

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Compuestos de Geopolímeros diseñados a base de zeolitas naturales

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera en Materiales

Presentado por:

Melina Nicole Jaramillo Ulloa

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a mis hijas Ema Yance y Keyleen Ávila, quienes son la mejor inspiración, mi mayor impulso para seguir adelante. No importa los obstáculos que se presenten si están a mi lado, juntas podremos todo. Son el amor más puro y sincero que jamás pensé Dios me diera para mi vida y estoy totalmente agradecida.

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios por guiarme siempre en sus pasos y poner a personas adecuadas para la ayuda en el desarrollo de toda la investigación, muy agradecida con mi tutor, Dr. Mauricio Cornejo, por sus enseñanzas constantes, al Dr. Clotario por la oportunidad de mejorar día a día y al laboratorio LEMAT, por la realización de ensayos. Asimismo, reconocer al MSc. Julio Cáceres y al MSc. Armando Adriano por la paciencia brindada en el desarrollo de mis actividades de laboratorio. Y con gran amor, mis hijas Ema y Keyleen por ser mi fuente de energía para culminar mi proyecto integrador.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Melina Nicole Jaramillo Ulloa y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Melina Nicole Jaramillo Ulloa

EVALUADORES

Dr. Clotario Tapia

PROFESOR DE LA MATERIA

Dr. Mauricio Cornejo

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Los compuestos de geopolímeros diseñados a partir de zeolitas naturales son materiales innovadores para la construcción. Añadiendo fibras poliméricas al geopolímero se prevé obtener una mezcla con buena ductilidad. El objetivo del presente proyecto es diseñar un compuesto de geopolímeros a base de zeolita natural que presente una ductilidad mayor o igual a la argamasa tradicional como son los cementos en un tiempo de curado entre 7 a 14 días. La fibra de acetato de polivinilo en una matriz de geopolímeros de zeolita genera mayor resistencia mecánica con referencia a los esfuerzos aplicados de compresión, tensión y flexión. La metodología aplicada con base a un estudio científico experimental mantiene un enfoque cuantitativo. Los resultados en pruebas de tensión indican que la deformación promedio máxima es de 1,1 %, valor que puede soportar las muestras antes de sufrir una deformación plástica hasta su ruptura. El esfuerzo máximo de flexión obtenido es de 1,2 MPa, lo que limita al compuesto desarrollado a usos no estructurales. Además, el compuesto de geopolímero diseñado presenta una resistencia a la compresión 5,4 MPa. Como conclusión se obtuvo que el compuesto de geopolímeros diseñado a base de zeolita natural es un material endeble. Sin embargo, es adecuado su uso en construcción no-estructural, donde el esfuerzo aplicado es prioritariamente de compresión; ya que si se le aplica esfuerzos de tensión fallará fácilmente.

Palabras claves: Geopolímeros, Construcción, Ductilidad, Resistencia, Acetato de Polivinilo, Flexión, Deformación.

ABSTRACT

Engineered Geopolymer Composites produced from natural zeolites are innovative construction materials. By adding polymer fibers to the geopolymer, it is expected to obtain a mixture with good ductility. The objective of this project is to design a geopolymer composite based on natural zeolite that has a ductility greater than or equal to traditional mortar such as cements in a curing time between 7 to 14 days. . Polyvinyl acetate fiber in a zeolite geopolymer matrix generates greater mechanical strength when exposed to the applied compression, tensile and flexural stresses. The applied methodology based on an experimental scientific study maintains a quantitative approach. Stress test results indicate a maximum average strain of 1.1%, which samples can withstand before undergoing plastic deformation until they break. The maximum bending stress obtained is 1.2 MPa, which limits the developed compound to non-structural uses. In addition, the engineered geopolymer composite features a compressive strength of 5.4 MPa. In conclusion, a relatively weak geopolymer composite based on natural zeolite was obtained. However, it is suitable for non-structural applications, where the applied stress is primarily compressive; given that it can fail under tensile stress.

Keywords: *Geopolymers, Construction, Ductility, Strength, Polyvinyl acetate, Bending, Deformation.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
ÍNDICE GENERAL	8
ABREVIATURAS	11
SIMBOLOGÍA.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS	14
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	15
CAPÍTULO 1.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Definición del Problema	17
1.2 Justificación del proyecto	17
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo General.....	19
1.3.2 Objetivos Específicos.....	19
1.4 Marco teórico	19
1.4.1 Fibra de PVA (Acetato de polivinilo).....	19
1.4.2 Activadores alcalinos en morteros y propiedades	20
1.5 Zeolitas naturales	21
1.6 Geopolímeros.....	22
1.6.1 Clases de Geopolímeros	24
1.7 Compuesto de geopolímeros diseñados (EGC)	25
1.7.1 Avances relevantes en el campo de EGC.....	25
CAPÍTULO 2.....	27
2. Metodología.....	27

2.1	Introducción.....	27
2.2	Diseño experimental.....	27
2.3	Diseño de estudio experimental	28
2.4	Equipos, materiales y reactivos	31
2.4.1	Equipos.....	31
2.4.2	Reactivos.....	36
2.5	Procedimiento experimental	37
2.6	Normativas aplicadas en uso experimental	42
2.6.1	Diseño Experimental primera etapa	43
2.6.2	Diseño Experimental segunda etapa	45
2.7	Preparación de muestras por etapas.....	46
2.7.1	Preparación de probeta en forma de cubo para primera etapa	46
2.7.2	Preparación muestra en molde de vigueta para segunda etapa	47
2.7.3	Preparación de probeta en forma de lazo para segunda etapa.....	48
2.8	Limitaciones del experimento	49
CAPÍTULO 3.....		50
3.	Resultados Y ANÁLISIS	50
3.1	Análisis de costo de ensayo	50
3.2	Resultados de ensayos de fluidez y compresión para la primera etapa	51
3.2.1	Análisis FTIR para muestras de primera etapa	55
3.2.2	Análisis de TGA	57
3.2.3	Análisis de XRD para Primera etapa.....	59
3.3	Ensayo de flexión	61
3.4	Ensayo de Tensión.....	64
CAPÍTULO 4.....		67
4.	Conclusiones Y Recomendaciones	67
4.1	Conclusiones.....	67

4.2 Recomendaciones.....	68
BIBLIOGRAFÍA	69
APÉNDICES	78

ABREVIATURAS

ASTM	Asociación americana para pruebas y materiales (por sus siglas en inglés: American Society for Testing and Materials)
CaCO ₃	Carbonato de calcio
C-O-C	Fórmula química del éter
EGC	Compuesto de Geopolímeros Diseñados (por sus siglas en inglés: Engineered Geopolymer Composite)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (por sus siglas en inglés: Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
G2	Mezcla óptima de resultado de la etapa 1 de la investigación
H-O-H	Fórmula química del agua, que está compuesta por dos átomos de hidrógeno (H) y un átomo de oxígeno (O) unidos mediante enlaces covalentes
INEN	Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización
K ₂ CO ₃	Carbonato de potasio
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales
Na ₂ CO ₃	Carbonato de sodio
Na ₂ SiO ₃	Silicato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
PVA	Polivinilo de acetato (por sus siglas en inglés: PolyVinyl Acetate)
Si-O-Al	Enlace químico covalente que une átomos de silicio (Si), átomos de oxígeno (O) y átomos de aluminio (Al) en una cadena lineal
Si-O-Si	Enlace químico covalente que une átomos de silicio (Si) y átomos de oxígeno (O) en una cadena lineal
TGA	Análisis termogravimétrico (por sus siglas en inglés: Thermal Gravimetric Analysis)
XRD	Difracción de rayos X (por sus siglas en inglés: X-Ray Diffraction)
CO ₂	Dióxido de Carbono

SIMBOLOGÍA

%	Porcentaje
°C	Grados Centígrados
cm	Centímetros
cm ²	Centímetros cuadrados
g	Gramos
hr	Horas
kg	Kilogramos
kg	Kilogramos
kgf	Kilogramos fuerzas
l	Litros
M	Molares
m	Metros
m ³	Metros cúbicos
mg	Miligramos
min	Minutos
ml	Mililitros
mm	Milímetros
MPa	Megapascuales
N	Newtons
Pa	Pascal
RPM	Revoluciones por minuto
U	Transmitancia
kN	Kilonewtons
R_c	Resistencia a la compresión
R_f	Resistencia a la flexión
R_t	Resistencia a tensión
P	Fuerza aplicada
L	Distancia entre soportes o puntos de apoyo
b	Aristas del área de la muestra donde se aplica la fuerza
e	Deformación o alargamiento máximo de la muestra ECC
pH	Potencial de Hidrógeno

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Grietas en edificios debido a eventos sísmicos	18
Figura 1.2. Fibra de PVA.....	19
Figura 1.3. Visualización química entre la activación alcalina por hidróxido de sodio en aluminosilicatos formando geopolímeros.....	20
Figura 1.4. Zeolita natural en polvo	21
Figura 1.5. Muestras de material de geopolímero inorgánico	22
Figura 1.6. Producción de geopolímeros (Material aluminosilicatos + solución alcalina = Geopolímero)	23
Figura 1.7. Geopolímeros inorgánicos.....	24
Figura 2.1. Representación gráfica en Pareto de acuerdo con el análisis de ANOVA en R	29
Figura 2.2. Esquema de la muestra en forma de vigueta, para ensayo de flexión.	33
Figura 2.3. Esquema de la muestra en forma de lazo, para ensayo de tensión.....	33
Figura 2.4. Esquema de la muestra en forma de cubo, para ensayo de compresión....	33
Figura 2.5. Materiales y reactivos.....	36
Figura 2.6. Descripción de funciones en ensayo FTIR, XRD y TGA.....	38
Figura 2.7. Metodología del proyecto	40
Figura 2.8. Distribución experimental del proyecto	41
Figura 2.9. Materiales (sólidos y líquido) e insumos	46
Figura 2.10. Molde de madera en forma de cubo	47
Figura 2.11. Molde de madera en forma de vigueta	48
Figura 2.12. Molde de madera en forma de lazo	48
Figura 3.1. Ensayo de compresión para la primera etapa	52
Figura 3.2. Análisis FTIR de las muestras seleccionadas.....	56
Figura 3.3. Resultado TGA primera etapa.....	59
Figura 3.4. Resultado de ensayo XRD primera etapa	60
Figura 3.5. Ensayo de Flexión de tres puntos (mezcla + fibra)	61
Figura 3.6. Ensayo de Tensión (mezcla + fibra)	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Los factores de diseño “k” a evaluar	28
Tabla 2.2. Generadores y resultantes para primera etapa.....	30
Tabla 2.3. Diseño experimental de la segunda etapa	31
Tabla 2.4. Cantidades en gramos y mililitros de cada material para la primera etapa ..	44
Tabla 2.5. Variables de experimentación de la segunda etapa.....	45
Tabla 3.1. Cantidades y Costos de materiales usados en el estudio.	51
Tabla 3.2. Resultados de ensayos de fluidez y compresión para la primera etapa	53
Tabla 3.3. Comparación de la resistencia a la compresión con otros materiales	54
Tabla 3.4. Resultados FTIR de mezclas primera etapa	57
Tabla 3.5. Resultados TGA de mezclas Primera etapa	58
Tabla 3.6. Resultados XRD de mezclas primera etapa	59
Tabla 3.7. Proporciones de las mezclas en la Segunda etapa (Fibra + Matriz)	62
Tabla 3.8. Resultados de trabajabilidad y de resistencia a la flexión para la segunda etapa con molde forma vigueta a 14 días de curado.....	62
Tabla 3.9. Resultados de trabajabilidad para la segunda etapa con molde forma lazo a 14 días de curado.	65

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de resistencia a la compresión	52
Ecuación 2. Cálculo de resistencia a la flexión	63
Ecuación 3. Cálculo de resistencia a la tensión	65
Ecuación 4. Deformación o alargamiento máximo	65

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es conocido que las actividades de producción de cemento generan daño al medio ambiente. Estas actividades dan como resultado emisiones de CO₂, desechos y efluentes contaminantes. A causa del fuerte impacto ambiental, la industria del cemento se encuentra en busca de nuevas alternativas "verdes" para ayudar en la disminución de su huella ecológica. Una de las alternativas propuestas es la implementación de los EGC (Geopolímeros de Compuestos Diseñados), por ser un material inorgánico presentan altos niveles de encapsulación en contaminantes [1].

Son diversos los motivos para el interés en el desarrollo de EGC en la industria de la construcción. Por un lado, las propiedades mecánicas de estos geopolímeros son muy atractivas, como es su resistencia a la compresión. Además, los EGC poseen mayor capacidad de soportar ambientes químicos y térmicos [2], a diferencia del cemento tradicional, el cual es propenso al agrietamiento extenso y al deterioro, reduciendo su vida útil.

Un geopolímero es un polímero inorgánico compuesto de alúmina y silicio conocido como aluminosilicatos. La adición de una solución alcalina hace activar los compuestos aluminosilicatos a temperatura de entre 60°C a 80°C. Los activadores alcalinos también influyen en la formación de enlaces de tipo Si-O-Al, que contribuyen a la estabilidad y durabilidad de los geopolímeros [3]. Además, la selección adecuada de los activadores alcalinos puede influir en la densidad, resistencia y otras propiedades de los geopolímeros resultantes, lo que los hace útiles para una amplia gama de aplicaciones. Las industrias de construcción han implementado con el tiempo la adición de nuevas fibras a las mezclas de geopolímeros. Para obtener mejores resultados en resistencia mecánica desarrollando un EGC. Las fibras poliméricas puede ser un aditivo efectivo para mejorar significativamente su resistencia a la fisuración y capacidad de carga a la flexión [4].

Las fibras que se utilizan para reforzar la matriz del geopolímero pueden ser de diferentes tipos como el vidrio, el carbono o fibras naturales como el cáñamo o el sisal. Estas fibras están incrustadas en la matriz del geopolímero, lo que brinda mayor resistencia y rigidez al material y lo hace más resistente al agrietamiento y la rotura [5].

“Los geopolímeros son propensos bajo tensión a agrietarse lo que perjudica la durabilidad de este, para el control del agrietamiento hay que mejorar el geopolímero con fibras sintéticas o naturales para alcanzar un alto rendimiento”, señala Yi Wang en el año 2022 [6]. Los geopolímeros reforzados con fibras son un tipo de material compuesto que combina las propiedades de los geopolímeros y las fibras.

1.1 Definición del Problema

Los geopolímeros son la siguiente generación de materiales de construcción. Son desarrollados a partir de una fuente de sílice y alúmina, misma que reacciona con soluciones alcalinas para formar compuestos con capacidad de carga. Debido a su constitución química son diferentes a los cementos convencionales y más parecidos a las rocas comunes. Mostrando una gran resistencia a los mecanismos de degradación que comúnmente afectan a los materiales de construcción. Además, no usan cemento Portland, por lo que contribuyen a disminuir la emisión de CO₂ reduciendo el efecto invernadero.

Se busca diseñar un material de construcción para uso de albañilería, con producto local como es la zeolita natural, la cual es abundante en Ecuador ubicada en cordillera Colon-Colonche. Se le añadirá fibras de polivinilo de acetato para formar un compuesto de geopolímeros diseñados, reforzando propiedades como es la capacidad de soportar deformación plástica. Las fibras poliméricas se utilizan comúnmente como aditivos para mejorar las propiedades de los materiales cementicios, mejorar la resistencia a la tracción, y la durabilidad de soportar cargas generadas por eventos sísmicos. Es decir, diseñar un geopolímero con buenas características dúctiles.

1.2 Justificación del proyecto

Nuestro país está ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico presentando riesgo elevado de eventos sísmicos, como ejemplo se tiene el terremoto de 8.5 en la escala de Richter del 2016 en Pedernales. Este evento demostró el bajo control de las técnicas de construcción y la poca resiliencia que tienen los materiales de construcción locales, dando como resultado un alto costo económico en reparaciones y, sobre todo, muchas pérdidas de vidas humanas. El poco control de las técnicas de construcción se pudo evidenciar que en los materiales fueron de baja calidad con baja capacidad de resistir cargas sísmicas u otras fallas estructurales [7].

Un material de construcción diseñado para presentar una buena ductilidad y tenacidad como lo son los EGC (Compuestos Geopolímeros Diseñados) al añadir fibras de PVA

(Acetato de polivinilo), ayuda a la creación de estructuras civiles más seguras y durables. Este tipo de geopolímeros es uno de los primeros en su clase en el país, explorando la posibilidad de diseñar materiales de construcción con fines estructurales que tengan una ductilidad superior a la 5% usando materia prima local.



Figura 1.1. Grietas en edificios debido a eventos sísmicos

Fuente: [8]

En la Figura 1.1, se evidencia las grietas en una estructura a causa del sismo en Pedernales-Ecuador, estos inmuebles al estar contruidos con mampostería no reforzada presenta debilidad en su estructura. El bajo resultado de ductilidad pone en evidencia la deficiencia de los materiales de construcción como: agente cementante de mala calidad, diafragma de pisos, entre otros.

Las grietas que se producen en los diversos edificios por el excesivo esfuerzo de flexión normalmente se forman en: paredes, pilares y columnas de una vivienda. Las propagaciones de las grietas se presentan en el interior de una estructura; es decir, en el Ecuador existe una práctica en la construcción deficiente, lo cual está relacionado con estructuras no reforzadas [9].

Las zeolitas naturales se encuentran en la cordillera Colon- Colonche en la provincia del Guayas-Ecuador. Material presente de manera local, permitiendo disminuir costos en obtención de materia prima extranjera. Presenta características como: cristales con alta permeabilidad, presencia de una red tridimensional con forma de tetraedro con aluminio y silicio, partículas micronizadas para una mejor adherencia con la fibra polimérica u otros materiales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un compuesto de geopolímeros a base de zeolitas naturales que presente una ductilidad mayor a 5% durante 28 días de curados a nivel de laboratorio.

