

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

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

Diseño de materiales compuestos de cemento híbrido fabricados  
a base de zeolitas naturales y fibras sintéticas

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingenieras en Materiales**

Presentado por:

María Ángeles Franco Lucas

Georgina Patricia Macías Ortega

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2022

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres, Juan Carlos y Verónica, quienes a distancia me han brindado su apoyo incondicional durante mis años de estudio. A mi hermano John, quien está comenzando su etapa universitaria.

A mis amigos Bryan, Julio, Georgina, Natalia, Joshua y Ariel, por ser parte de cada desvelo, sacrificio, buenos y malos momentos. Por ser mi familia guayaca.

A los futuros ingenieros en materiales del país: ¡No se rindan, tenemos las herramientas para hacer ciencia, innovar y transformar la industria!

María Ángeles Franco

## DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a Dios por su guía, fortaleza y sabiduría a lo largo de mi carrera universitaria.

A mis padres Simón y Norma, por su amor, compromiso, esfuerzo, paciencia y perseverancia.

A mis hermanos Simón, Kimberly, Genesis, Sofía, Dayana e Israel por su apoyo incondicional, palabras de aliento y consejos para cumplir mis objetivos planteados.

A mi esposo Walter Mora por su amor y apoyo incondicional a lo largo de este proceso. A mi bebé Joaquín por su compañía en mis largas noches de estudio y por ser mi inspiración para no rendirme nunca.

Georgina Macías

# AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a Dios por brindarnos la sabiduría necesaria para llevar a cabo este proyecto y por su fidelidad a lo largo de nuestras carreras.

Agradecemos a los docentes, personal de apoyo y coordinadores de la carrera de Ingeniería en Materiales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral por su guía constante y sus enseñanzas valiosas que nos permitieron convertirnos en profesionales íntegras y capaces de aportar en la industria en cuanto a innovación, sostenibilidad y equidad.

Finalmente, agradecemos al Dr. Mauricio Cornejo, tutor de este proyecto, quien con su dirección, conocimiento, colaboración e investigación supo guiarnos para cumplir los objetivos planteados.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; María Ángeles Franco Lucas y Georgina Patricia Macías Ortega damos nuestro 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".

  
María Ángeles Franco

  
Georgina Macías Ortega

## **EVALUADORES**

---

**Dr. Clotario Tapia Bastidas**  
PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Dr. Mauricio Cornejo Martínez**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Los materiales de construcción con fines estructurales hechos a base de cemento presentan una ductilidad de 0.1%, además de la excesiva contaminación de la industria del cemento, que en 2010 llegó a 2800 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>. Por esto, se planteó diseñar un compuesto de cemento híbrido a base de zeolitas naturales y fibras de PVA que presenten ductilidad mayor a 5% a los 28 días.

Este proyecto se desarrolló en tres fases. En la primera fase, se implementó la metodología de Taguchi con cuatro factores de control (arena/aglutinante, agua/aglutinante, %MgSO<sub>4</sub>, %NaOH) a tres niveles obteniendo 9 combinaciones con 3 repeticiones cada una. Las variables de salida evaluadas fueron la trabajabilidad y resistencia a la compresión. Con la combinación óptima, en la segunda fase se desarrollaron 12 combinaciones diferentes con 2 factores de control (agua/aglutinante, %superplastificante) obteniendo el porcentaje de superplastificante policarboxílico para la matriz anterior. Finalmente, en la tercera fase se realizaron 3 combinaciones con fibras de PVA entre 1% 1.5% y 2% con 3 repeticiones. Los ensayos fueron realizados bajo las normativas ASTM C109 y ASTM C143.

En los resultados obtenidos se obtuvo una ductilidad de 1,32%. En conclusión, se diseñó el material compuesto en base a zeolitas naturales reforzado con fibras de PVA obteniendo una combinación óptima con 32.9 wt.% de zeolita y 15 wt. % en cemento. Se concluye que el porcentaje de superplastificante no influye significativamente en la trabajabilidad y que el porcentaje de fibras de PVA óptimo es de 1.5% generando.

