45	
12M	1	28	146.00	53.03	50.63	50.15	2584.91	21.10	7.85	7.39
	2	28	138.09	50.56	50.32	49.90	2544.18	20.60	7.86	
	3	28	135.90	50.18	50.04	49.37	2311.01	16.20	6.45	
2.5% HS - 8M	1	28	140.80	50.56	50.82	51.35	2569.46	18.70	7.28	7.41
	2	28	140.60	50.24	51.72	51.12	2598.41	18.90	7.27	
	3	28	137.40	49.85	50.70	51.27	2527.40	19.40	7.48	
2.5% HS - 12M	1	28	135.30	52.16	50.61	50.47	2639.80	22.40	8.49	8.43
	2	28	139.35	48.90	50.15	51.67	2402.54	21.40	8.73	
	3	28	145.40	50.37	50.52	52.25	2544.69	20.70	8.13	
5% HS - 8M	1	28	143.40	52.22	51.02	50.84	2646.34	30.90	11.60	10.08
	2	28	143.00	51.05	51.35	50.62	2620.40	23.80	8.97	
	3	28	139.40	50.48	50.13	50.43	2530.56	24.50	9.68	
5% HS - 12M	1	28	144.50	49.98	50.72	50.72	2537.48	24.20	9.58	10.06
	2	28	147.90	51.05	50.47	52.27	2576.49	29.90	11.60	
	3	28	140.80	51.31	49.71	50.34	2570.86	29.20	11.40	
7.5% HS - 8M	1	28	144.60	50.93	50.72	50.72	2583.17	32.80	12.70	10.99
	2	28	141.50	50.05	50.78	51.55	2541.54	27.00	10.62	
	3	28	141.60	50.54	50.42	51.24	2548.29	24.40	9.65	
7.5% HS - 12M	1	28	144.10	50.88	51.30	50.77	2610.14	31.70	12.14	11.85
	2	28	141.70	51.04	50.25	50.82	2544.76	30.40	11.93	
	3	28	148.50	51.47	50.91	51.04	2617.79	30.00	11.46	
10% HS - 8M	1	28	144.90	50.92	50.68	51.06	2580.65	32.00	12.40	12.91
	2	28	143.00	49.71	51.31	50.28	2550.42	35.80	14.04	
	3	28	143.70	50.25	50.08	50.68	2591.55	31.00	12.29	
10% HS - 12M	1	28	147.80	50.31	51.26	50.31	2648.83	37.80	14.71	14.10
	2	28	143.10	49.55	50.07	50.70	2561.00	35.40	14.23	
	3	28	149.10	51.69	50.49	50.49	2620.17	35.00	13.34	
 Ing. Aljón Andrade <b>JEFEE DE TESIS</b>		 Ing. Cifredo Polo <b>TÉCNICO RESPONSABLE</b>								



Anexo 6. Reporte del ensayo de resistencia a la compresión a la edad de 28 días

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como precursor. <b>Localización:</b> UNACH <b>Muestra N°:</b> - <b>Descripción:</b> Geopolímero										
			<b>Fecha de ensayo:</b> Correspondiente a las edades de ensayo <b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Mayte Mielles <b>Aprobado por:</b> Técnico responsable							
<b>ENSAJO</b>	Resistencia a la flexión en cubos de mortero				<b>NORMA</b>	NTE INEN 198				
<b>RESISTENCIA A LA FLEXIÓN</b>										
Código	N° Probetas	Edad de ensayo (días)	Peso (g)	Ancho (mm)	Longo (mm)	Altera (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN) a flexión	Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia a Flexión media (MPa)
8M	1	7	272.70	40.88	157.91	39.73	6455.36	0.50	1.18	1.41
	2	7	272.70	40.88	157.47	39.84	6455.88	0.60	1.39	
	3	7	274.30	40.74	158.53	39.15	6441.68	0.70	1.68	
12M	1	7	271.80	40.55	157.57	39.14	6389.44	1.30	3.14	2.41
	2	7	272.60	39.81	156.80	39.51	6242.21	1.00	2.41	
	3	7	272.80	40.23	157.55	39.59	6338.24	0.70	1.67	
2.5% HS - 8M	1	7	266.55	43.72	157.53	39.77	6806.42	0.80	1.85	2.28
	2	7	272.80	40.90	158.28	40.83	6465.88	1.70	3.74	
	3	7	267.50	39.77	158.09	40.48	6287.24	0.50	1.15	
2.5% HS - 12M	1	7	281.50	41.43	157.77	41.41	6536.41	1.30	2.74	2.64
	2	7	274.70	39.44	156.29	41.98	6198.44	1.10	2.34	
	3	7	280.00	40.40	157.22	41.37	6351.49	1.30	2.82	
5% HS - 8M	1	7	273.50	39.65	157.36	40.48	6247.25	1.50	3.46	2.04
	2	7	273.10	40.02	157.61	40.54	6307.55	1.10	2.51	
	3	7	278.70	41.20	155.39	40.49	6410.31	0.90	1.10	
5% HS - 12M	1	7	268.40	41.44	156.77	40.44	6495.55	1.20	2.63	2.74
	2	7	277.90	41.01	157.11	40.37	6443.06	1.00	2.24	
	3	7	286.30	43.11	155.30	40.71	6674.99	1.60	3.58	
7.5% HS - 8M	1	7	274.90	42.00	158.72	41.33	6666.24	1.30	2.72	2.66
	2	7	280.20	40.72	159.58	40.42	6499.49	1.30	2.90	
	3	7	280.10	41.59	157.10	40.88	6533.79	1.10	2.37	
7.5% HS - 12M	1	7	278.70	42.91	160.18	38.91	6873.32	1.20	2.77	3.00
	2	7	268.40	41.00	155.85	40.20	6389.85	1.40	3.80	
	3	7	268.30	39.20	157.93	40.04	6159.37	1.10	2.64	
10% HS - 8M	1	7	250.20	34.94	155.65	29.25	5752.82	0.80	2.11	3.57
	2	7	257.50	40.28	156.68	40.62	6381.30	1.40	3.17	
	3	7	283.10	42.29	157.07	39.74	6411.68	2.40	5.42	
10% HS - 12M	1	7	257.90	41.48	155.44	40.29	6447.65	2.20	4.90	3.84
	2	7	280.90	41.53	153.74	39.49	6323.33	0.60	1.39	
	3	7	278.10	40.62	154.75	40.29	6285.93	2.30	5.23	
Revisado por:										
Ing. Alenit Ayllón			TUTOR DE TESIS							
Aprobado por:										
Ing. Fernanda Urra			TÉCNICO RESPONSABLE							