1.3.2 Objetivos Específicos

Describir la matriz de geopolímeros cuando presenta una mayor resistencia a la compresión a los 7 días de curado.

Optimizar el compuesto de geopolímero que presente la mayor ductilidad a los 14 días de curado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Fibra de PVA (Acetato de polivinilo)



Figura 1.2. Fibra de PVA

Fuente: Elaboración propia

El acetato de polivinilo (PVA) es un polímero biodegradable, no tóxico y termo endurecible que se obtiene polimerizando ácido acético y alcohol vinílico. Es un polímero blando y cristalino con un punto de fusión de aproximadamente 82°C y un punto de inflamación de aproximadamente 380°C. El PVA se utiliza ampliamente en diversas aplicaciones, como adhesivos para pegar distintos materiales como papel, cartón, madera y metales, textiles para fabricar tejidos e hilos con propiedades elásticas y resistentes al agua, y productos químicos para producir resinas y plásticos. El PVA es un polímero no tóxico y seguro para el medio ambiente, resistente a la humedad, al agua

y con buena resistencia a la tracción. Sin embargo, tiene una resistencia limitada a la intemperie y a la luz ultravioleta [10].

1.4.2 Activadores alcalinos en morteros y propiedades

Los activadores alcalinos son compuestos químicos utilizados en la fabricación de morteros y hormigones para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas. El hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH) son los activadores alcalinos más comunes. La adición de activadores alcalinos en morteros y hormigones tiene varias ventajas, como mejorar su resistencia mecánica y durabilidad, reducir el tiempo de fraguado y aumentar su resistencia a la intemperie. Sin embargo, el uso excesivo de activadores alcalinos puede tener efectos negativos, como el aumento de la dilatación térmica y la reducción de la resistencia al ataque de los sulfatos. [11].

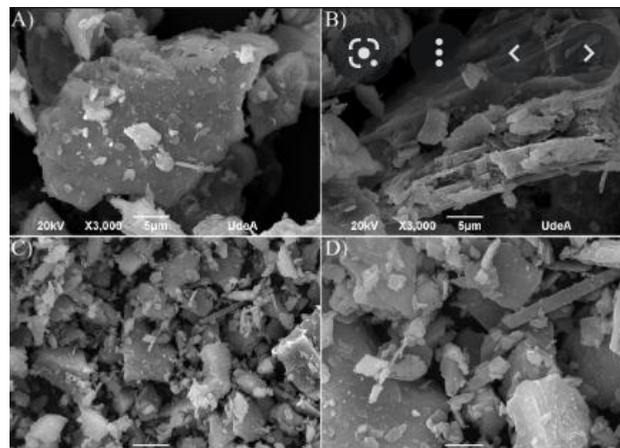


Figura 1.3. Visualización química entre la activación alcalina por hidróxido de sodio en aluminosilicatos formando geopolímeros

Fuente: [12]

En el proceso de elaboración de geopolímeros el activador alcalino es uno de los ingredientes esenciales para la producción y curado de los mismos. La activación alcalina es un proceso utilizado en la fabricación de instrumentos y materiales de la construcción. La activación alcalina es un término general que se aplica a la reacción de los aluminosilicatos sólidos (conocidos como precursores) generalmente está en estado alcalino (hechos por un activador alcalino). En la Figura 1.3, la activación alcalina permite la formación de una red polimérica sólida en el geopolímero, lo que le confiere propiedades mecánicas y químicas superiores en comparación con otros materiales

tradicionales, como el cemento Portland. Los activadores alcalinos juegan un papel importante en geopolimerización, como es el hidróxido de sodio [13].

1.5 Zeolitas naturales

Las zeolitas son un grupo de minerales de aluminosilicatos microporosos naturales o sintéticos con una amplia gama de aplicaciones, que incluyen catalizadores, adsorbentes y materiales de construcción. Se caracterizan por sus estructuras cristalinas únicas, que consisten en una red tridimensional de átomos de aluminio y silicio coordinados tetraédricamente, con los poros y canales que forman los tetraedros.



Figura 1.4. Zeolita natural en polvo

Fuente: Elaboración propia

Las zeolitas naturales se pueden utilizar como materia prima para la producción de geopolímeros en aplicaciones a la industria de la construcción. La adición de zeolitas naturales en la mezcla de concreto puede mejorar sus propiedades físicas y mecánicas en la mezcla cementante, siendo así que Murillo Alarcón en el 2017, reporta la mejora de la resistencia a la compresión, la durabilidad y la impermeabilidad del concreto, en su investigación de “Síntesis y caracterización de la cinética de la reacción, propiedades de resistencia mecánica y conductividad térmica de un geopolímero formado por activación alcalina de zeolita natural ecuatoriana como un material aislante térmico” [14]. Sin embargo, se necesita más investigación para comprender y controlar mejor las propiedades de los geopolímeros naturales a base de zeolita naturales [15].

1.6 Geopolímeros

Los geopolímeros son un tipo de polímero inorgánico hecho de minerales de aluminosilicato y una fuente de alcalinidad, como un hidróxido o silicato de metal alcalino. Se forman a través de un proceso llamado geopolimerización, que implica la polimerización de materiales inorgánicos. Según Davidovits en el año 1991, "Los geopolímeros son una nueva clase de materiales poliméricos inorgánicos, que imitan algunas propiedades de la cerámica tradicional y algunas de los polímeros termoendurecibles tradicionales" [16].



Figura 1.5. Muestras de material de geopolímero inorgánico

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 1.5, podemos observar muestras en forma de viga de geopolímeros inorgánicos, como alternativa en materiales de construcción debido a sus buenas propiedades. Los geopolímeros inorgánicos son una alternativa sostenible a los materiales de construcción convencionales debido a su bajo consumo de energía, baja emisión de dióxido de carbono y alta durabilidad. Además, también se pueden utilizar para la inmovilización de residuos peligrosos y contaminantes. Estos morteros de geopolímero inorgánico son una solución a los problemas ambientales en las industrias de la construcción, debido a que los morteros de geopolímero inorgánico se producen a partir de materiales inorgánicos abundantes y no emiten CO₂ durante su producción. Convirtiéndose en una alternativa sostenible a los materiales de construcción tradicionales. [17]



Figura 1.6. Producción de geopolímeros (Material aluminosilicatos + solución alcalina = Geopolímero)

Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la Figura 1.6, se puede observar los componentes como; la mezcla de la arena con caliza y zeolita, además de los activadores alcalinos el hidróxido de sodio y silicato de sodio. Para la elaboración de geopolímeros, están formados principalmente de dos tipos de precursores inorgánicos: silicatos y aluminatos. Estos precursores pueden provenir de diversas fuentes, como cenizas volantes de carbón, metacaolín, sílice activada, zeolitas y escorias. Para la activación del proceso de geopolimerización se usan soluciones alcalinas como, hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH), lo que da lugar a la formación de enlaces químicos tetraédricos tridimensionales que conforman la estructura del geopolímero [18].

Algunos de los atributos o propiedades de los geopolímeros destaca por su alta resistencia a la compresión y su sólida integridad estructural, ofreciendo una resistencia al fuego sin la emisión de gases contaminantes. Además, exhibe una notable resistencia a los productos químicos, baja permeabilidad y una conductividad térmica reducida. Su versatilidad se refleja en su capacidad para adherirse fácilmente a diversos materiales, como hormigón, acero, vidrio y cerámica.

Los geopolímeros son materiales minerales que tienen alta dureza superficial, alta resistencia mecánica, resistencia a ambientes químico-tóxicos y altas temperaturas. Las posibles aplicaciones de estos materiales son en productos de construcción por lo que Vega dice que:

“Actualmente, se han producido morteros y hormigones a partir de ligantes geopoliméricos, además, los geopolímeros se han utilizado para fijación de residuos peligrosos. La ventana de aplicación para estos materiales se está expandiendo, porque

su investigación contribuye a una mejor comprensión de comportamiento de estos materiales y queda mucho por estudiar sus propiedades físicas y químicas". [19]

Entre las propiedades que exhiben los materiales geopoliméricos se encuentran la resistencia a los sulfatos con un bajo grado de agrietamiento, resistencia a los ciclos de hielo y deshielo, firmeza a la resistencia al ataque químico, capacidad para estabilizar e inmovilizar ciertos metales altamente tóxicos en la producción de hormigones especiales, alta resistencia inicial, entre otras. Todas estas características hacen de los geopolímeros un potencial alternativo al hormigón de cemento, además, de su baja y larga capacidad de retención de condiciones agresivas como mencionó Valenzuela. [20].

1.6.1 Clases de Geopolímeros

Los geopolímeros se clasifican de varias maneras, dependiendo de los criterios que se utilicen. Los geopolímeros inorgánicos puros, geopolímeros orgánicos y análogos sintéticos de macromoléculas naturales. Los geopolímeros inorgánicos son materiales compuestos por redes tridimensionales de átomos de silicio, aluminio y otros elementos enlazados mediante enlaces covalentes.

Estos materiales son producidos mediante una reacción química llamada "activación alcalina", en la que una solución alcalina es mezclada con un precursor inorgánico, como cenizas volantes, metacaolín, o vidrio molido, para formar un gel que luego fragua en un material sólido [18]. Los geopolímeros inorgánicos presentan una serie de propiedades interesantes, como alta resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y alta durabilidad, lo que los hace adecuados para una amplia variedad de aplicaciones en ingeniería civil y materiales avanzados. En la figura 1.4 se observa un ejemplo de geopolímeros inorgánicos también conocidos como hormigones ligeros.



Figura 1.7. Geopolímeros inorgánicos

Fuente: [21]

Los geopolímeros inorgánicos tienen sostenibilidad ambiental; ya que están hechos de subproductos industriales como cenizas volantes y escoria, lo que reduce la necesidad de materias primas vírgenes y reduce la huella de carbono de los proyectos de construcción [22]. Además de presentar durabilidad debido a la alta resistencia a la degradación química y física, lo que los hace adecuados para su uso en entornos hostiles y en estructuras que están expuestas al agua y los productos químicos [23].

La principal desventaja de los geopolímeros inorgánicos es el alto costo, debido al proceso de producción complejo y requiere equipos especializados; lo que los hace más costosos que los materiales de construcción tradicionales [24]. Asimismo, la falta de estandarización es un inconveniente; ya que el proceso de producción y las propiedades de los geopolímeros pueden variar según el origen de las materias primas y el proceso de geopolymerización específico utilizado, lo que dificulta establecer especificaciones estándar y procedimientos de control de calidad [25].

1.7 Compuesto de geopolímeros diseñados (EGC)

Los compuestos de geopolímeros, también conocidos como geopolímeros diseñados, son una clase de materiales que se fabrican combinando aglutinantes de geopolímeros con otros materiales como fibras, partículas u otros polímeros. Estos compuestos están diseñados para mejorar las propiedades del aglutinante de geopolímero, como la resistencia, la tenacidad y la durabilidad, y para adaptar las propiedades del material compuesto final a aplicaciones específicas.

Se ha demostrado que los compuestos de geopolímeros reforzados con otros polímeros (como el polipropileno o el polietileno) tienen propiedades mejoradas, como una alta resistencia a la flexión y una mejor resistencia al impacto, en comparación con los geopolímeros no reforzados [26].

Los compuestos de geopolímeros diseñados son una clase de materiales que combinan aglutinantes de geopolímeros con otros materiales para mejorar las propiedades del material compuesto final. Estos compuestos tienen una amplia gama de aplicaciones, como en la construcción, la ingeniería civil y otros campos industriales.

1.7.1 Avances relevantes en el campo de EGC

Jingming Cai en su trabajo investigativo “Comportamientos de impacto del compuesto de geopolímeros expuesto a temperaturas elevadas” se planteó investigar el comportamiento de los compuestos de geopolímeros diseñados (EGC) a temperaturas altas y el curado a temperatura ambiente con fibras de acetato de polivinilo (PVA) para

realizar una comparación con los compuestos cementosos diseñados (ECC) o cementos tradicionales, con lo cual obtuvo como resultados que la resistencia al impacto de los ECC disminuía conforme se iba aumentando la temperatura mientras que en el caso de los EGC su resistencia iba aumentando conforma iba subiendo la temperatura. Esto le da una ventaja a los geopolímeros contra los cementos tradicionales en la industria de la construcción; ya que pueden ser usados para la protección contra impactos de estructuras que llegan a ser sometidas a altas temperaturas, ya sea por el clima o por algún incendio inesperado [27].

El autor Rawat en su investigación titulada “Optimización de respuesta múltiple de compuesto cementoso de ingeniería de fibra híbrida utilizando el método Grey-Taguchi y el concepto de utilidad” se planteó una investigación experimental en la cual evaluó el análisis de Taguchi para la optimización de las mezclas del compuesto ECC donde: la escoria dolomita y cenizas son utilizadas como aglutinantes y varios componentes de ECC, optimizando el rendimiento de compresión y tracción [28].

Describe la autora Ana Constancio en su tema investigativo “Comportamiento a la tracción de compuestos de geopolímeros por deformación bajo carga de impacto” que los compuestos de geopolímeros endurecidos por deformación son altamente dúctiles y tienen un mejor control de grietas además de una buena capacidad para disipar la energía una vez que estos están siendo sometidos a cargas de tracción cuasi estáticas [29].

El autor Valenzuela elaboró un trabajo experimental basado en la elaboración de un hormigón compuesto de zeolita y compuesto de la mezcla zeolita-cal como material sustitutivo del cemento. Los porcentajes de sustitución utilizados fueron del 10%, 20% y 30%, fueron comparados con un hormigón tradicional con resistencia de compresión de 240 kg/cm². Como resultados de su investigación se obtuvo que el hormigón elaborado con zeolita natural presentó una mejor resistencia a la compresión que el hormigón elaborado con la mezcla zeolita-cal, estos valores dados corresponden a la sustitución del 10% de material. Mientras que el resultado obtenido al momento de realizar la sustitución de la mezcla con los porcentajes del 20% y 30%, se obtuvo que las dos mezclas de hormigón bajaron su resistencia a la compresión incluso al punto de que no llegó a los niveles estandarizados de resistencia de diseño [30].

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Introducción

El proyecto se fundamenta en la necesidad de la sociedad por materiales de construcción sostenibles, con buena resistencia a la compresión, tensión y flexión, mejorando materiales usados para los mismos fines al momento. Para este fin, se definió el problema y objetivos los cuales ayudan a establecer el mecanismo de experimentación, cronograma de actividades y variables. Las variables se definieron junto con el diseño experimental. De manera general, se evaluaron las propiedades de los morteros obtenidos, a través de la realización de ensayos mecánicos de compresión, flexión y tensión, para determinar si la mezcla es adecuada para usos de revestimiento en obras de construcción. Este EGC es un material compuesto que combina los geopolímeros con otros materiales para mejorar sus propiedades mecánicas y funcionales. Una mezcla a base de zeolita, caliza, arena, activadores y fibras, obteniendo una mezcla dúctil que puede ser usada de manera estructural o no estructural.

2.2 Diseño experimental

La experimentación para el desarrollo de EGC se ha dividido en dos partes. La primera parte corresponde a los precursores como; arena, zeolita, caliza y la segunda sus activadores alcalinos; NaOH y Na₂SiO₃, ayudando a la síntesis de los geopolímeros. Para determinar las cantidades de mezcla se usa el diseño experimental de Taguchi, en el cual se definen las variables o factores de entrada para realizar la experimentación y, las variables de salida o de respuesta, que permiten evaluar los resultados obtenidos. Para el desarrollo experimental del proyecto se establece la clasificación en dos etapas. La primera es una etapa filtro para obtener la mezcla óptima en función de los mejores resultados en la combinación de las variables de respuesta de trabajabilidad o fluidez y resistencia a la compresión. Para la primera etapa se evalúan como variable de entrada la composición de sus componentes (arena, zeolita, caliza), los efectos de los activadores alcalinos (hidróxido de sodio y silicato de sodio) y otros factores como temperatura y tiempo.

En la segunda etapa, a la mezcla óptima obtenida de la primera etapa, se le añade fibras de PVA, en diversos porcentajes (1% vol., 1,5% vol. y 2% vol.). Dando lugar a varias mezclas de EGC en las cuales se evalúan como variables de salida la trabajabilidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión.

2.3 Diseño de estudio experimental

El diseño de Taguchi es una técnica de diseño experimental que se utiliza para optimizar la calidad de un producto o proceso al minimizar la variabilidad y reducir los costos. En el diseño factorial fraccionario de 2^{k-p} , "k" representa el número de factores o variables de diseño que se están evaluando y "p" representa el número de generadores que se están considerando para cada uno de esos factores [31].

Para el estudio experimental se planteó el diseño factorial fraccionario (2^{k-p}), el cual es el diseño completo es 2^k , pero por tema de recursos en la parte experimental, se tomó una fracción como es, $2^k / 2^p$. Para construir un diseño 2^{k-p} , donde $k = 7$ factores y $p=4$ generadores. Por lo tanto, el diseño experimental fraccionario a utilizar se reduce a (1/16) (2^k). Los siete factores para evaluar se presentan en la, valor referente a "k".

Tabla 2.1. Los factores de diseño "k" a evaluar

Fuente: Elaboración propia

Factor	Descripción	Unidades	Niveles (bajo, alto)
A	Relación entre arena y aglutinante	% V	1,5 - 2,5
B	Relación entre solución y Aglutinante	% V	35 - 55
C	Relación entre Na_2SiO_3 y NaOH	% V	1 - 3
D	Concentración de NaOH	M	10 - 12
E	% de caliza en volumen	% V	5 - 10
F	Temperatura	°C	60 - 80
G	Tiempo de cocción	hr	24 - 72

Para "p", los generadores de control son aquellos factores que se pueden ajustar o controlar directamente en el proceso, tienen un efecto significativo en el resultado del proceso o producto que se está diseñando. El experimento presenta 7 grados de libertad (relativos a "k"), entonces para realizar un diseño factorial fraccionado acorde a las variables de este experimento, se lleva a un análisis estadístico mediante ANOVA, que luego puede ser representado por un diagrama de Pareto.