**Palabras claves:** cemento, zeolitas naturales, PVA, ductilidad.

## **ABSTRACT**

*Cement-based construction materials for structural purposes have a ductility of 0.1%, in addition to excessive pollution from the cement industry, which in 2010 reached 2.8 billion tons of CO<sub>2</sub> emissions. For this reason, it is proposed to design a hybrid cement compound based on natural zeolites and PVA fibers that present ductility greater than 5% at 28 days. This project was developed in three phases. In the first phase, the Taguchi methodology was implemented with four control factors (sand/binder, water/binder, %MgSO<sub>4</sub>, %NaOH) at three levels, obtaining 9 combinations with 3 repetitions each. The output variables evaluated were workability and compressive strength. With the optimal combination, 12 different combinations with 2 control factors (water/binder, %superplasticizer) were developed, obtaining the percentage of polycarboxylic superplasticizer for the previous matrix. Finally, in the third phase, 3 combinations were made with PVA fibers between 1%, 1.5% and 2% with 3 repetitions. The tests were carried out under the standards ASTM C109, (paper\*\*) and ASTM C143.*

*In the results obtained, a ductility of 1.32% was obtained. In conclusion, the composite material is designed based on natural zeolites reinforced with PVA fibers, obtaining an optimal combination with 32.9 wt.% of zeolite and 15 wt.% in cement. It is concluded that the content of superplasticizer does not significantly influence the workability and that the percentage of optimal PVA fibers is 1.5% generating.*

**Keywords:** cement, natural zeolites, PVA, ductility.



## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT .....	II
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	9
1. INTRODUCCIÓN .....	9
1.1 Descripción del problema .....	9
1.2 Justificación del problema .....	10
1.3 Objetivos.....	10
1.3.1 Objetivo General .....	10
1.3.2 Objetivos Específicos .....	11
1.4 Marco teórico .....	11
1.4.1 El cemento en la industria de la construcción .....	11
1.4.2 Producción del cemento Portland.....	11
1.4.3 Innovaciones en la industria del concreto .....	12
1.4.4 Geopolímeros.....	13
1.4.5 Fibras .....	14
1.4.6 Superplastificantes policarboxílicos.....	16
CAPÍTULO 2.....	17
2 METODOLOGÍA.....	17
2.1 Diseño experimental .....	17
2.1.1 Diseño de matriz .....	17
2.1.2 Adición de superplastificante.....	19
2.1.3 Adición de fibras.....	20
2.2 Equipos, materiales e insumos .....	21
2.3 Procedimiento experimental .....	23
2.4 Ensayos.....	24
2.4.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) .....	24
2.4.2 Análisis termogravimétrico (TGA).....	24
2.5 Ensayos mecánicos.....	25

2.5.1	Trabajabilidad.....	25
2.5.2	Resistencia a la compresión .....	26
2.5.3	Resistencia a la tracción .....	27
2.5.4	Flexión de 3 puntos .....	27
CAPÍTULO 3.....		29
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	29
3.1	Fase 1.....	29
3.2	Fase 2.....	32
3.3	Fase 3.....	34
3.4	Análisis de Costos .....	37
CAPÍTULO 4.....		38
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	38
4.1	Conclusiones .....	38
4.2	Recomendaciones .....	38
BIBLIOGRAFÍA.....		40
APÉNDICES.....		45

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
CIDNA	Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología
COP	Cemento Ordinario Portland
M1_R#	Muestra 1 (fase 1, réplica #1,2,3)
M2_R#	Muestra 2 (fase 1, réplica #1,2,3)
M3_R#	Muestra 3 (fase 1, réplica #1,2,3)
M4_R#	Muestra 4 (fase 1, réplica #1,2,3)
M5_R#	Muestra 5 (fase 1, réplica #1,2,3)
M6_R#	Muestra 6 (fase 1, réplica #1,2,3)
M7_R#	Muestra 7 (fase 1, réplica #1,2,3)
M8_R#	Muestra 8 (fase 1, réplica #1,2,3)
M9_R#	Muestra 9 (fase 1, réplica #1,2,3)
MSP1	Muestra con superplastificante 1 (fase 2)
MSP2	Muestra con superplastificante 2 (fase 2)
MSP3	Muestra con superplastificante 3 (fase 2)
MSP4	Muestra con superplastificante 4 (fase 2)
MSP5	Muestra con superplastificante 5 (fase 2)
MSP6	Muestra con superplastificante 6 (fase 2)
MSP7	Muestra con superplastificante 7 (fase 2)
MSP8	Muestra con superplastificante 8 (fase 2)
MSP9	Muestra con superplastificante 9 (fase 2)
MSP10	Muestra con superplastificante 10 (fase 2)
MSP11	Muestra con superplastificante 11 (fase 2)
MSP11	Muestra con superplastificante 11 (fase 2)
MF1R#	Muestra con 1% vol de fibra (fase 3, réplica #1,2,3)
MF1.5R#	Muestra con 1.5% vol de fibra (fase 3, réplica #1,2,3)
MF2R#	Muestra con 2% vol de fibra (fase 3, réplica #1,2,3)