Anexo 7. Reporte del ensayo de resistencia a la flexión a la edad de 7 días

		<b>UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</b> <b>FACULTAD DE INGENIERÍA</b> <b>CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL</b>																	
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como precurador.																			
<b>Localización:</b> UNACH <b>Muestra N°:</b> <b>Descripción:</b> Geopolímero					<b>Fecha de ensayo:</b> Correspondiente a las edades de ensayo <b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Mayra Miles <b>Aprobado por:</b> Técnico responsable														
<b>ENSAYO</b> Resistencia a la flexión en cubos de mortero								<b>NORMA</b> NTE INBV 192											
<b>RESISTENCIA A LA FLEXIÓN</b>																			
Código	N° Probetas	Edad de ensayo (días)	Peso(g)	Ancho (mm)	Longo (mm)	Alto (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN) a flexión	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia a la flexión media (MPa)									
BM	1	28	274.00	41.09	158.73	40.30	6522.22	1.40	3.15	3.32									
	2	28	277.00	41.20	157.34	40.21	6495.00	1.70	3.86										
	3	28	274.10	41.09	158.40	39.85	6603.70	1.30	2.95										
12M	1	28	267.00	39.99	157.39	39.42	6292.45	1.90	4.59	3.93									
	2	28	278.70	41.20	157.97	39.50	6508.36	1.80	3.73										
	3	28	276.20	41.72	159.19	39.37	6599.69	1.30	3.46										
2.0% HS - BM	1	28	272.70	40.89	159.80	40.44	6403.15	1.70	3.81	3.80									
	2	28	279.90	40.38	159.10	41.22	6424.46	1.80	3.92										
	3	28	286.00	41.04	159.50	41.15	6545.88	1.70	3.67										
2.0% HS - 12M	1	28	284.00	41.15	155.73	39.98	6407.88	1.80	4.30	4.11									
	2	28	260.70	39.05	155.54	40.09	6073.84	1.80	4.30										
	3	28	274.70	41.54	155.09	39.59	6440.44	1.70	3.92										
5% HS - BM	1	28	273.90	40.87	155.70	40.22	6263.45	2.10	4.79	4.17									
	2	28	279.00	41.80	155.92	40.58	6517.46	1.70	3.70										
	3	28	283.90	41.27	156.82	41.30	6471.96	1.90	4.05										
5% HS - 12M	1	28	285.40	41.53	157.10	40.72	6522.79	2.00	4.92	4.30									
	2	28	273.20	40.99	158.32	39.77	6489.54	2.40	5.55										
	3	28	299.90	43.67	158.56	40.95	6836.99	2.00	4.51										
7.0% HS - BM	1	28	264.08	39.45	156.51	39.83	6174.32	2.00	5.27	4.55									
	2	28	264.50	40.92	155.79	40.00	6374.93	2.00	4.58										
	3	28	280.90	41.58	155.93	41.38	6483.57	1.80	3.79										
7.0% HS - 12M	1	28	268.10	42.07	159.78	39.43	6721.84	2.20	5.05	4.66									
	2	28	287.60	41.07	158.66	39.21	6516.17	2.00	4.75										
	3	28	274.40	41.70	155.48	39.30	6484.63	1.80	4.19										
10% HS - BM	1	28	284.30	41.44	157.09	39.80	6509.81	2.00	4.58	4.62									
	2	28	281.80	40.05	158.23	40.32	6537.11	2.20	5.09										
	3	28	289.00	40.48	157.48	40.76	6576.79	1.90	4.24										
10% HS - 12M	1	28	288.10	40.88	157.84	40.66	6432.50	2.10	4.66	4.78									
	2	28	280.30	40.29	158.00	40.36	6345.82	2.00	4.57										
	3	28	273.20	41.98	157.10	40.10	6596.32	2.30	5.11										
<b>Revisado por:</b>  <b>Ing. Alexis Andrades</b> <b>TUTOR DE TESIS</b>										<b>Aprobado por:</b>  <b>Ing. Fernanda Lema</b> <b>TÉCNICO RESPONSABLE</b>									