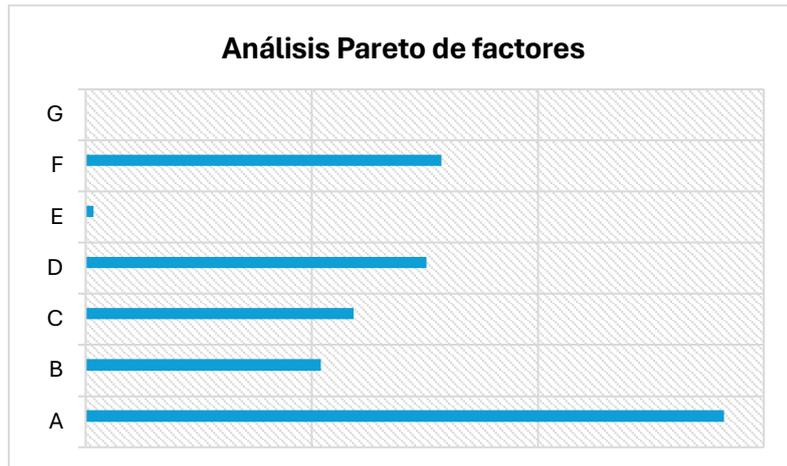


Figura 2.1. Representación gráfica en Pareto de acuerdo con el análisis de ANOVA en R

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en el diagrama de Pareto, en la Figura 2.1, Los 3 factores o efectos importantes son: La relación entre arena y aglutinante (A), la concentración de NaOH (B) y la Temperatura de cocción (F). Por otro lado, las variables restantes y sus interacciones resultan no significativas, por lo cual el experimento se reduce a 8 mezclas. Por lo tanto, con los factores de $k=7$ y con generadores $p=4$, el número total de experimentos para el diseño experimental es $2^{7-4}=2^3=8$ mezclas (corridas o combinaciones), para la primera etapa experimental o etapa filtro. Siendo una selección de conjunto de posibles experimentos y optimizando el número total de combinaciones necesarias en función de las variables de interés. Finalmente, con la finalidad de evaluar la repetibilidad en cada mezcla, se ha decidido hacer cada uno por triplicado; es decir 3 réplicas por cada mezcla.

De manera general, se puede afirmar que el diseño factorial fraccionado para la etapa filtro se ha reducido de 2^7 posibles combinaciones a 2^3 , haciendo uso de herramientas estadísticas. Adicionalmente, para cada mezcla se repiten los experimentos por triplicado, observando los resultados de las variables respuesta como criterio de evaluación, dando un total de 24 experimentos individuales. El objetivo del diseño de Taguchi es encontrar la combinación óptima de los niveles de los generadores de control para minimizar la variabilidad del resultado del proceso o producto.

Por lo tanto, en este diseño se deben evaluar un total de 8 combinaciones de niveles altos y bajos relacionados entre sí por factores. El objetivo es identificar la combinación óptima de los factores analizados que produzca el mejor resultado con la menor variabilidad posible. La estructura completa se obtuvo 8 mezclas como son la G1, G2, G3, G4, G5, G6, G7 y G8.

Tabla 2.2. Generadores y resultantes para primera etapa.

Fuente: Elaboración propia

Primera etapa			
Generadores			
Factor 1 (A)	Factor 2 (F)	Factor 3 (D)	Nombre de la mezcla
Relación entre arena y aglutinante	Temperatura	Concentración de NaOH	
1,5 %V	60 °C	10 M	G1
		12 M	G2
	80 °C	10 M	G3
		12 M	G4
2,5 %V	60 °C	10 M	G5
		12 M	G6
	80 °C	10 M	G7
		12 M	G8

Como criterios de evaluación se definen variables respuesta o dependientes. Como primera variable de respuesta para la primera etapa se analizan la resistencia a la compresión de los morteros obtenidos y la fluidez de las mezclas producidas para determinar la mezcla óptima. Por lo tanto, son estos resultados los que estadísticamente determinarán, cuál es la mezcla óptima de entre las 8 definidas.

Para la segunda etapa se definen un procedimiento experimental más enfocado en el diseño del material compuesto. El EGC está compuesto de una mezcla óptima, definida en la primera etapa y se experimenta en tres niveles, en función de los porcentajes de volumen de fibra PVA añadida. Como variables de respuesta se definen la resistencia a la flexión, tensión y trabajabilidad, tal como como se resume en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Diseño experimental de la segunda etapa

Fuente: Elaboración propia

Segunda etapa EGC		
VARIABLES DE RESPUESTA		
	FIBRA	ENSAYOS
Mezcla óptima fase 1	1%V	Trabajabilidad Resistencia a la tensión Resistencia a la flexión
	1,5%V	
	2%V	

2.4 Equipos, materiales y reactivos

2.4.1 Equipos

Los equipos que se usaron ayudan a realizar mediciones adecuadas para obtener resultados óptimos. Son herramientas esenciales en un laboratorio y se utilizan para realizar mediciones precisas y cuantificar diferentes propiedades físicas y químicas de las muestras. Además de manipular y analizar muestras, y llevar a cabo experimentos bajo condiciones controladas.

Para obtener una caliza de buen tamaño de partícula, se llevó a molienda de bola para obtener 100 mesh. Con ayuda de utensilios de laboratorio se realizó el proceso de mezclado y manipulación de la mezcla como fueron recipientes para reposar la mezcla con agua destilada, espátula para una buena manipulación y balanza para medir cantidades adecuadas en gramo para cada producto, como se explica en la Tabla 2.3.

El procedimiento experimental en la primera etapa, se desarrolla ensayo de trabajabilidad para determinar fluidez del geopolímero. Para obtener una mezcla adecuada se usó una mezcladora Cole-Parmer, que con ayuda de una espátula se colocó en el molde para el ensayo de fluidez. Luego, se colocó la mezcla verde en un molde en forma de cubo para ensayo de compresión, después se sometieron las muestras a una temperatura en estufa de 60°C a 80°C, para que se activen los precursores con los activadores. Para ensayo de compresión, se usó una máquina SHIMADZU con capacidad de trabajo de 600 kN.

Para la primera etapa, después de realizar los ensayos de compresión a las probetas se toman muestras (5 unidades) para realizar análisis de caracterización de materiales como; FTIR, TGA y XRD, los cuales se realizaron en el departamento LEMAT-ESPOL. El uso de estos equipos y sus características están detalladas en listado de equipos.

Para la segunda etapa, se calculó ensayo de fluidez por presentarse un EGC con fibra PVA, la mezcladora y una balanza se obtuvo las proporciones adecuadas y una mezcla uniforme. El ensayo de tensión y el ensayo de flexión son dos pruebas mecánicas comunes que se utilizan para evaluar las propiedades de los materiales y determinar su comportamiento bajo carga.

Ensayo de tensión, se aplica una carga axial de tensión gradualmente creciente a una muestra del material (Figura 2.3.), hasta que se produce la ruptura de la muestra. Esta prueba permite determinar las propiedades mecánicas importantes, como la resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación final.

El ensayo de flexión a una muestra del material (Figura 2.2.), se le aplica una carga central en una de las caras que posee la mayor dimensión longitudinal, de tal manera que la probeta sea sometida a una condición de flexión en un punto de aplicación de fuerza y dos de soporte. El resultado del ensayo permite determinar propiedades como la resistencia a la flexión del material de estudio.

El uso de moldes y medidas para la elaboración de las muestras, para el desarrollo de los ensayos correspondientes al procedimiento experimental, están dados bajo normativas correspondientes a cada ensayo. Esta información se detalla en la sección 2.6 de este documento.

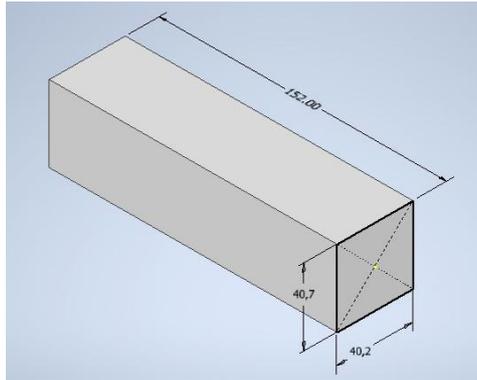


Figura 2.2. Esquema de la muestra en forma de vigueta, para ensayo de flexión.

Medidas (152x40x40) mm.

Fuente: Elaboración propia

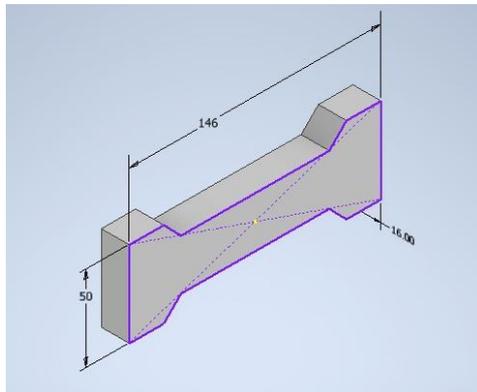


Figura 2.3. Esquema de la muestra en forma de lazo, para ensayo de tensión.

Medidas (146x50x16) mm.

Fuente: Elaboración propia

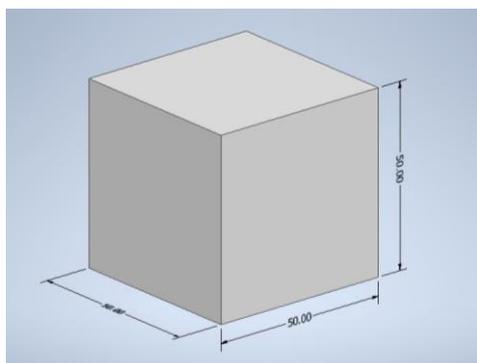


Figura 2.4. Esquema de la muestra en forma de cubo, para ensayo de compresión.

Medidas (50x50x50) mm.

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detalla un listado de equipos, moldes, reactivos y equipos auxiliares usados para en las dos etapas en la parte experimental de la investigación.

Equipos

Molino de bolas

- ✓ Función: Moler mezclas o compuestos a partículas más pequeñas.
- ✓ Característica: marca Restch, modelo 100687-RX.

Tamiz de acero inoxidable

- ✓ Función: Obtener tamaño adecuado del material (partícula).
- ✓ Característica: marca WSTYLER, modelo 182728294, mesh °10.

Estufa

- ✓ Función: Secar o deshidratar materiales y activar reactivos.
- ✓ Característica: marca Memmers, modelo UNB500.

Mezcladora

- ✓ Función: Combinar de manera homogénea diferentes elementos.
- ✓ Característica: marca Cole-Parmer, modelo 50001-92.

Balanza analítica

- ✓ Función: Medir masa de un cuerpo.
- ✓ Característica: marca Biobase, modelo BE100001, carga máxima 220 gramos.

Máquina de Ensayos Universales.

- ✓ Función: determinar la máxima resistencia a compresión que soporta las probetas cúbicas.
- ✓ Característica: marca SHIMADZU, modelo UH-F600 kN.

Máquina de Ensayos Universales.

- ✓ Función: determinar la resistencia a la flexión y resistencia a la tensión de las probetas de la investigación.
- ✓ Característica: Marca SHIMADZU, Modelo AG-IS 10kN

Analizador Termogravimétrico (TGA)

- ✓ Función: Facilita la valoración de los cambios térmicos que sufre un material al ser sometido a pruebas con velocidad de calentamiento constante.
- ✓ Característica: Marca TA Instruments, Modelo SDT Q600

Máquina de Difracción de Rayos X (XRD)

- ✓ Función: Estudios de estructura cristalográfica del material.
- ✓ Característica: Marca PANalytical, Modelo XPert PRO

Máquina de Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

- ✓ Función: Analiza la absorción y transmisión molecular en las muestras, generando una huella digital molecular de la muestra.
- ✓ Característica: Marca Perkin Elmer, Modelo Spectrum 100.

Moldes

Molde de asentamiento cónico

- ✓ Función: determinar la fluidez o trabajabilidad de la mezcla verde.
- ✓ Características: altura de 60 cm y ancho de 25 mm.

Molde en forma de cubo

- ✓ Función: determinar ensayo para resistencia a la compresión.
- ✓ Características: medidas de 50x50x50 mm.

Molde en forma de vigueta

- ✓ Función: determinar ensayo para resistencia a la flexión.
- ✓ Características: medidas de 152x40x40 mm.

Molde en forma de lazo

- ✓ Función: determinar ensayo para resistencia a la tensión
- ✓ Características: medidas de 146x50x16 mm.

Equipos auxiliares:

- ✓ Espátula
- ✓ Matraz Erlenmeyer de 500 ml
- ✓ Pipeta graduada de 60 mm
- ✓ Embudo
- ✓ Agitador
- ✓ Probetas de 100 mL
- ✓ Regla
- ✓ Lija de agua #180, #200 y #280
- ✓ Matraz aforado de 100 mL
- ✓ Vaso de Precipitación de 500 mL y 100 mL
- ✓ Malla de 100 mesh



Figura 2.5. Materiales y reactivos

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Reactivos

Los reactivos son esenciales para la formación de los polímeros inorgánicos; ya que activan los componentes básicos y controlan la velocidad y el grado de reacción [32].

Para el desarrollo de este proyecto se usaron activadores líquidos tales como; silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH). Estos activadores son necesarios en la producción de geopolímeros. Para la combinación del hidróxido de sodio con la mezcla se usó en concentración de 10M y 12M. En el cual mediante proporciones se calcula la cantidad en gramos a diluir en agua destilada, luego, se mezcla con agitador por varios minutos hasta la disolución de los pellets del hidróxido de sodio.

2.5 Procedimiento experimental

Para la primera etapa o etapa filtro se obtuvo 8 mezclas por triplicado, obteniendo 24 experimentos. La elaboración de las probetas se explica a detalle en la sección siguiente de preparación de muestras. A estas mezclas, se les realizó ensayos de fluidez o trabajabilidad de acuerdo con la normativa NTE INEN 2502 [33], en mezcla sin llevar a horno. El ensayo de fluidez se realiza en un molde de forma cónica permitiendo que el material fluya hacia abajo a medida que se llena el volumen, lo que permite una comparación precisa de los resultados entre diferentes materiales y procesos de fabricación.

El ensayo de fluidez se realiza de la siguiente manera: se vierte la mezcla en el molde cónico para asentamiento de la mezcla, se levanta el molde de forma cónica, dejando la mezcla sobre la mesa de ensayo. Posteriormente se tomó la diferencia de alturas que se genera entre la mezcla vertida en el molde de medición y la medición de altura de la mezcla conformada y desmoldada, siendo la diferencia una medida de la trabajabilidad de acuerdo con la norma NTE INEN 2502, tal como se encuentra en el apéndice B. Para este trabajo experimental se ha definido un rango de buena trabajabilidad de la mezcla, entre mayor a 1cm y menor a 5 cm. Las mezclas que estén dentro de este rango presentan un buen grado de fluidez de acuerdo con el ensayo de trabajabilidad del mortero.

Como otro factor de respuesta de la primera etapa se tiene el ensayo de compresión de acuerdo con la norma NTE INEN 488 [34]. A las muestras con forma de cubo de 50 mm de cada arista, como se muestra en la Figura 2.4. se aplicó una carga axial a una tasa de 900 N/s, hasta la ruptura de las muestras. Con el fin de evaluar la capacidad del mortero para soportar cargas de compresión uniaxial sin fallar, para aplicaciones de construcción. La mezcla óptima se definió en base a los criterios de trabajabilidad y resistencia a la compresión.

Luego de obtener los resultados de ensayos de compresión de la primera etapa, se toman pequeñas muestras de los morteros obtenidos y se realizó ensayos de; FTIR, XRD y TGA para determinar su composición y estructura cristalina. Se realizó el ensayo a 5 de las 8 muestras tomadas, por limitaciones de presupuesto, se selecciona las 5 muestras que mostraron mejor fluidez en el ensayo NTE INEN 2502.

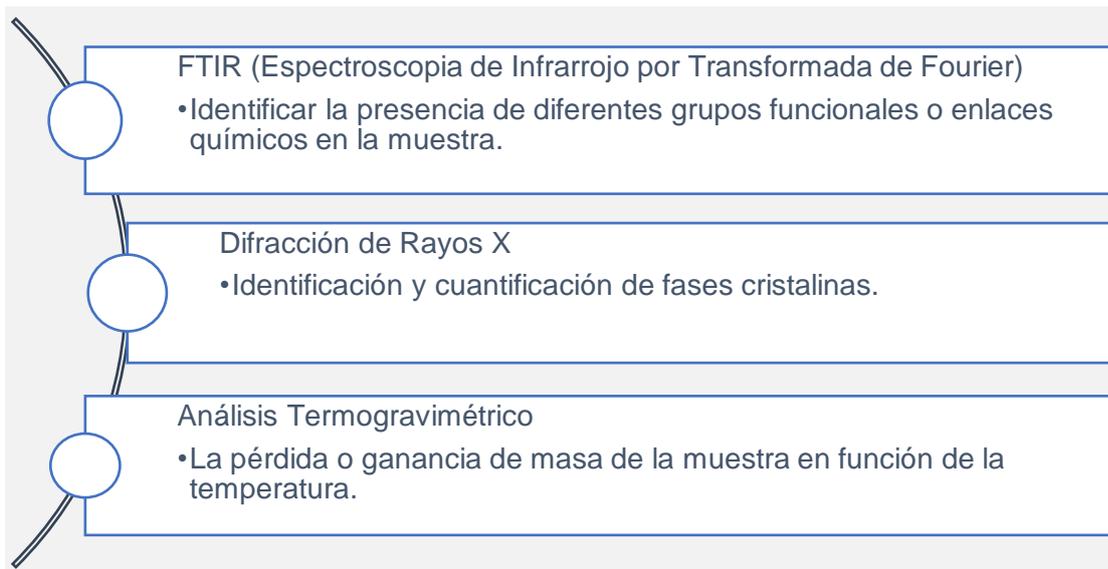


Figura 2.6. Descripción de funciones en ensayo FTIR, XRD y TGA

Fuente: Elaboración propia

Para la segunda etapa se desarrolló el diseño del material compuesto de geopolímeros donde se usó como matriz a la mezcla óptima de la fase 1 y se le añadió tres proporciones en volumen de fibra polimérica PVA. Esto con la finalidad de obtener mayor resistencia mecánica y disminuir las micro fisuras presentes en los morteros usados en mezclas tradicionales; dado que la incorporación de fibras presenta una mejor compactación disminuyendo los deslizamientos internos en las estructuras moleculares de los materiales [35]. La elaboración de las probetas se explica a detalle en la sección 2.6 “Preparación de muestras por etapas”.