## SIMBOLOGÍA

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
SiO <sub>2</sub>	Óxido de silicio
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de aluminio
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Óxido de hierro (III)
NaOH	Hidróxido de sodio
MgSO <sub>4</sub>	Sulfato de Magnesio
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
Kg	Kilogramos
g	Gramos
FTIR	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier
s	Segundos

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1	Clasificación de fibras comunes.....	15
Figura 2. 1	Balanza digital .....	21
Figura 2. 2	Espectrofotómetro de transformada deFourier.....	21
Figura 2. 3	Máquina de ensayos universales .....	22
Figura 2. 4	Mezcladora .....	22
Figura 2. 5	Combinaciones en moldes de cubos de 5x5 .....	23
Figura 2. 6	Combinaciones evaluadas en la siguiente fase.....	23
Figura 2. 7	Ensayo de trabajabilidad .....	25
Figura 2. 8	Ensayo de resistencia a la compresión .....	26
Figura 2. 9	Representación de molde en forma de hueso de perro.....	27
Figura 2. 10	Representación de medidas de viguetas.....	28
Figura 3. 1	Resultados del análisis termogravimétrico de M1,M2,M3,M6 .....	31
Figura 3. 2	Resultados de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) .....	31
Figura 3. 3	Gráfico de superficies de respuesta .....	33
Figura 3. 4	Diagrama esfuerzo-deformación en ensayo de tensión .....	34
Figura 3. 5	Diagrama esfuerzo-deformación en ensayo de flexión.....	35

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Iteraciones con la metodología de Taguchi .....	18
Tabla 2.2 Porcentaje de peso en sólidos de las combinaciones .....	19
Tabla 2.3 Combinaciones matriz-superplastificante .....	20
Tabla 2.4 Porcentaje de peso de matriz con superplastificante – fibras PVA.....	20
Tabla 3.1 Resultados de resistencia a la compresión y trabajabilidad de la fase 1 .....	29
Tabla 3.2 Resultados de pérdida de peso por rangos de temperatura .....	30
Tabla 3.3 Resultados de resistencia a la compresión y trabajabilidad .....	32
Tabla 3.4 Resultados del ensayo de tensión .....	34
Tabla 3.5 Resultados del ensayo de flexión .....	36
Tabla 3.6 Cálculo del costo unitario.....	37

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El cemento ordinario Portland (COP) es utilizado para la fabricación del concreto, el cual es el material más requerido en el mundo después del agua.[1] La industria del cemento es una de las más contaminantes al producir cerca de 2800 millones de toneladas de emisiones de dióxido de carbono anualmente [2]. La emisión excesiva de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero se debe a la descarbonatación de las calizas utilizadas en el proceso de clinkerado, el consumo de combustibles indispensables en la producción de clínker y el uso de electricidad, considerando que se consume cerca del 7% de la energía industrial global [3].

El impacto ambiental ocasionado por la producción de cemento debe ser mitigado tanto en el diseño del material, como en su aplicación en edificaciones y obras civiles. En este proyecto se busca disminuir las emisiones de dióxido de carbono mediante el reemplazo parcial del cemento comercial con diversas materias primas, como minerales y fibras poliméricas, obteniendo mejores propiedades mecánicas como resistencia a la tensión y compresión. El desarrollo de cementos ecológicos mediante la implementación de nuevas tecnologías de manufactura, en algunos casos, ha tenido poco éxito debido a sus costos de comercialización. Por esto, se busca alcanzar el punto de equilibrio de costo-innovación-ecología para brindar una solución sostenible a través del tiempo.