Anexo 8. Reporte del ensayo de resistencia a la flexión a la edad de 28 días

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO		FACULTAD DE INGENIERÍA		CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
<b>Proyecto:</b> Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como precursor. <b>Localización:</b> UNACH <b>Muestra N°:</b> <b>Descripción:</b> Geopolímero									
				<b>Fecha de ensayo:</b> correspondiente a las edades de ensayo <b>Elaborado por:</b> Jefferson Castillo & Mayra Mielles <b>Aprobado por:</b> Técnico responsable					
<b>ENSAYO</b>	Determinación de la densidad y porcentaje de absorción en morteros			<b>NORMA</b>	UNE - EN 1015-10				
DENSIDAD Y ABSORCIÓN									
Código	N° Probetas	Edad de ensayo (días)	Peso Seco (g)	Peso sumergido después de 48 horas	Peso sumergido/corriente (g)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad aparente media (kg/m <sup>3</sup> )	% Absorción	% Absorción media
8M	1	28	134.10	170.70	34.30	1604.07	1649.55	33.34	33.17
	2	28	141.10	167.50	34.80	1636.99		33.09	
	3	28	142.70	190.30	55.10	1629.00		33.34	
12M	1	28	143.30	191.80	33.00	1627.73	1644.46	31.82	31.34
	2	28	126.70	178.60	34.40	1661.00		32.45	
	3	28	137.00	180.30	34.70	1664.64		31.52	
3.2% HS - 8M	1	28	139.00	184.30	36.80	1691.00	1684.57	32.23	31.49
	2	28	140.30	185.40	36.00	1662.72		32.10	
	3	28	144.20	190.40	46.20	1700.00		30.23	
2.3% HS - 12M	1	28	145.20	190.30	45.10	1706.33	1725.96	31.04	31.37
	2	28	143.40	180.90	43.60	1731.88		31.73	
	3	28	141.10	185.30	49.00	1739.83		31.33	
5% HS - 8M	1	28	143.70	189.20	38.40	1684.64	1676.12	31.64	31.66
	2	28	138.90	183.10	35.40	1643.47		31.82	
	3	28	140.30	184.50	36.80	1680.24		31.80	
5% HS - 12M	1	28	151.40	194.90	42.40	1791.12	1702.53	30.05	29.40
	2	28	145.40	187.40	39.80	1694.97		28.85	
	3	28	142.40	184.50	39.10	1709.48		29.25	
7.5% HS - 8M	1	28	141.90	183.60	37.30	1677.30	1674.22	28.53	29.88
	2	28	146.30	188.70	34.90	1649.34		30.39	
	3	28	141.60	183.40	36.10	1695.81		29.52	
7.5% HS - 12M	1	28	147.00	191.30	38.60	1662.90	1681.19	30.07	30.50
	2	28	142.70	188.70	38.70	1698.81		32.24	
	3	28	143.80	185.30	36.30	1681.87		29.21	
10% HS - 8M	1	28	142.40	184.40	36.90	1705.39	1699.15	29.49	29.83
	2	28	143.10	181.10	34.90	1660.09		28.55	
	3	28	144.10	192.30	40.90	1731.97		33.45	
10% HS - 12M	1	28	145.80	187.40	40.70	1715.80	1703.84	28.80	29.06
	2	28	145.90	190.10	39.90	1696.51		30.29	
	3	28	147.10	196.40	46.50	1696.41		28.08	
Revisado por:						Aprobado por:			
Ing. Alexander Pineda		TUTOR DE TESIS				Ing. Cristian Polo		TÉCNICO RESPONSABLE	

Anexo 9. Reporte del ensayo de densidad y absorción del geopolímero a la edad de 28 días