A la mezcla óptima que se obtiene como resultado de la primera etapa se le añade fibras poliméricas para una mejor adherencia y resistencia del material, como es el acetato de polivinilo o polímero PVA: 1% 1,5% y 2% (porcentaje en volumen añadidos a la mezcla óptima). Para este estudio se realiza ensayo de flexión, con la máquina universal de ensayos con capacidad máxima de 10 kN, con el set de accesorios para realizar ensayo de flexión en tres puntos; de tal manera que se aplica una carga central en la probeta que descansa sobre 2 apoyos fijos, esto de acuerdo con la normativa NTE INEN 198, con una velocidad de ensayo de 50 N/s aumentando de 1 a 2 MPa/s cada 10 s [34]; de acuerdo con normativa aplicada.

Las dimensiones de estas muestras se observan en la Figura 2.2. Subsecuentemente para el ensayo de tracción de acuerdo con el procedimiento desarrollado por Yang en el año 2007 sobre el estudio de EGC [36]. Este método consiste en la aplicación de una fuerza axial para determinar la capacidad de resistir a un esfuerzo de tensión hasta la ruptura de la muestra. Cabe recalcar que este procedimiento experimental no está normado y se adaptó de acuerdo con el estudio arriba mencionado. Para este estudio se usó el esquema que se observa en la Figura 2.3., con velocidad constante de ensayo de 50 N/s para la muestra de ensayo.

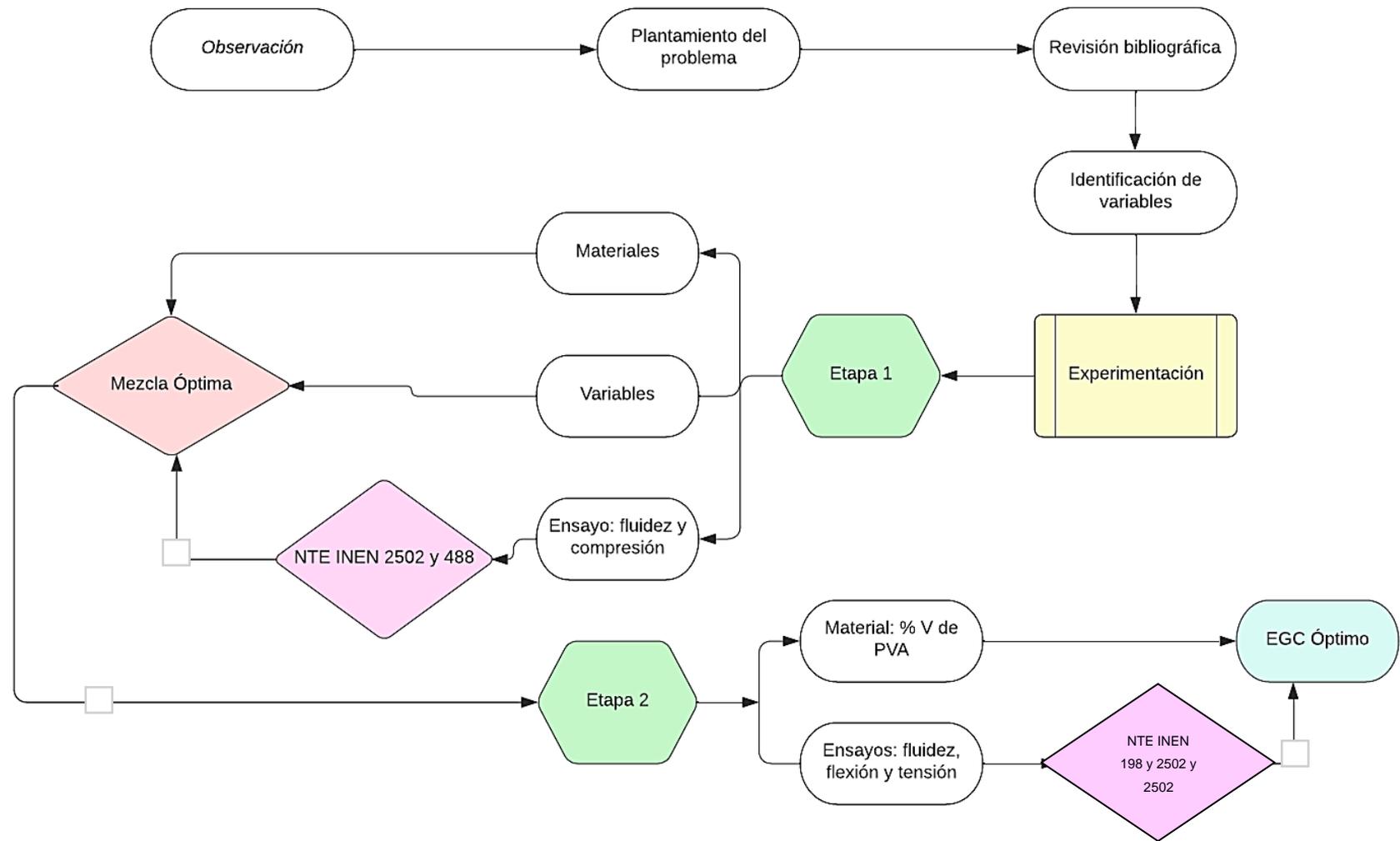


Figura 2.7. Metodología del proyecto

Fuente: Elaboración propia

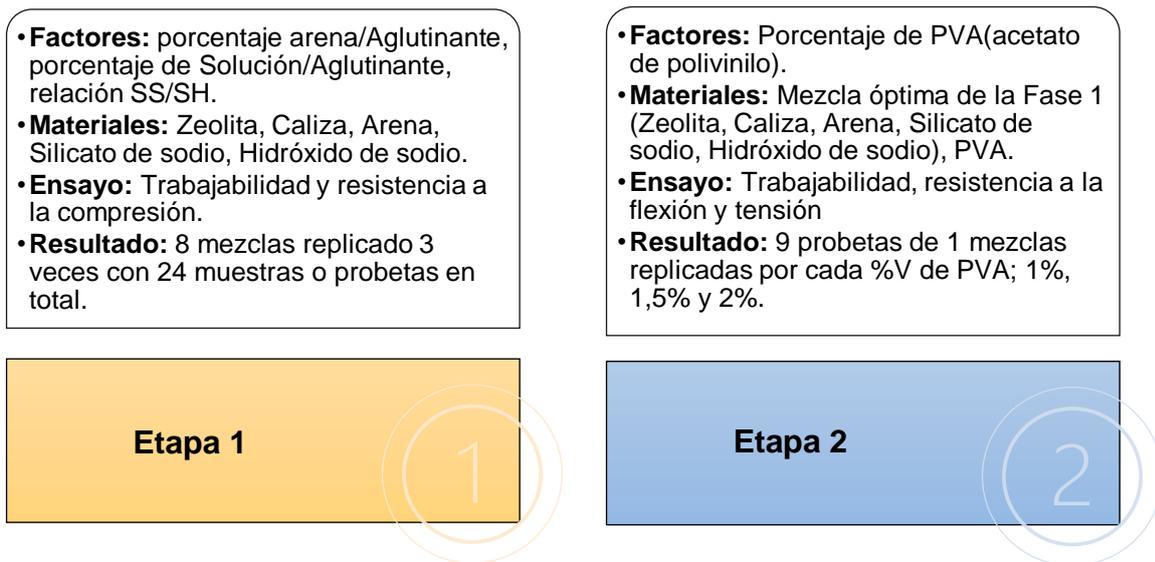


Figura 2.8. Distribución experimental del proyecto

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2.8 2.8, se describe la metodología utilizada hasta la obtención del EGC óptimo, con el objetivo de diseñar un material dúctil de geopolímeros a base de zeolitas natural de origen local y cumpliendo normativas. Par este estudio se quiere comprobar si posiblemente la mezcla verde que se obtiene podrá cumplir con el objetivo de la investigación, es decir obtener una mezcla o mortero capaz de soportar 5% más de la fuerza de carga de un cemento tradicional.

2.6 Normativas aplicadas en uso experimental

El INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización), establece una serie de requisitos y parámetros técnicos para la fabricación de morteros, con el fin de garantizar su calidad y seguridad en su uso. A continuación, se presentan la normativa aplicable para este proceso.

La norma NTE INEN 2502: determina el flujo de mortero del agente cementante, donde la mezcla es colocada en un molde de asentamiento cónico con medidas de 60 mm de espesor y compactado 20 veces. Se dejará caer la mezcla colocada en el molde, con tiempo de 25 segundos para luego tomar la diferencia de altura entre la argamasa que se dejó caer y el molde de ensayo de flujo.

La norma NTE INEN 488: establece el método de ensayo de compresión para determinar su resistencia mecánica, para lo cual se debe aplicar una fuerza entre rangos de 900 y 1800 N/s sobre un mortero de forma cúbica de 50 mm de arista. La resistencia al ensayo de compresión debe ser mayor a 2,5 MPa a los 7 días de curado agregando precursores para obtener un material de uso adecuado en materiales de construcción.

La norma NTE INEN 198: el método de ensayo de flexión determina las propiedades mecánicas del material utilizando parámetros como su resistencia a la flexión, su deformación máxima y su capacidad para recuperar su forma original después de la carga. Para este estudio se debe considerar tener 2 puntos de apoyo fijos y una carga aplicada en el centro de la probeta de manera equidistante a los soportes fijos. Al realizar el ensayo de resistencia a la flexión se toma de referencia el largo de la muestra en forma de vigueta. Dos puntos de apoyo están en la parte inferior de la muestra, a una distancia entre ambos de 120 mm, y en la parte superior, en el centro de la muestra se aplica la carga con la máquina de ensayos universales. Se selecciona una velocidad de carga de 50 N/s aumentando de 1 a 2 MPa/s cada 10 s de acuerdo con normativa aplicada.

En ausencia de normativa ecuatoriana se usó como referencia para el ensayo de tensión, el trabajo desarrollado por Yang en el (2007) sobre el estudio de EGC, Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites [36], que consiste en determinar la resistencia a la tracción de un material con medidas similares a las presentadas en la Figura 2.3., aplicando una fuerza de tracción a una tasa de 50 N/s, para identificar el comportamiento del EGC (Compuestos Cementicios Diseñados por sus siglas en inglés) bajo cargas de tracción.

En el EGC las fibras de PVA actúan como puentes o refuerzos en la matriz del compuesto y durante el ensayo de tensión lo refuerzan hasta que finalmente se presenta la ruptura.

2.6.1 Diseño Experimental primera etapa

Se realizaron cálculos matemáticos para sacar las masas de los materiales en sólidos y líquidos. En la Tabla 2.4., se presentan las cantidades en gramos y mililitros pertenecientes a la fabricación de cada muestra. Se generan 8 mezclas en total, debido al diseño ortogonal fraccionario como lo muestra la Tabla 2.2.

Las muestras obtenidas en la primera etapa deben pasar el ensayo de fluidez que consiste en la diferencia de altura de la mezcla desmoldada con el molde del recipiente. Esta diferencia tiene que ser mayor a 1 cm de la altura de la mezcla con el molde y menor a 5 cm, de acuerdo con la normativa NTE INEN 2502. Además, al realizar el ensayo de compresión, de acuerdo con la normativa NTE INEN 488, una muestra de material en forma de cubo se coloca en la máquina de ensayo SHIMADZU y luego se aplica una carga de compresión. La carga se aplica de manera progresiva hasta que la muestra se rompe o se alcanza una determinada deformación.

Tabla 2.4. Cantidades en gramos y mililitros de cada material para la primera etapa

Fuente: Elaboración propia

<i>Mezcla</i>	<i>Sólidos</i>			<i>Líquidos</i>	
	<i>Arena</i>	<i>Caliza</i>	<i>Zeolita</i>	<i>Na₂SiO₃</i>	<i>NaOH</i>
<i>Unidad</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>mL</i>	<i>mL</i>
G1-1	156,0	5,2	98,8	18,2	18,2
G1-2	156,0	10,4	93,6	18,2	18,2
G1-3	156,0	5,2	98,8	14,3	42,9
G2-1	156,0	10,4	93,6	14,3	42,9
G2-2	185,7	7,43	66,9	6,5	19,5
G3-3	185,7	3,7	70,6	6,5	19,5
G3-1	185,7	7,4	66,9	20,4	20,4
G3-2	185,7	3,7	70,6	20,4	20,4
G3-3	156,0	5,2	98,8	18,2	18,2
G4-1	156,0	10,4	93,6	18,2	18,2
G4-2	156,0	5,2	98,8	14,3	42,9
G4-3	156,0	10,4	93,6	14,3	42,9
G5-1	185,7	7,4	66,9	6,5	19,5
G5-2	185,7	3,7	70,6	6,5	19,5
G5-3	185,7	7,4	66,9	20,4	20,4
G6-1	185,7	3,7	70,6	20,4	20,4
G6-2	156,0	5,2	98,8	18,2	18,2
G6-3	156,0	10,4	93,6	18,2	18,2
G7-1	156,0	5,2	98,8	14,3	42,9
G7-2	156,0	10,4	93,6	14,3	42,9
G7-3	185,7	7,4	66,9	6,5	19,5
G8-1	185,7	3,7	70,6	6,5	19,5
G8-2	185,7	7,4	66,9	20,4	20,4
G8-3	185,7	3,7	70,6	20,4	20,4

En la Tabla 2.4., se indica la asignación de codificación de las 8 mezclas experimentales, (cada una por triplicado). Indicando las cantidades exactas en gramos y mililitros para cada mezcla.

2.6.2 Diseño Experimental segunda etapa

Tabla 2.5. Variables de experimentación de la segunda etapa

Fuente: Elaboración propia

<i>Material</i>	<i>Unidad</i>	<i>Porcentaje (%V)</i>	<i>Cantidad de muestras por ensayo</i>	<i>Ensayo</i>
PVA	%V	1, 1.5, 2	9 u	Flexión, tensión y trabajabilidad.

Una vez obtenido la mezcla óptima se realizó la mezcla de un geopolímero reforzado con fibra, lo cual corresponde a la segunda etapa. La adición de fibras sintéticas puede aumentar la resistencia a la fatiga del geopolímero, debido a la capacidad de las fibras para redistribuir las tensiones en el material y a la capacidad de las fibras para absorber las tensiones. La Tabla 2.5., resume el porcentaje de volumen de fibra PVA que debe tener cada muestra y los ensayos realizados. El ensayo de trabajabilidad es para determinar la fluidez del material con fibra. Para luego llevar a cocción de las muestras a tiempo de curado de 7 días, por consiguiente, se realizaron los ensayos de tensión y flexión para estas muestras.

Además, se realizan ensayos de flexión de acuerdo con la normativa NTE INEN 198, y de tensión de acuerdo al proceso desarrollado por Yang [36].



Figura 2.9. Materiales (sólidos y líquido) e insumos

Fuente: Elaboración propia

2.7 Preparación de muestras por etapas

2.7.1 Preparación de probeta en forma de cubo para primera etapa

De acuerdo con el diseño experimental obtenido de Taguchi, se procedió a realizar la preparación de cada mezcla. La caliza se llevó a molino de bolas para obtener un tamaño de grano menor a malla 100 mesh. Para elaborar soluciones de NaOH, se disuelven 200 y 240 gramos de NaOH para obtener 10M y para 12M de solución en 0,5 litros de agua destilada, respectivamente.

Luego de obtener las concentraciones adecuadas de NaOH, se mezcló los materiales sólidos con los líquidos hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, se vertió la mezcla al molde para el ensayo de fluidez de acuerdo con la NTE INEN 2502. Paralelamente, se vierte la mezcla en los moldes de madera con la forma de cubo, como se observa en la Figura 2.4., para ensayo resistencia a la compresión, este mismo fue engrasado anticipadamente con aceite WD-40 con la finalidad de evitar que la mezcla se adhiera a las paredes y sea fácil de desmoldar llevándolos luego a la estufa con temperatura de 60°C o 80°C dependiendo del diseño experimental.

Los geopolímeros que salieron de la estufa se dejaron enfriar y posteriormente se realizó el curado por 7 días a temperatura de laboratorio. Estas muestras se sometieron a ensayo compresión, de acuerdo con la norma NTE INEN 488, para determinar la resistencia a la compresión del material.

El ensayo de fluidez se describió en la sección de diseño experimental. De los resultados de trabajabilidad y compresión se determina la mezcla óptima a ser evaluada subsiguientemente en la Fase 2.