### 1.1 Descripción del problema

Los materiales de construcción con fines estructurales hechos a base de cemento Portland presentan una ductilidad de 0.1%, por lo cual, se complementa su uso con varillas de acero para reforzamiento. La ductilidad en los materiales de construcción es de gran importancia debido a que esta propiedad aumenta la capacidad de soportar cargas cíclicas, en tensión y de corte, presentando un mejor desempeño en eventos sísmicos, a priori. Por otro lado, con el auge de la sostenibilidad, toda iniciativa que disminuya el uso de cemento ordinario Portland contribuye a reducir el efecto de gas invernadero.

## **1.2 Justificación del problema**

Ecuador se encuentra ubicado en el cinturón de fuego del Pacífico, lo cual representa un elevado riesgo de eventos sísmicos. En el año 2016 ocurrió un terremoto de 7.8 grados en escala de Richter, con epicentro entre los cantones manabitas Cojimíes y Pedernales. Este evento demostró la resiliencia ineficiente que presentan los materiales de construcción locales, representando altas pérdidas humanas y económicas. Además del insuficiente control de las técnicas de construcción, los materiales empleados mostraron una escasa capacidad de resistir cargas sísmicas. Se plantea implementar un material de construcción diseñado para presentar una considerable ductilidad y tenacidad para obtener estructuras civiles más seguras y durables.

Este proyecto es el primero en el país, que explora la posibilidad de diseñar un material de construcción con fines estructurales con una ductilidad superior a la presentada en los materiales de construcción convencionales, usando materia prima local y fibras poliméricas.

El reemplazo parcial o total del cemento Portland con zeolita natural reduce las emisiones dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), además de ser un mineral abundante en nuestro país, brinda excelentes propiedades mecánicas. Desde tiempos antiguos, las antiguas civilizaciones implementaban fibras como paja y asbesto en los adobes de arcilla, con la finalidad de brindar reforzamiento, mejorando las propiedades mecánicas y físicas de materiales compuestos como la resistencia a la tensión, ,compresión, impacto, la tenacidad, entre otros [4]. Por consiguiente, en este proyecto se planteó el diseño de un cemento híbrido a base de cemento comercialmente disponible, zeolitas naturales y fibras sintéticas, con la finalidad de obtener una ductilidad superior, mientras se provee un material de construcción que genere menos huella de carbono.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar un compuesto de cemento híbrido a base de zeolitas naturales y cemento comercial que presente una ductilidad mayor a 5% a los 28 días en condiciones de laboratorio.



### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar la matriz de cemento híbrido con la mayor resistencia a la compresión a los 7 días.
2. Seleccionar el porcentaje de superplastificante policarboxílico a la mezcla anterior que presente la mejor trabajabilidad
3. Evaluar la resistencia a la tensión para verificar comportamiento mecánico a los 28 días.
4. Optimizar los costos de fabricación del cemento híbrido considerando las materias primas empleadas.

## **1.4 Marco teórico**

### **1.4.1 El cemento en la industria de la construcción**

El cemento es un componente básico en la fabricación de concreto, el cual es el material más utilizado en la industria de la construcción. La producción de concreto, en promedio, es de aproximadamente 1 tonelada anual por cada persona en el mundo [5].

Las consecuencias ambientales debido a la fabricación del cemento toman cada vez más fuerza. A pesar de que esta industria ha logrado grandes progresos en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por medio de mejoras en el proceso y eficiencia energética, se prevé la generación de un mayor volumen de gases de efecto invernadero como consecuencia inherente al proceso de manufactura básico de calcinación de la piedra caliza. [6]

### **1.4.2 Producción del cemento Portland**

El proceso de producción inicia con la selección de eficientes métodos ingenieriles para triturar, moler, mezclar y transportar sólidos a escala industrial, junto a su respectivo tratamiento térmico.