Figura 2.10. Molde de madera en forma de cubo

Fuente: Elaboración propia

Para estas muestras después de realizarle el ensayo de compresión, se toman muestreos de 5 de las mejores probetas de acuerdo con el ensayo de trabajabilidad y compresión y se realiza ensayos de TGA, FTIR y XRD, mismos que son herramientas analíticas fundamentales para estudiar las propiedades térmicas, estructurales y químicas de los geopolímeros, lo que ayuda a comprender su comportamiento y optimizar su formulación y aplicación en diversas industrias como la construcción. Para mejor detalle se desarrolla en capítulo 3.

2.7.2 Preparación muestra en molde de vigueta para segunda etapa

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos en la fase 1 y habiéndose definido la mezcla óptima, se realizó la misma preparación de la mezcla para el ensayo de fluidez con fibra de PVA (1%V, 1.5%V, 2%V). Posterior a la mezcla con fibras de PVA se coloca sobre los moldes con forma de vigueta de acuerdo con la Figura 2.11., con dimensiones de 152x40x40 mm. Las muestras se llevaron a estufa con temperatura de 60°C y el tiempo de cocido de 24 horas después se deja enfriar, se desmolda y se realiza el ensayo de flexión después del curado por 7 días de las muestras.

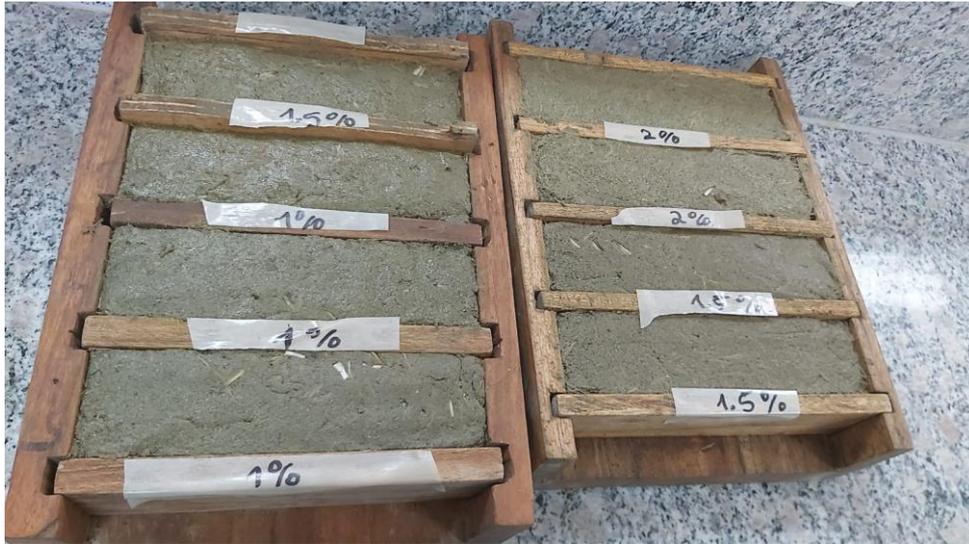


Figura 2.11. Molde de madera en forma de vigueta

Fuente: Elaboración propia

2.7.3 Preparación de probeta en forma de lazo para segunda etapa

El proceso es similar a la sección precedente. Se vierte la mezcla del geopolímero reforzado (mezcla + fibra PVA), en proporciones de 1%V, 1,5%V y 2%V, en un molde como se observa en la Figura 2.12., basado en el trabajo desarrollado Yang en el (2007) sobre el estudio de EGC, Fiber-Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites [36].



Figura 2.12. Molde de madera en forma de lazo

Fuente: Elaboración propia

2.8 Limitaciones del experimento

Las limitaciones del experimento se refieren a las restricciones o factores que pueden afectar la validez, confiabilidad o generalización de los resultados obtenidos. Algunas posibles limitaciones podrían incluir:

Análisis de holgura de las mezclas: La fluidez de caída por gravedad es importante para determinar que eficiente será la mezcla. Si la mezcla se la usará para revestimientos de paredes.

Análisis de humedad: La zeolita tiene buena capacidad de absorción de agua, es recomendable analizar el efecto de esta propiedad en los morteros desarrollados a partir de la misma.

Análisis de comparación con otras fibras: Para un EGC, se usó en el experimento un diseño de fibras discontinuas, aunque de acuerdo con estudios se puede mejorar la resistencia a fuerzas de compresión, tensión y flexión si se usan fibras largas o continuas [37].

Problemas de dispersión: La dispersión de fibras sintéticas en un geopolímero puede ser difícil de lograr, lo que puede afectar la distribución homogénea de las fibras en el material y, por lo tanto, su resistencia.

Problemas de adherencia: La adherencia de las fibras sintéticas en el geopolímero puede ser insuficiente, lo que puede afectar la resistencia del material en condiciones de carga.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El objetivo del proyecto es obtener un EGC dúctil a base de materia prima local, como es la zeolita, y añadiendo fibras poliméricas de PVA. De acuerdo con los resultados obtenidos, el EGC desarrollado puede ser utilizado como revestimiento para obras de construcción. Ecuador está situado en el cinturón de fuego del Pacífico, zona que se caracteriza por ser una de las regiones más activas en términos de actividad sísmica y volcánica en el mundo. Para el desarrollo de este capítulo, se interpretó los resultados obtenidos del capítulo 2. Los ensayos aplicados a las 8 mezclas replicadas se clasificaron por 2 etapas. Primera etapa, Ensayo de fluidez, ensayo de compresión a muestras en forma de cubo, determinando la resistencia hasta la ruptura de la muestra.

Adicionalmente, TGA, XRD y FTIR para analizar la composición y estructura cristalográfica de las muestras de la primera etapa. Para la segunda etapa a la mejor mezcla de la primera etapa se le añade fibras de PVA en diversas proporciones y se reproducen los ensayos de fluidez (Mezcla +PVA), y posteriormente, se continúa con ensayos de tensión y flexión. Estos ensayos proporcionan información importante sobre la resistencia, la deformación y la capacidad de carga del mortero de geopolímero, lo que es fundamental para su aplicación en diversas estructuras y proyectos de construcción.

3.1 Análisis de costo de ensayo

Para el estudio realizado se fabricaron 33 muestras las cuales se clasificaron en primera y segunda etapa. En la primera etapa se obtuvieron 24 muestras para obtener la matriz o la mezcla ideal para la segunda etapa. En la segunda etapa se obtuvo la mezcla G2 la cual se mezcló con fibra de PVA obteniendo 9 muestras. Para obtener un valor monetario en costo de inversión por las muestras a escala de laboratorio se describe en la Tabla 3.1, en la cual se detalla las cantidades en total gramos de los materiales usados para la fabricación de las muestras de estudio y costo de los mismo. Haciendo regla de 3 por material comprado obtenemos el costo total por material invertido en las 33 muestras.

Tabla 3.1. Cantidades y Costos de materiales usados en el estudio.

Fuente: Elaboración propia

	Sólidos				Líquidos	
Mezcla	Arena	Caliza	Zeolita	PVA	Na ₂ SiO ₃	NaOH
Unidad	g	g	g	g	mL	mL
Muestras	5504,40	253,83	2821,80	105,30	485,10	992,10
Conversión	Kg	Kg	Kg	Kg	L	L
Cantidad	5,50	0,30	2,80	0,10	0,50	1,00
Precio Monetario	\$0,33 [88]	\$0,08 [89]	\$7,03 [90]	\$5,57 [91]	\$6,50 [92]	\$723 [93]
Costo Total	\$742,51					

En la Tabla 3.1, se obtiene el costo total invertido por la compra de material en fabricación de las 33 muestras para estudio escala laboratorio.

3.2 Resultados de ensayos de fluidez y compresión para la primera etapa

La trabajabilidad obtenida en la primera etapa es adecuada, de acuerdo con la tabla 3.1, debido a que la diferencia de altura entre la mezcla vertida sobre la mesa de ensayo y el molde de medición de fluidez sea mayor a 1 cm y menor a 5 cm. La muestra G2, presenta una fluidez adecuada entre los 2 valores. La trabajabilidad es la capacidad de un material al ser manipulado, por lo que se la categoriza como “Mezcla Fluida”. Esto implica una reducción de los costos de mano de obra y en una mayor productividad en la construcción. Por el contrario, un mortero que tiene mala trabajabilidad es difícil de aplicar, lo que aumenta los costos y retrasa el proceso de construcción [38].

Para la mezcla óptima G2, la resistencia a la compresión determinada es de 5,4 MPa, lo que representa la resistencia del mortero hasta su ruptura. Como objetivo principal se busca presentar un mortero con mayor resistencia a la compresión que otros geopolímeros diseñados a un tiempo de curado de 7 días. La mezcla G2, alcanza niveles en el ensayo de resistencia a la compresión mayores a 5,2 MPa (curado 28 días); es decir, se clasifica como morteros de muro portante, de acuerdo con la normativa NTE INEN 2518 [41]. Para este estudio, el ensayo de compresión se realizó bajo la norma NTE INEN 488 [34] dando como resultado; 5,4 MPa para la mezcla G2. Sin embargo, el resultado obtenido no está por encima del 5% de la ductilidad requerida en el objetivo del este estudio para ser considerado como material estructural, por lo tanto, se determina que el material no puede soportar cargas de compresión sin sufrir deformaciones permanentes.

La resistencia a la compresión de la muestra en forma de cubo se calcula mediante la siguiente ecuación;

Ecuación 1. Cálculo de resistencia a la compresión

$$R_c = \frac{P_c}{A_c} \quad [32]$$

- $R_c =$ Resistencia a la compresión, MPa
- $P_c =$ Fuerza aplicada, N
- $A_c =$ Área de sección transversal donde se aplica la carga, mm²

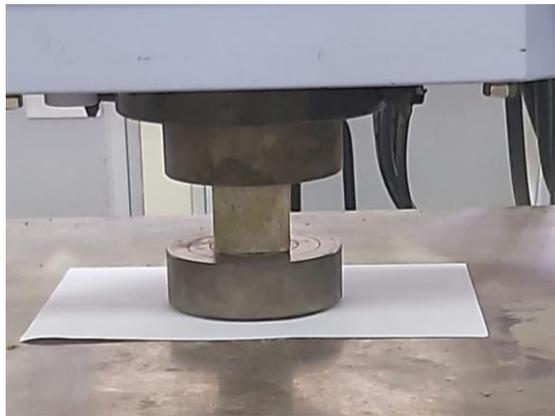


Figura 3.1. Ensayo de compresión para la primera etapa

Fuente: Elaboración propia

La tabla 3.1, presenta los valores obtenidos en la experimentación para la primera etapa. Respecto a la trabajabilidad y ensayo de compresión, se presentan el promedio para una de las muestras ensayadas por triplicado. Primeramente, se determina la mejor mezcla en base a los mejores resultados de fluidez, caracterizando entre mezcla fluida, mezcla seca y mezcla seca arenosa, entre todas las mezclas del experimento; resaltando las mezclas G2, G5 y G7.

Tabla 3.2. Resultados de ensayos de fluidez y compresión para la primera etapa

Fuente: Elaboración propia

Código	Trabajabilidad	Promedio de trabajabilidad	Resistencia mecánica a la compresión	Promedio de ensayo resistencia mecánica a la compresión	Observación
G1-1	0,3 cm	0,3 cm	5,0 MPa	4,7 MPa	
G1-2	0,3 cm		4,4 MPa		
G1-3	0,3 cm		4,7 MPa		
G2-1	1,5 cm	1,3 cm	5,8 MPa	5,4 MPa	Mezcla fluida
G2-2	1,1 cm		6,7 MPa		
G2-3	1,2 cm		3,7 MPa		
G3-1	0,2 cm	0,1 cm	0,6 MPa	0,6 MPa	
G3-2	0,1 cm		0,7 MPa		
G3-3	0,1 cm		0,6 MPa		
G4-1	0,1 cm	0,1 cm	7,3 MPa	8,5 MPa	
G4-2	0,2 cm		8,7 MPa		
G4-3	0,1 cm		9,6 MPa		
G5-1	0,4 cm	0,3 cm	8,6 MPa	8,2 MPa	Mezcla seca
G5-2	0,3 cm		8,8 MPa		
G5-3	0,3 cm		7,3 MPa		
G6-1	0,1 cm	0,1 cm	16,3 MPa	14,2 MPa	
G6-2	0,1 cm		12,1 MPa		
G6-3	0,1 cm		14,2 MPa		
G7-1	0,4 cm	0,4 cm	2,4 MPa	1,9 MPa	Mezcla seca y arenosa
G7-2	0,5 cm		1,6 MPa		
G7-3	0,4 cm		1,8 MPa		
G8-1	0,1 cm	0,1 cm	10,6 MPa	11,3 MPa	
G8-2	0,1 cm		10,5 MPa		
G8-3	0,2 cm		12,9 MPa		

Se obtiene los resultados al ensayo de resistencia mecánica a la compresión, como lo detalla la Ecuación 1. Se selecciona la mezcla G2, debido a que presenta una óptima trabajabilidad como se observa en la Tabla 3.2 y sus resultados de resistencia mecánica a la compresión mayor a 5 MPa (en promedio). Por lo tanto, esta mezcla es la óptima para continuar en a la segunda etapa.

Tabla 3.3. Comparación de la resistencia a la compresión con otros materiales

Fuente: Elaboración propia

Material	Por la normativa NTE INEN 488	Resistencia	Descripción
Mezcla G2	7 días	3,7 MPa hasta 6,7 MPa	La resistencia a la compresión de la zeolita + agregados, varían dependiendo de la cantidad de agregado como se muestra en la Tabla 3.2.
Arcilla	7 días	0,4 MPa hasta 10 MPa [40]	La resistencia a la compresión de la arcilla puede variar ampliamente dependiendo de la composición y la densidad.
Hormigón reciclado	7 días	20 MPa hasta 50 MPa [41]	El hormigón reciclado es un material sostenible que se obtiene a partir del reciclaje de residuos de construcción y demolición. Dependiendo de la cantidad de cemento y agregados utilizados en la mezcla.
Arena	7 días	0,15 MPa hasta 2,5 MPa [42]	La resistencia a la compresión de la arena puede variar dependiendo del tamaño de partícula y la densidad.
Ceniza	7 días	2,5 MPa hasta 15 MPa [43]	La ceniza es un subproducto de la combustión de materiales orgánicos que puede ser utilizado como material sostenible en la construcción.

De acuerdo con la Tabla 3.3., la resistencia a la compresión de la mezcla G2 (5,4 MPa) se encuentra en el rango de las resistencias a la compresión de la arcilla y la ceniza, pero es inferior a la resistencia a la compresión del hormigón reciclado. Cada material sostenible tiene sus propias ventajas y desventajas y su selección para un proyecto específico dependerá de las condiciones y requerimientos de la construcción.

Los ensayos de TGA (análisis termogravimétrico), FTIR (espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier) y XRD (difracción de rayos X) se aplican a las muestras de geopolímeros debido a que estas tres técnicas analíticas son complementarias y brindan

una visión completa de las propiedades físicas, químicas y estructurales de los geopolímeros. Su combinación permite evaluar la composición, estabilidad térmica, estructura molecular y microestructura de los materiales, lo que es esencial para optimizar la formulación de los geopolímeros y mejorar su rendimiento en aplicaciones específicas [44].

3.2.1 Análisis FTIR para muestras de primera etapa

Para la caracterización se analizaron 5 muestras seleccionadas, debido a limitaciones con el laboratorio investigativo y para optimizar recursos enfocándose en los mejores resultados en las pruebas mecánicas y de trabajabilidad. Al comparar las curvas FTIR, existen aproximadamente seis regiones de interés para reconocer si la reacción de geopolimerización se desarrolló adecuadamente. El pico alrededor de 3400 cm^{-1} y los cercanos a 1640 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de estiramiento (-OH) y flexión simétrica (H-O-H), respectivamente [45].

Estos pueden relacionarse al agua higroscópica y a moléculas dentro de la estructura del geopolímero, y son más intensos para las muestras con mayor contenido de hidróxido de sodio y/o ratio SS/SH más bajo. La señal entre $1400\text{-}1450\text{ cm}^{-1}$ está relacionada a la vibración de estiramiento C-O-C de carbonatos (Ca o Na) formados por la reacción con CO_2 durante el curado [46].

Para las muestras con mayor cantidad de sodio disuelto, y por eso es uno de los factores más importantes del experimento. Los picos entre $1000\text{-}1040\text{ cm}^{-1}$ son propios de la vibración asimétrica entre Si-O-Si o Si-O-Al, y demuestran la formación de los geopolímeros a partir de la zeolita y activador alcalino [47].

Por último, las bandas debajo de 800 cm^{-1} corresponden a la flexión y estiramiento de los aluminosilicatos del material.

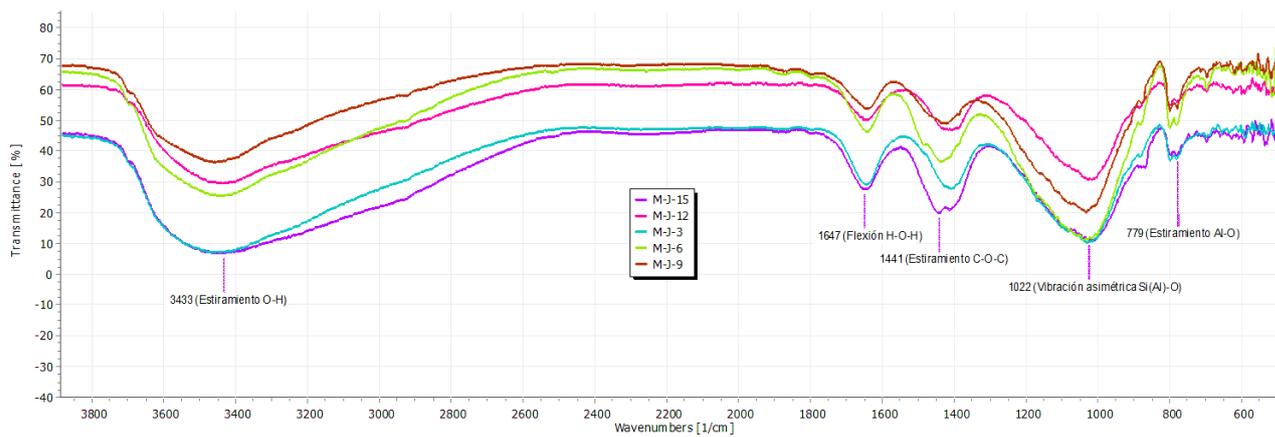


Figura 3.2. Análisis FTIR de las muestras seleccionadas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4. Resultados FTIR de mezclas primera etapa

Fuente: Elaboración propia

Muestra	Picos FTIR (cm ⁻¹)	Transmitancia (U)
Mezcla (G1-1)	3460,1	1,1
	1644,3	0,5
	1407,2	0,6
	1028,6	1,0
	797,6	0,4
	585,8	0,4
Mezcla (G2-3)	3439,5	0,6
	1640,7	0,3
	1437,0	0,4
	1039,6	1,1
	799,4	0,3
	696,4	0,4
Mezcla (G3-3)	3435,2	0,5
	1648,0	0,3
	1406,3	0,3
	1015,7	0,3
	799,0	0,3
	695,6	0,2
Mezcla (G4-3)	3457,5	0,4
	1639,8	0,2
	1419,9	0,3
	1031,5	0,7
	798,3	0,3
	618,6	0,2
Mezcla (G7-2)	3432,7	1,2
	1647,3	0,6
	1440,9	0,7
	1021,9	1,0
	779,0	0,4
	695,8	0,4

3.2.2 Análisis de TGA

Para el análisis de los resultados provenientes del estudio termogravimétrico, se subdividió el gráfico en 4 regiones: temperatura ambiente a 200 °C, 200 - 600 °C, 600 a 800 °C y de 800 a 1000 °C. Al comparar las curvas correspondientes a cada muestra se distinguen 2 cambios importantes, a temperaturas menores a 200 °C y a temperaturas entre 600 y 800 °C. El primer cambio se debe a la evaporación del agua absorbida superficialmente y aquella dentro de los poros o espacios entre del geopolímeros [48]. Entre 200 °C y 600 °C, hay una disminución de peso de alrededor de 3% para todas las

muestras y se debe a la formación de enlaces OH, Al-OH y Si-OH, que son parte importante en la reacción de condensación entre aluminosilicatos.

En el rango entre 600 °C y 800 °C se produce la descarbonatación de los geopolímeros (como CaCO₃, K₂CO₃, Na₂CO₃) y suele presentarse en técnicas de síntesis que empleen hidróxido de sodio como agente alcalino activador dando pérdidas entre 1-2%. [49]. Finalmente, el residuo de cada muestra se tabuló para comparar la resistencia a la degradación térmica de las muestras a altas temperaturas y el material con mayores pérdidas fue la muestra G5-3. Esto sucedió debido a que la muestra ya había perdido gran contenido de agua y descarbonatación a temperaturas menores ya que al tener más cantidad de iones de sodio se necesitó más agua estructural (y concentración de carbonatos) para estabilizar el geopolímero [49].

Tabla 3.5. Resultados TGA de mezclas Primera etapa

Fuente: Elaboración propia

Muestra	Temperatura Ambiente-200 °C		200 °C-600 °C	600 °C – 800 °C		800 °C – 1000 °C
	% de pérdida de masa	T _{pico} (°C)	% de pérdida de masa	% de pérdida de mas	T _{pico} (°C)	Residuo (%)
G1-1	5,4 1,4	70,4 179,5	3,2	1,4	668,1	88,6
G2-3	5,1 1,0	53,1 177,0	3,0	1,8	669,6	89,1
G3-3	3,6 0,3	86,2 181,4	2,3	1,5	668,7	92,2
G4-3	7,0 1,2	63,0 177,7	3,2	1,6	675,1	86,5
G5-3	10,6	67,6	3,1	2,4	677,0	83,6

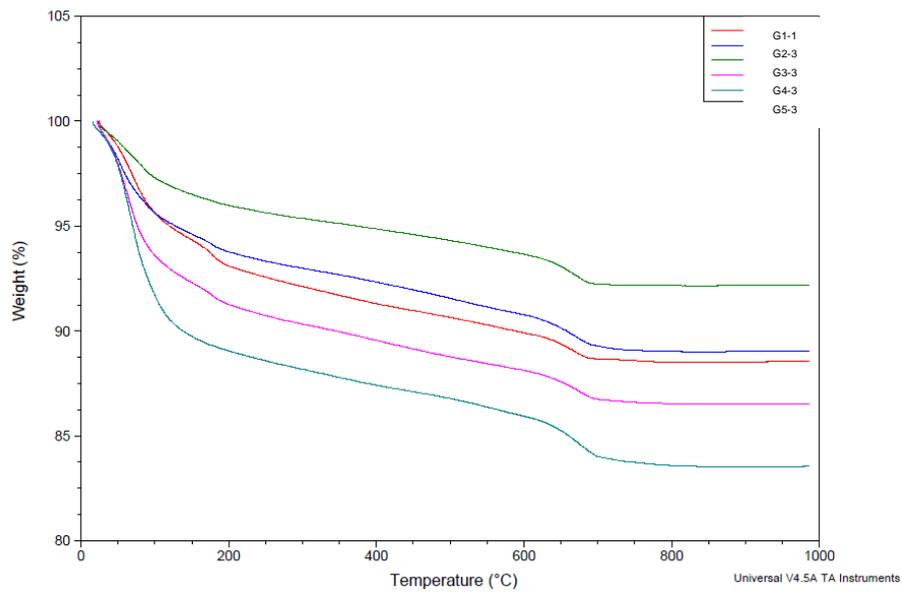


Figura 3.3. Resultado TGA primera etapa

Fuente: Elaboración propia

3.2.3 Análisis de XRD para Primera etapa

Tabla 3.6. Resultados XRD de mezclas primera etapa

Fuente: Elaboración propia

Muestra	Porcentaje de Fases Presentes					
	Cuarzo	Albita	Calcita	Modernita	Magnesio hornblende	Amorfo
G1-1	21,8	22	2,6	9,6	-	44,0
G2-3	14,0	28,1	1,9	8,5	-	47,3
G3-3	19,0	39,8	7,6	13	5,4	15,3
G4-3	14,9	24,6	2,6	3,2	20,1	34,6
G5-3	12,4	15,8	5,4	5,2	-	61,3

De acuerdo con el análisis de difracción de rayos X de las muestras, las fases presentes son cuarzo, albita, calcita, mordenita, magnesio hornblenda y el resto, material amorfo. El cuarzo está asociado a material de sílice que suele ser inerte durante la geopolimerización y está presente en la arena agregada a la mezcla del compuesto [50].

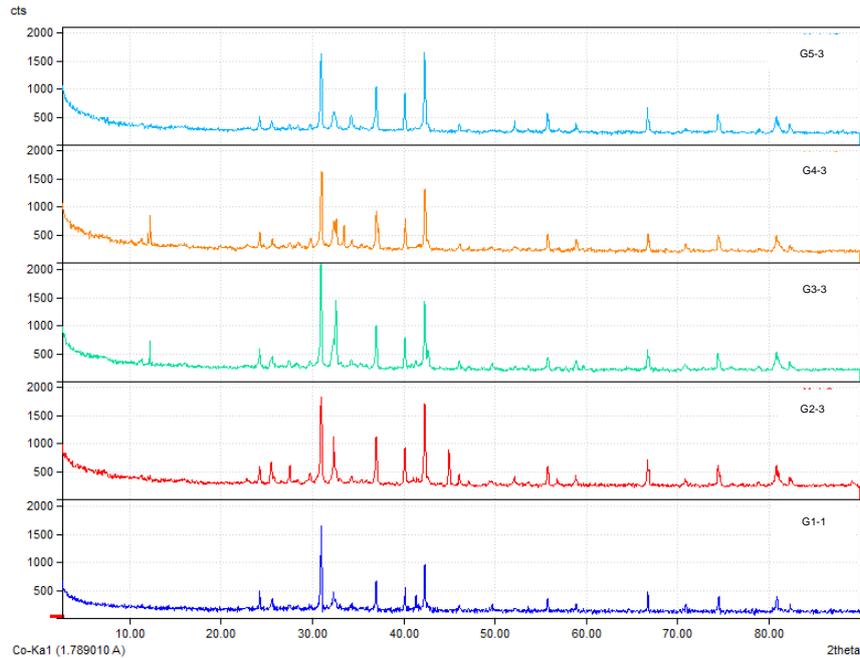


Figura 3.4. Resultado de ensayo XRD primera etapa

Fuente: Elaboración propia

La albita y la modernita son fases que contienen aluminosilicatos los cuales tienen la capacidad de geopolimerizarse en presencia del activador alcalino. La Tabla 3.6 indica que un aumento de la concentración de activador de 10 a 12 Molar junto a una ratio bajo de SS/SH, reducen la concentración de estas fases y mejora el proceso de geopolimerización [51]. Esto se corrobora teniendo en cuenta que la muestra G5-3 es más amorfa y representa el gel de aluminosilicatos de sodio hidratado. Por último, la fase magnesio-hornblende pertenece a un grupo de anfíboles cuya fórmula general es $(Ca,Na)_{2-3}(Mg,Fe,Al)_5(Al,Si)_8O_{22}(OH,F)_2$ y solo se presenta en la muestra G2-3 y G3-3.

3.3 Ensayo de flexión



Figura 3.5. Ensayo de Flexión de tres puntos (mezcla + fibra)

Fuente: Elaboración propia

Al añadir fibra aumenta la resistencia a la flexión y disminuye las micro fisuras generadas por fuerzas aplicadas [54]. La mezcla óptima que se obtuvo de acuerdo con los resultados obtenidos de la primera etapa corresponde a la mezcla G2. El diseño de material compuesto está dado por una matriz, que es la mezcla G2, y 3 porcentajes en volumen de fibra de PVA, de acuerdo con la Tabla 3.7. Para la etapa dos de la experimentación se llevó a cabo ensayos de fluidez en mezcla verde, ensayo de flexión a la mezcla ideal (G2) con diversos niveles de fibra. Las fibras de PVA presentan una longitud promedio de 12 mm y un diámetro de aproximadamente 39 μm de acuerdo con la ficha técnica.

Para el ensayo de flexión de acuerdo con la normativa NTE INEN 198, se realizó una muesca en la base inferior; es decir, opuesta al punto de aplicación de la carga central, como concentrador de esfuerzos. La distribución de las cargas durante el ensayo se observa en la Figura 3.5. El ensayo consta de dos puntos fijos inferiores conocidos como soportes o apoyos, que están separados una distancia de 120 mm entre ambos. El punto superior, móvil, aplica una carga descendente, en un punto equidistante entre los apoyos mencionados anteriormente. La mezcla que presentó la mejor fluidez en esta etapa, es mezcla G2 con 1% de fibra de PVA; es decir, la de menor porcentaje de todo el diseño experimental.

Tabla 3.7. Proporciones de las mezclas en la Segunda etapa (Fibra + Matriz)

Fuente: Elaboración propia

Porcentaje de fibra	Materiales	Valor	Unidades	Peso de matriz	Peso de fibra
1%V	Arena	369,7	g	772,2 g	7,8 g
	Caliza	30,8	g		
	Zeolita	215,7	g		
	SH	42,4	mL		
	SS	127,1	mL		
1,5 %V	Arena	367,4	g	768,3 g	11,7 g
	Caliza	30,6	g		
	Zeolita	214,3	g		
	SH	42,1	mL		
	SS	126,3	mL		
2%V	Arena	365,1	g	764,4 g	15,6 g
	Caliza	30,4	g		
	Zeolita	212,9	g		
	SH	41,8	mL		
	SS	125,5	mL		

Tabla 3.8. Resultados de trabajabilidad y de resistencia a la flexión para la segunda etapa con molde forma vigueta a 14 días de curado.

Fuente: Elaboración propia

Código	PVA	Nombre de muestra	Trabajabilidad	Promedio de trabajabilidad	Esfuerzo de Flexión	Promedio de esfuerzo flexión
G2. F	1 %V	G2.F-1%-1	1,2 cm	1,2 cm	1,4 MPa	1,2 MPa
		G2.F-1%-2	1,3 cm		1,3 MPa	
		G2.F-1%-3	1,1 cm		1,1 MPa	
	1,5 %V	G2.F-1,5%-1	0,9 cm	0,9 cm	1,5 MPa	1,3 MPa
		G2.F-1,5%-2	0,8 cm		1,4 MPa	
		G2.F-1,5%-3	1,0 cm		1,1 MPa	
	2 %V	G2.F-2%-1	0,8 cm	0,8 cm	1,4 MPa	1,4 MPa
		G2.F-2%-2	0,7 cm		1,4 MPa	
		G2.F-2%-3	0,8 cm		1,3 MPa	

La resistencia a la flexión de la muestra en forma de vigueta o prisma se calcula mediante la siguiente ecuación;

Ecuación 2. Cálculo de resistencia a la flexión

$$R_f = \frac{3 P_f l}{2 b^3} [57]$$

- R_f = Resistencia a la flexión, MPa
- P_f = Fuerza aplicada, N
- l = Distancia entre soporte o apoyo, mm
- b = Arista de área transversal del prisma, mm

La Tabla 3.8., indica los resultados de trabajabilidad que se obtuvieron de la mezcla óptima o G2 con diferentes porcentajes de volumen de fibra PVA. El ensayo de fluidez se realizó en métrica de mayores a 1 cm y menores a 5 cm entre diferencia de altura al realizar el ensayo en mezcla verde. Métricas definidas en Diseño Experimental segunda etapa, como resultado la muestra G2.F-1% presenta mayor fluidez. La adición de fibras poliméricas a una mezcla de geopolímeros puede reducir la fluidez de la mezcla debido al aumento de la viscosidad y la cohesión. Sin embargo, la elección adecuada de fibras poliméricas específicas puede permitir aumentar la fluidez de la mezcla sin comprometer su resistencia [55].

Para definir cuál de los tres porcentajes de volumen de fibra es la mezcla adecuada de acuerdo con los objetivos del experimento. Se realizó ensayo de flexión para muestras en forma de vigueta, de acuerdo con la Tabla 3.8. se tomó la muestra con mayor fluidez. El resultado correspondiente a la mezcla G2.F-1% fue de 1,2 MPa. Este valor de resistencia a la flexión para una muestra de geopolímero con fibra de refuerzo polimérica, indica una resistencia relativamente baja. Si hacemos referencia al estudio experimental de hormigón de Ortiz Lozano del año 2005, el resultado de este ensayo a las muestras fue de 4,9 MPa [56]. Por lo tanto, el valor obtenido con la mezcla G2.F-1% es deficiente por el valor de resistencia baja que se obtuvo. Los cálculos para determinar la resistencia a la flexión del material se realizaron mediante la aplicación de la Ecuación 2.

3.4 Ensayo de Tensión



Figura 3.6. Ensayo de Tensión (mezcla + fibra)

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de tensión mide la resistencia del material cuando una fuerza uniaxial es aplicada sobre el mismo. Para la realización de estos ensayos se adaptó una metodología basada en el trabajo de Yang [36] sobre el estudio en EGC. En materiales compuestos, la interacción entre las fibras y la matriz cementicia trabaja como elemento de refuerzo y mejoran las propiedades mecánicas del material. Al realizar el ensayo de fluidez o trabajabilidad, se obtuvo que la mezcla adecuada para el diseño del compuesto es la mezcla G2 con 1% de PVA.

Tabla 3.9. Resultados de trabajabilidad para la segunda etapa con molde forma lazo a 14 días de curado.

Fuente: Elaboración propia

Código	PVA	Nombre de muestra	Trabajabilidad	Resistencia a la Tensión	Deformación	Promedio de resistencia a la tensión	Promedio de deformación (%)
G2.T	1 %V	G2.T-1%-1	1,3 cm	0,7 MPa	0,9 mm	0,7 MPa	1,1 %
		G2.T-1%-2	1,2 cm	0,6 MPa	1,0 mm		
		G2.T-1%-3	1,2 cm	0,8 MPa	1,4 mm		
	1,5 %V	G2.T-1,5%-1	0,8 cm	0,4 MPa	0,4 mm	0,7 MPa	0,9 %
		G2.T-1,5%-2	0,8 cm	1,2 MPa	1,4 mm		
		G2.T-1,5%-3	1,1 cm	0,7 MPa	1,0 mm		
	2 %V	G2.T-2%-1	0,7 cm	1,2 MPa	1,4 mm	1,0 MPa	1,4%
		G2.T-2%-2	0,7 cm	0,8 MPa	0,9 mm		
		G2.T-2%-3	0,8 cm	0,9 MPa	1,8 mm		

La resistencia a la tensión y alargamiento máximo de la muestra en forma de lazo se calcula hasta la rotura de la muestra, mediante la siguiente ecuación correspondientemente;

Ecuación 3. Cálculo de resistencia a la tensión

$$R_t = \frac{P_t}{A_t} [36]$$

Ecuación 4. Deformación o alargamiento máximo

$$e = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100 [36]$$

- R_t = Resistencia a la tensión, MPa
- P_t = Fuerza axial aplicada, N
- A_t = Área de sección transversal en la parte central (menor), mm²
- e = Deformación, %
- l_0 = Longitud calibrada inicial en la muestra, mm
- l = Longitud calibrada después del ensayo, mm

La Tabla 3.9, se puede observar los resultados de trabajabilidad que es la capacidad de fluidez del material, por ende, es importante obtener buenos resultados de esta con el fin una óptima manipulación del material. Una trabajabilidad de 1,2 cm indica que la mezcla es bastante fluida y fácil de trabajar, lo que es importante para garantizar una buena colocación y compactación en la aplicación. Sin embargo, el aumento de porcentaje en volumen de la fibra puede mejorar la resistencia a la tracción de la mezcla, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones específicas.

De acuerdo al ensayo de trabajabilidad, la muestra que presenta mejor fluidez, es la mezcla G2 con un 1% de fibra de PVA. Asimismo, de acuerdo al ensayo de tensión se obtiene que esta mezcla tiene una resistencia a la tensión de 0,7 MPa y una deformación de 1,1%. Los resultados obtenidos por Yang [36] están en el rango entre 6,2 a 6,7 MPa. Por lo tanto, los resultados de este estudio podrían considerarse adecuados para aplicaciones en las cuales la resistencia mecánica no es el factor principal, como por ejemplo revestimientos o elementos no estructurales.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

Se diseñó un geopolímero a base de zeolitas naturales locales con propiedades aceptables de resistencia a la compresión, pero con limitado desempeño a la tensión. Por limitaciones de tiempo en el desarrollo de este proyecto el tiempo de curado máximo que se tuvo durante la experimentación fue de 14 días, lo que influye en los resultados mecánicos presentados en este estudio.

De acuerdo a los resultados de este estudio, la mezcla G2 es la idónea en base a su trabajabilidad y resistencia mecánica a la compresión. Esta mezcla, en la segunda etapa, fue optimizada al añadir fibras de PVA, siendo el 1% de PVA la composición más adecuada considerando, nuevamente, su trabajabilidad, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión.

Una resistencia mecánica a la compresión de 5,4 MPa es adecuada para aplicaciones en materiales de construcción no estructurales; es decir, aquellas en las que se requiere una resistencia mecánica moderada. De acuerdo con la normativa NTE INEN 2518, un mortero que soporta 5,2 MPa es clasificado como material para mampostería, dentro del segmento de materiales de construcción de muro portante para interiores, tipo "N". Se evidencia, a través de los resultados de este estudio, que la zeolita es una alternativa al uso de materiales cementicios, en las aplicaciones arriba descritas; ya que, presenta valores de resistencia a la compresión de 5,4 MPa.

Respecto a los ensayos de flexión y tensión, los resultados obtenidos fueron inferiores a los esperados. La mezcla G2 fue la de mejor desempeño en la primera etapa de la experimentación, con resultados de resistencia a la compresión aceptables para usos no estructurales de mampostería para interiores. Sin embargo, en la segunda etapa, y con la mezcla de mejor desempeño en lo que respecta a la trabajabilidad, (mezcla óptima: G2 con 1% (vol.) de fibra de PVA y curada a 7 días), la mejor resistencia a la flexión obtenida es de 1,2 MPa, de acuerdo con normativa NTE INEN 198; estos valores son un 82.0% inferiores los reportados para un mortero sin fibras de refuerzo [104]. Por otro lado, respecto a los resultados de tensión de esta mezcla, se obtuvieron valores de 0.7 MPa y 1.1 % de deformación, al ser ensayadas haciendo uso del método desarrollado

por Yang [36]. Se evidencia, que estos valores son 89.5% inferiores a los presentados en el mismo estudio, en lo que respecta a la resistencia a la tensión. Por lo antes expuesto, se concluye que el material desarrollado en este trabajo presenta propiedades no adecuadas para usos estructurales y se debe continuar investigando la manera de mejorar la interfaz fibra-matriz, de tal manera que el material compuesto pueda mejorar considerablemente sus propiedades mecánicas en tensión y/o flexión.

En este estudio preliminar se determina que la zeolita puede usarse como material en reemplazo del cemento tradicional para aplicaciones de muro portante o cementos para mampostería interiores. La zeolita es un material ecoamigable, que se lo encuentra en la naturaleza, y no requiere un consumo energético alto para su producción, como el cemento, su utilización deriva en la reducción de toneladas de CO₂ a la atmósfera originadas al producir cemento tradicional para construcción.

4.2 Recomendaciones

1. Tomar entre 4 a 6 minutos de mezclado con la parte de mezcla añadida la fibra polimérica, para una mejor adherencia entre componentes o materiales de fabricación.
2. Colocar primero la arena para que se pueda mezclar los sólidos adecuadamente, debido a que la zeolita y la caliza son muy finas y pueden quedarse en las paredes del recipiente.
3. Mezclar los líquidos siempre el de menor densidad sobre el de mayor densidad para que no se pierda material del líquido más denso en las paredes de envase a mezclar.
4. Usar una mesa vibracional para ensayos de trabajabilidad de acuerdo bajo normativa ASTM C109.
5. Se recomienda realizar un análisis más detallado como; adherencia, humedad, durabilidad, etc. Consultar las normativas y estándares aplicables para determinar la idoneidad del mortero de geopolímero en una aplicación estructural o no estructural específica.
6. Es esencial evaluar que el material pueda cumplir con las normas locales de construcción y realizar pruebas adicionales según sea necesario para garantizar que el material cumpla con los requisitos de rendimiento específicos para su aplicación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Martínez López, « Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland.,» *Maestría en Ingeniería Ambiental.*, 2015.
- [2] M. J. & B. V. M. A. Leguizamón Álvarez, «Estudio de las propiedades mecánicas que presenta un concreto geopolimero a base de ceniza de cascarilla de arroz producida en el departamento del Meta y reforzado con fibra de acero.,» 2020.
- [3] J. L. & v. D. J. S. Provis, 2014.
- [4] Y. E. & F. V. L. A. Esguerra Torres, «Caracterización de propiedades mecánicas de fibras naturales para usos en concretos hidráulicos,» 2020.
- [5] A. A.-H. M. A.-H. S. A.-J. S. Al-Jabri, «"Efecto del tipo y contenido de fibra en las propiedades de los compuestos de geopolímero",» *Journal of Materials Science*, p. p. 183–193, 2015.
- [6] H. Z. M. Z. Yi Wang, «Experimental study on static and dynamic properties of fly ash-slag based,» 2022.
- [7] Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Ecuador , «"Informe Nacional de Calidad de Materiales de Construcción",» 2018. [En línea]. Available: https://www.mvotma.gub.uy/sites/default/files/documentos/informe_nacional_calidad_materiales_construccion_ecuador.
- [8] Wikiwand, «Wikiwand,» 16 04 2016. [En línea]. Available: https://www.wikiwand.com/es/Terremoto_de_Ecuador_de_2016.
- [9] R. V. E. Salcedo, «ZEOLITA NATURAL,» <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32000> , 2018.
- [10] BS Yilmaz, «"Poli(acetato de vinilo) (PVA) y sus derivados: Síntesis, propiedades y aplicaciones",» *Journal of Applied Polymer Science*, p. 135(29):46289, 2018.
- [11] JG Sanjuán, «"Conglomerantes activados por álcalis: pasado, presente y futuro",» *Cement and Concrete Research* , pp. 40(4): 470-491, 2010.
- [12] Pintos y Freire, «Geopolímeros celulares: desarrollo de hormigones ligeros ecológicos sin cemento (proyecto GEOCEL),» 2019.

- [13] P. N. E. Calderon, «“CARACTERIZACIÓN DE MORTEROS GEOPOLIMÉRICOS SINTETIZADOS POR ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZA VOLCÁNICA Y AGREGADOS FINOS”,» 2022.
- [14] R. E. & G. T. A. E. Murillo Alarcón, «Síntesis y caracterización de la cinética de la reacción, propiedades de resistencia mecánica y conductividad térmica de un geopolímero formado por activación alcalina de zeolita natural ecuatoria,» Bachelor's thesis, ESPO. FCNM, Guayaquil, 2017.
- [15] S. A.-H. A. A.-H. M. A.-J. S. Al-Jabri, «"Efecto de las zeolitas naturales en las propiedades de los compuestos de geopolímero",» *Journal of Materials Science*, p. 50(5) : 1819–1828, 2015.
- [16] J. Davidovits, « "Geopolímeros: nuevos materiales poliméricos inorgánicos",» *Revista de análisis térmico*, pp. 1633-1656, 1991.
- [17] S. Areas, «FABRICACIÓN DE GEOPOLÍMEROS A PARTIR DE RELAVES MINEROS: UNA SOLUCIÓN SOCIO AMBIENTAL,» <https://revistaanova.wixsite.com/anova/copia-de-sistema-de-aprovechamiento>, 2021.
- [18] J. L. & v. D. J. S. J. Provis, «Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications,» *Woodhead Publishing*, 2014.
- [19] C. E. Vega, «“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS BASE METACAOLÍN Y EL EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE SÍLICE GEOTÉRMICA”,» 2010.
- [20] H. M. E. Valenzuela, «ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL,» 2013.
- [21] G. J. Brigolini, «Geopolímeros na construção: aglomerantes sustentáveis.,» 2016. [En línea].
- [22] J. Davidovits, «"Química y aplicaciones de geopolímeros",» *Journal of Materials Science*, p. 43 (19): 3923–3932, 2008.
- [23] J. Davidovits, «"Química y aplicaciones de geopolímeros",» *Journal of Materials Science*, p. 43 (19): 3923–3932, 2008.

- [24] J. Davidovits, «"Geopolímeros: nuevos materiales poliméricos inorgánicos",» *Journal of Thermal Analysis*, p. 37 (8): 1633–1656, 1991.
- [25] M. d. V. y. U. Urbanismo, «"Estudio de la calidad de los materiales de construcción en el Ecuador",» Quito, 2016.
- [26] R. O. ARB de Assis, «"Propiedades de los compuestos geopoliméricos reforzados con polietileno",» *Journal of Materials Science*, p. 53(22): 15581–15588, 2018.
- [27] Jingming Cai, «Comportamientos de impacto del compuesto de geopolímero diseñado expuesto a temperaturas elevadas,» 2021.
- [28] y. Y. Z. Rawat, «Optimización de respuesta múltiple de compuesto cementoso de ingeniería de fibra híbrida utilizando el método Grey-Taguchi y el concepto de utilidad,» Elsevier, 2022.
- [29] A. C. Constâncio Trindade, «Comportamiento a la tracción de compuestos de geopolímero endurecidos por deformación (SHGC) bajo carga de impacto,» 2020.
- [30] Y. Valenzuela, «"ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN TRADICIONAL, CON HORMIGÓN AL EMPLEAR ZEOLITA NATURAL EN REEMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO.",» <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/25828/1/Tesis%201142%20-%20Valenzuela%20Romero%20Yadira%20Guadalupe.pdf>, 2017.
- [31] H. Gutiérrez Pulido, «Análisis y diseño de experimentos,» 2012.
- [32] Davidovits, «"Tecnología de geopolímeros: una revisión del pasado y una mirada al futuro",» *Journal of Materials Science*, 2008.
- [33] I. E. d. Normalización, «Instituto Ecuatoriano de Normalización,» 18 01 2009. [En línea]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2502.pdf>.
- [34] I. E. d. Normalización, «Instituto Ecuatoriano de Normalización,» 22 11 2009. [En línea]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/488.pdf>.
- [35] M. H. Alvarez, «SINTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECHANICAS DE GEOPOLIMEROS A PARTIR DE PUZOLANA PARA SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA,» 2010.

- [36] E. H. W. S. Y. Y. & L. V. C. Yang, «Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites,» *Journal of advanced concrete technology* , vol. 6(1), pp. 181-193, 2008.
- [37] E. J. Barbero, «Introduction to composite materials design,» *CRC press*, 2010.
- [38] S. H. P. W. C. & B. M. S. Kosmatka, «Diseño y control de mezclas de concreto,» *Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto*, 1992.
- [39] Norma tecnica ecuatoriana, «Cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50 mm de arista,» First Edition, Guayaquil, 2009.
- [40] A. D. A. & M. S. harma, «Effect of curing on compressive strength of clay bricks,» *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 8(5), pp. 914-919, 2015.
- [41] J. L. X. Z. S. & M. G. Xiao, « A comprehensive experimental study on the compressive behavior of recycled aggregate concrete,» *Construction and Building Materials*, nº 120567, p. 262, 2020.
- [42] R. K. R. S. T. N. & K. P. Kumar, « An experimental investigation on compressive strength of brick aggregate concrete,» *International Journal of Innovative Research in Science.Engineering and Technology* , vol. 5, nº 10, pp. 17776-17782, 2016.
- [43] R. L. J. L. Y. L. L. L. G. & L. Q. Yin, «Comprehensive utilization of high calcium,» 2017.
- [44] J. L. & v. D. J. S. Provis, «Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications,» *Woodhead Publishing*, 2014.
- [45] M. K. a. W. M. Rožek, «“Spectroscopic studies of fly ash-based geopolymers,”,» *Spectrochim. Acta - Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 198, pp. 283–289, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.saa.2018.03.034., 2018.
- [46] E. M. a. E. S. Z. Bravo, « “Estudio de Geopolímeros basados en Zeolitas Naturales del Ecuador: Aplicaciones a eficiencia energética en construcciones en climas tropicales,”,» p. 125, 2004.
- [47] H. B. M. H. C. A. R. C. P. a. J. L. V. Ulloa, « “Application-oriented mix design optimization and characterization of zeolite-based geopolymer mortars,”,» *Constr. Build. Mater.*, vol. 174, pp. 138–149, doi: 1, 2018.

- [48] A. Nikolov, I. Rostovsky, and H. Nugteren, «“Geopolymer materials based on natural zeolite,” vol. 6, doi: 10.1016/j.cscm.2017.03.001.,» *Case Stud. Constr. Mater.*, p. pp. 198–205, 2017.
- [49] Lynch, H. Baykara, M. Cornejo, G. Soriano, and N. A. Ulloa, «“Preparation, characterization, and determination of mechanical and thermal stability of natural zeolite-based foamed geopolymers,”», *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 448–456, May, 2019.
- [50] B. M. Yousefi, «“Effects of free quartz on mechanical behaviour of kaolinite based geopolymers.,» ” <http://dx.doi.org/10.1179/175355510X12881754762737>, vol. 26, no. 2, pp. 96–99, Apr. 2013, doi: 10.1179/175355510X12881754762737., 2013.
- [51] e. Abdollahnejad, «“Microstructural Analysis and Strength Development of One-Part Alkali-Activated Slag/Ceramic Binders Under Different Curing Regimes,”», *Waste and Biomass Valorization*, vol. 11, no. 6, pp. 3081–3096, , doi: 10.1007/s12649-019, 2020.
- [52] R. C. Hibbeler, «Mechanics of Materials,» *Pearson*, vol. 10th ed., 2017.
- [53] W. D. & R. D. G. Callister, «Materials Science and Engineering: An Introduction John Wiley & Sons.,» vol. 10th ed., 2018.
- [54] Yang, E. H., Wang, S., Yang, Y., & Li, V. C., Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites. 6(1), 181-193., *Journal of advanced concrete technology*,, (2008).
- [55] A. M. Rashad, «"Geopolymer Concrete with Fiber Reinforcement: A Review.",» *Construction and Building Materials* , Vols. %1 de %2vol. 235, 117395, 2020.
- [56] J. A. Ortiz Lozano, «Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado,» *Universitat Politècnica de Catalunya*, 2005.
- [57] PNUMA, «Desafío para la comunidad,» 2020.
- [58] A. B. D. Luz, «Zeólitas: propiedades e usos industriais.,» 1994.
- [59] G. Chicaiza Aguilar, «Repercusiones de la aprobación de la Ley de Minería.,» *Vigencia y garantía de los derechos colectivos y ambientales en el Ecuador 2009.*, 2010.

- [60] W. P. Puentestar Silva, «La problemática ambiental y el deterioro de los recursos naturales en el Ecuador.,» *Una perspectiva desde la geografía (Bachelor's thesis, PUCE).*, 2015.
- [61] R. Villalobos, «REESCRIBIENDO LA HISTORIA; DESDE LA CIENCIA Y DESDE LA HEREJÍA. 2.- La Ciencia.,» 2020.
- [62] L. Á. Villamar, «Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz.,» 2016.
- [63] C. P. A. Ramírez, «Geopolimeros,» 2020.
- [64] R. M. J. Bastidas, «“Estudio de geopolímeros basados en zeolitas naturales del Ecuador: Aplicaciones a eficiencia energética en construcciones en climas tropicales”.,» 2013.
- [65] L. Kan, «Development and characterization of fly ash based PVA fiber reinforced Engineered Geopolymer Composites incorporating metakaolin,» https://espolectmy.sharepoint.com/personal/marfluca_espolec_edu_ec/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal, 2020.
- [66] L. A. L. Pulido y G. A. J. Rodriguez, «EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL CONCRETO OBTENIDO A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE CENIZA VOLANTE,» 2020.
- [67] Arconel, «Ecuador posee un 51,78% de energía renovable,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/ecuador-posee-un-5155-de-energia-renovable/>.
- [68] ASKA, «POWER GENERATION,» [En línea]. Available: <https://www.aksa.com.tr/es-es/kojenerasyon-trijenerasyon>.
- [69] d. Fraile, «EOI,» COGENERACION ASPECTOS TECNOLOGICOS, [En línea]. Available: <file:///C:/Users/Global%20Technology%20Ec/Downloads/componente45275.pdf>.
- [70] I. Dincer, «Integrated Absortion Refrigeration Systems».
- [71] U. N. E. P. a. I. E. Agency, «<https://wedocs.unep.org/>,» 17 Julio 2020. [En línea]. Available: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/33094/CoolRep.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

- [72] L. Riahi, «<https://www.districtenergyinitiative.org/>,» 2 junio 2015. [En línea]. Available:
<https://www.districtenergyinitiative.org/sites/default/files/publications/desexec-sumespweb-version-30052017135.pdf>.
- [73] T. A. H. Ibrahim Dincer, «Integrated Absorption Refrigeration Systems,» Springer International Publishing Switzerland , Switzerland, 2016.
- [74] D. Fraile, «Cogeneración: Aspectos tecnológicos,» EOI, Madrid, 2008.
- [75] American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., ASHRAE HANDBOOK FUNDAMENTALS, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., 2009.
- [76] M. Á. M. Sarmiento, «Departamento de Ingeniería Mecánica,» julio 2011. [En línea]. Available:
[file:///C:/Users/Global%20Technology%20Ec/Downloads/M.%20Marim%C3%B3nTesis%20\(1\)%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Global%20Technology%20Ec/Downloads/M.%20Marim%C3%B3nTesis%20(1)%20(1).pdf).
- [77] U. o. T. Faculty of Mechanical Engineering, «Modeling water lithium bromide absorption chiller with a heat exchanger in EES and ASPEN Plus,» Engineering, Science and technology, Istanbul Turkey, 2015.
- [78] U. o. T. Faculty of Mechanical Engineering, «Modeling water lithium bromide absorption chiller with a heat exchanger in EES and ASPEN Plus,» engineering, science and technology, Istanbul Turkey 21, 2015.
- [79] A. R. V. Perez, «tesis de ingenieros mecanicos,» 1 abril 2011. [En línea]. Available:
[file:///C:/Users/Global%20Technology%20Ec/Downloads/99383%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/Global%20Technology%20Ec/Downloads/99383%20(3).pdf).
- [80] A. p. G. f. E. i. E. a. D. Economies, «Cogeneration & Trigeneration – How to Produce Energy Efficiently,» de *Cogeneration & Trigeneration – How to Produce Energy Efficiently*, giz, 2011, p. 144.
- [81] R. Schroer, «Energía distrital y cogeneración,» *giz*, p. 17, 2009.
- [82] R. J. L. Picón, «Una apuesta de sostenibilidad urbana,» *Los distritos termicos* , p. 32, 2010.
- [83] J. homepage, «A new biogas-fueled bi-evaporator electricity/cooling cogeneration system: Exergoeconomic optimization,» *ELSEVIER*, p. 15, 2019.

- [84] s. f. buildings, «Energy,» 19 FEBRERO 2009. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/energy.
- [85] M. Jalalizadeh, «Dynamic simulation of a trigeneration system using an absorption cooling,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.elsevier.com/locate/job>.
- [86] O. K. Singh, «Renewable Energy,» 23 ABRIL 2019. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/renene.
- [87] H. Wang, «Energy Conversion and Management,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enconman.
- [88] Z. Han, «Energy Conversion and Management,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enconman.
- [89] D. Roy, «Energy Conversion and Management,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enconman.
- [90] Z. Han, «Energy Conversion and Management,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enconman.
- [91] M. H. Seyyedvalilu, «Energy,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/energy.
- [92] D. Roy, «Energy Conversion and Management,» 2021. [En línea]. Available: www.elsevier.com/locate/enconman.
- [93] Corfo, Manual de Desarrollo de proyectos, Energia Distrital, Santiago de Chile : EBP, 2018.
- [94] Ecoelectric, Memoria de sostenibilidad, unidad de negocio agrícola, los ríos : Memoria de sostenibilidad , 2019.
- [95] I. Valdez, «Ecoelectric-Valdez bagasse cogeneration plant,» CDM – Executive Board, Los Ríos , 2014.
- [96] V. O. f. t. P. R. C. o. t. C. P. Activity, «Permanent changes from registered Monitoring Plan “Ecoelectric- Valdez bagasse cogeneration plant”,» 2011.
- [97] R. Ricaurte, «ANÁLISIS Y MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA UNIVERSIDAD UBICADA EN LA PROVINCIA DEL GUAYAS”,» ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, Guayaquil, 2021.
- [98] D. J. Nieves, «ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS PARA DISMINUIR LA TEMPERATURA DEL AIRE EN INFLUENCIA DE INDICADORES ENERGETICOS,» C A R T A G E N A, 2011.

- [99] C. G. Vallecillo, Protocolo de Kioto, Madrid. España: WWF, 2012.
- [100] PNUMA, «Energía de distrito en las ciudades,» Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Dinamarca, 2015.
- [101] DFIC, *Cogeneration & Trigeneration*, Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2016.
- [102] IPCC, «Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático,» Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Alemania, 2011.
- [103] A. A.-H. M. A.-H. S. A.-J. (SS Al-Jabri, «"Efecto del tipo y contenido de fibra en las propiedades de los compuestos de geopolímero",» *Journal of Materials Science*, p. 183–193, 2015.
- [104] A. L. Neira Medina, «Efecto de la mezcla de micro-fibrasy macro-fibras poliméricas en el comportamiento a flexión y compresión del UHPFRC,» *Doctoral dissertation, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*, 2020.
- [105] A. A.-H. M. A.-H. S. A.-J. SS Al-Jabri, « "Efecto del tipo y contenido de fibra en las propiedades de los compuestos de geopolímero",» *Journal of Materials Science*, p. 50 (1): 183–193, 2015.
- [106] J. Davidovits, «"Geopolímero, Fundamentos y Aplicaciones",» 2008.
- [107] D. Montgomery, «Diseño y analysis de experimentos,» México , 2004.
- [108] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Wiley (9th ed.), 2017.
- [109] J. V. R. A. & W. R. Temuujin, « Influence of synthesis parameters on the mechanical properties of sodium silicate-based geopolymer,» *Journal of Materials*, Vols. %1 de %2Processing Technology, 209(13), pp. 5412-5417, 2009.
- [110] F. P. J. E. R. D. J. T. & M. D. F. Beer, «Mechanics of Materials,» *McGraw-Hill Education*, vol. (7th ed.), 2014.

APÉNDICES

APÉNDICE A

RECONOCIMIENTO DE RESPONSABILIDADES ÉTICAS Y PROFESIONALES PARA EL PROYECTO DE MATERIA INTEGRADORA

La identificación del problema, sus factores críticos desde el punto de vista ético y el impacto de estos en la sociedad, considerando el contexto actual y futuro del problema.

Actualmente las industrias buscan innovar con morteros dúctiles para procesos de construcción. Estos con fines estructurales para soportar cargas sísmicas, la creación de geopolímeros a base de zeolitas naturales tiene propiedades de altas resistencias las cuales se pueden usar como agentes cementantes. La ductilidad y rigidez de los materiales son características importantes en la construcción debido a las diferentes cargas o fuerzas aplicadas, como tensión, flexión y compresión que estas sufran y así poder tener un mejor desempeño. En los eventos sísmicos son modelados por cargas cíclicas por lo cual se enfoca el proyecto, se busca que resista estas clases de cargas, por otro lado, al ser de un material netamente orgánico como es la zeolita su impacto ambiental es menor al de otros materiales usados para las industrias constructoras.

Factores críticos:

- Impacto ambiental

El programa de las naciones unidas para el medio ambiente (PNUMA) [58], se encarga de estudiar las diferentes opciones de uso para disminuir las emisiones de CO₂. La Zeolita es un material local ubicado en la cordillera Colon Colonche y natural. Si la zeolita es usada como materia prima en la fabricación de materiales para uso de construcción, este material presenta menores tasas de emisiones de CO₂ comparado con otros materiales. Lo que genera un gran aporte y ayuda al medio ambiente en la innovación y cuidado del planeta.

La industria del cemento con la complementación de nuevos materiales ecológicos y naturales reduciría emisiones globales de dióxido de carbono considerablemente para poder contrarrestar el calentamiento global. Por lo tanto, sería de manera emergente que los países que producen mayor cantidad de CO₂ como son; Estados Unidos y China

implemente en su industria la elaboración de materiales hechos a base de manera ecológica y natural como es la Zeolita.

El reconocimiento de las partes interesadas, directas e indirectas, y sus roles. Además, en caso de aplicar, debe constar claramente los responsables de tomar un cargo o una decisión alrededor del dilema ético identificado.

Dilema ético

El alcance del proyecto es poder brindar o promover la incorporación de materiales alternativos obtenidos de forma ecológica y local que es la Zeolita con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ presente en la elaboración o manufactura de agentes cementantes, esto como una alternativa ecológica para la elaboración de materiales con usos para la construcción. [59] Al ser un producto natural debemos tener en cuenta que se está afectando a la diversidad del lugares donde se extrae estos materiales , a su vez a la gente que vive alrededor de estas tierras pudiendo contaminar de alguna forma con metales pesados para la extracción, ya sea en la comida o en el agua que estas aldeaños consumen , por lo tanto se presenta el dilema de que se previene por un lado la contaminación pero se puede destruir lugares que son ricos en nutrientes naturales y minerales en tierra rica de estos materiales.

Partes interesadas

Directas:

- Productores de agentes cementantes.
- Compañías que se encarguen en la explotación de la Zeolita.
- Habitantes de las zonas cerca de las excavaciones o minas de extracción de zeolita.

Indirectas:

- Gobierno central, municipio, y gobiernos locales: encargados de administrar agua, tierras y gestionar el desarrollo de la industria minera para controlar la contaminación por minería y excavaciones etc.

Los responsables como definidor para este dilema ético es el ministerio del medio ambiente Ecuador, que se encarga de las normas a cumplir dentro del territorio nacional con regulaciones y reglamentos. La ley para la minería emitida por el gobierno nacional

tiene como la responsabilidad, los atributos de las tierras, distribución de manera correcta y regulaciones para contrarrestar a las contaminaciones [60].

Una discriminación adecuada de las posibles soluciones, considerando el impacto a corto y largo plazo, en contextos ambientales, sociales, económicos y globales. En caso de que las posibles soluciones presenten el mismo impacto en todos los aspectos no técnicos, se deberá presentar alternativas de acción a ejecutar para contrarrestar los impactos negativos de la solución elegida.

En este caso se propuso una mezcla de Zeolita, caliza, arena y agente alcalinos para la activación en la geopolimerización adicionando fibras poliméricas, en resultados presenta una ductilidad de mayor a 0,90 MPa y una rigidez de aproximadamente 1,5 MPa. Lo cual lo hace muy bueno para resistir cargas de compresión, para compuestos no estructurales, es decir que contribuye a evitar la formación de microfisuras. Por la adherencia que presenta entre la fibra y la matriz de refuerzo.

A largo plazo:

Entre las más principales es de reducir al máximo la emisión de gases de efecto invernadero que tanto daño le hace al planeta, y también tratar de mejorar o igualar a un menor costo las mismas características mecánicas del cemento como son la ductilidad y rigidez. Por lo tanto, solo se debería de tener cuidado en lo que es la extracción para no perjudicar de manera grave a las tierras o aguas ya que el extraer estos elementos se puede perjudicar las partes aledañas. Para futuros usos en la explotación de este geopolímero se proyecta que sea de manera moderada y realizando inspecciones por experto para que sea controlado y no se dé una sobreexplotación de un recurso natural local.

A corto plazo:

Regularizar su uso de manera controlada. Conforme a la Zeolita podemos descubrir que no está siendo explotada de manera abundante, como es por ejemplo el concreto. Por lo tanto, debemos aprovechar ese recurso ya que tenemos la ventaja que es un producto que se encuentra de manera local, presente en las cordilleras Colón Colonche y no hay necesidad de importar este producto lo cual lo hace de bajo impacto económico en ese aspecto [61].

APÉNDICE B



Puesta de mezcla en molde forma de cubo.

Fuente: Elaboración propia



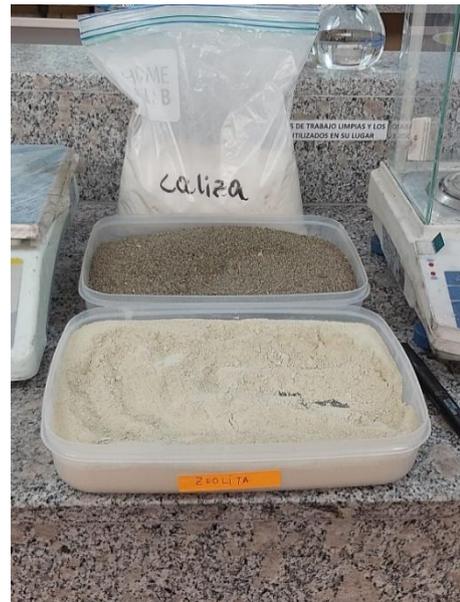
Mezcla en seco de arena, caliza y zeolita

Fuente: Elaboración propia

	Gr		ml		24 h
	Caliza	Zeolita	SH	SS	T °C
1	5.2 $\times 3$ 15.6	98.8 $\times 3$ 296.4	18.2 $\times 3$ 54.6	48.2 $\times 3$ 144.6	60
2	10.4 $\times 3$ 31.2	93.6 $\times 3$ 280.8	14.3 $\times 3$ 42.9	42.9 $\times 3$ 128.7	60
3	3.71 $\times 3$ 11.13	70.57 $\times 3$ 211.8	6.5 $\times 3$ 19.5	19.5 $\times 3$ 58.5	80

Cálculos obtenidos para primera etapa

Fuente: Elaboración propia



Materiales (zeolita, arena y caliza)

Fuente: Elaboración propia



Muestras de la etapa 3, en forma de lazo

Fuente: Elaboración propia



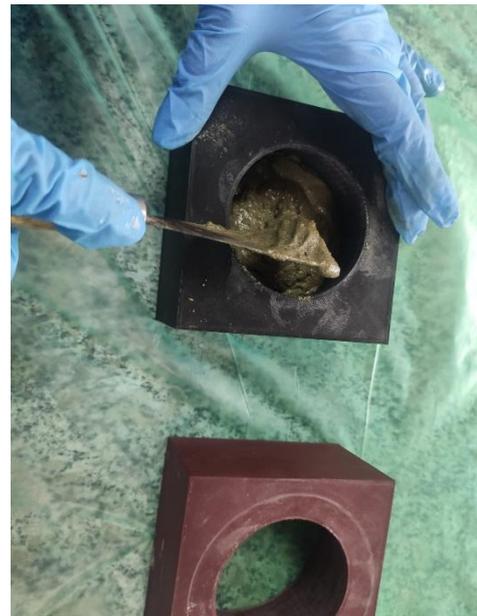
**Muestra en forma de lazo pulida por lija
320 granos por plancha.**

Fuente: Elaboración propia



**Materiales de polvo y activadores
(Silicato de sodio y hidróxido de sodio)**

Fuente: Elaboración propia



**Puesta de mezcla en crudo en molde
para medir fluidez.**

Fuente: Elaboración propia



Ensayo de compresión en laboratorio

ESPOL

Fuente: Elaboración propia



Ensayo de trabajabilidad primera etapa

Fuente: Elaboración propia



Mezclado de materia prima con ayuda de mezcladora Cole-Parmer

Fuente: Elaboración propia



Preparación de molde para ensayo de trabajabilidad

Fuente: Elaboración propia



**Muestras para ensayo de compresión,
primera etapa**

Fuente: Elaboración propia



**Muestras en forma vigueta, segunda
etapa**

Fuente: Elaboración propia



**Mezclado de activadores (Silicato de
sodio y hidróxido de sodio)**

Fuente: Elaboración propia



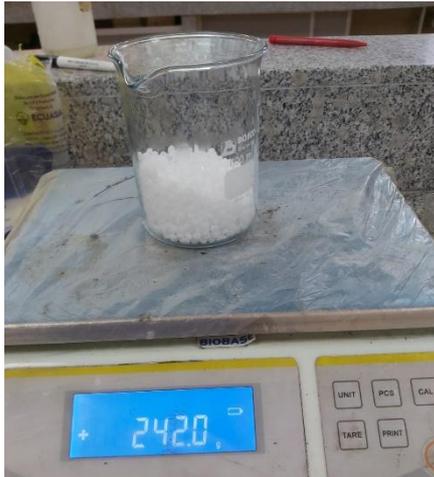
**Ensayo de trabajabilidad para segunda
etapa con fibra de PVA 2%**

Fuente: Elaboración propia



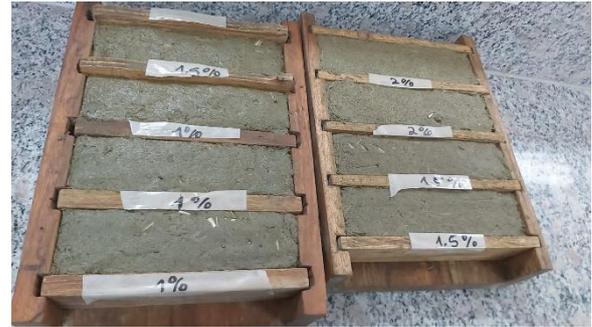
**Ensayo de trabajabilidad tercera etapa
con fibra de PVA al 1%**

Fuente: Elaboración propia



Cantidad de hidróxido de sodio, mediante balanza analítica biobase

Fuente: Elaboración propia



Probeta en crudo, molde en forma de vigueta para segunda etapa

Fuente: Elaboración propia



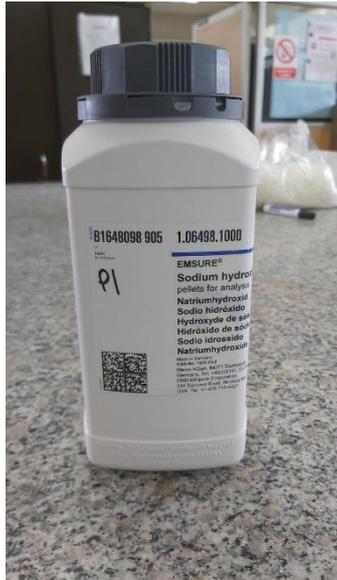
Desmolde de probetas en forma de cubo, primera etapa

Fuente: Elaboración propia



Muestra de Caliza

Fuente: Elaboración propia



Muestra de Hidróxido de sodio

Fuente: Elaboración propia



Muestra de zeolita fina

Fuente: Elaboración propia