La piedra caliza, el óxido de silicio (SiO<sub>2</sub>), óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxido de hierro III (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), se trituran y muelen generando una harina cruda, la cual es mezclada en silos y precalentada para disociar el óxido de calcio y dióxido de carbono, reacción conocida como decarbonatación [7].

Posteriormente se calienta en un horno, dando paso a la reacción entre el óxido de calcio y otros elementos, para producir silicatos y aluminatos de calcio a temperaturas cercanas a 1450°C. El combustible principal es utilizado para mantener las temperaturas elevadas en la zona de combustión permitiendo que se lleven a cabo las reacciones químicas para la producción de clínker [8].

El clínker, se mezcla con yeso, piedra caliza y/o cenizas con la finalidad de obtener un producto más fino llamado cemento [3].

### **1.4.3 Innovaciones en la industria del concreto**

A lo largo de los últimos años se han desarrollado investigaciones cuya finalidad es reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> ofreciendo alternativas para la producción del concreto.

#### **Cementos híbridos**

Una parte del clínker es reemplazado con subproductos industriales como escorias de alto horno residuales en la fabricación del hierro, cenizas volantes de carbón obtenidas como residuo de la quema de carbón, entre otros tipos de materiales volcánicos, para generar un producto homogéneo conocido como cemento mezclado. Este cemento híbrido usualmente toma mayor tiempo de fraguado, no obstante, su resistencia mecánica es mayor [9].

El cemento Portland tiene una relación clínker/cemento de 0,95 y el cemento de escorias de alto horno puede tener una relación clínker/cemento más baja de 0,35. En EEUU, Canadá y Reino Unido tienen relaciones de clínker/cemento altas demostrando un consumo elevado de cemento Portland. Por otro lado, en Francia, Bélgica y la antigua Unión Soviética tienen relaciones más bajas por el uso de cementos adicionados.

#### **Cementos de magnesia**

Esta gama de cementos es creada a base de óxido de magnesio como reactivo clave en la mezcla. Los cementos de magnesia tienen aplicación limitada en la industria de la edificación y la construcción pese a presentar propiedades superiores en comparación con el cemento Portland. Entre estas propiedades se destacan su alta resistencia al fuego, baja conductividad térmica, alta resistencia a la abrasión, alta

resistencia a la tracción y a la compresión, y no requiere que se realice curado en húmedo.

#### **1.4.4 Geopolímeros**

MacKenzie define como “geopolímero” al material proveniente de un aluminosilicato natural (arcillas) o residual (cenizas volantes y escorias de alto horno) al reaccionar con un agente alcalino (hidróxido, silicato, carbonato o sulfato alcalino concentrado) provocando la policondensación de compuestos orgánicos a temperatura ambiente. [10]

##### **1.4.4.1 Mortero de geopolímero a base de zeolita**

Los geopolímeros y concretos activados alcalinamente han sustituido total o parcialmente el uso del cemento Portland. Son considerados los cementos del futuro, su desarrollo surgió a finales de la década de 1970, impulsado por Davidovits [11]. Este material se basa en puzolanos con altos contenidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (como la ceniza volante, zeolita y mullita), [12]. Al no requerir curado con calor, el geopolímero produce menos dióxido de carbono. Se estima que la producción de cemento mediante geopolymerización podría suponer una disminución del 86% de las emisiones de  $\text{CO}_2$  por cada tonelada de COP. [13]

La adición de zeolita natural al hormigón mejora la resistencia a la compresión y evita la penetración de cloruro. La mullita representa uno de los aditivos con mayor resistencia térmica en la industria cerámica, es utilizada en múltiples aplicaciones como conductor y refractarios debido a su alto contenido de alúmina, que proporciona una baja conductividad térmica.

##### **1.4.4.2 Propiedades mecánicas de cemento híbrido basado en geopolímeros**

Askarian et al. investigaron sobre las propiedades mecánicas y caracterización del cemento híbrido basado en geopolímeros empleando COP, ceniza volante y mullita, implementando carbonato de potasio, hidróxido de calcio y el silicato de sodio como activadores sólidos. Se determinó que la trabajabilidad disminuyó con el aumento del contenido de cemento en la mezcla. Las mezclas con activadores sólidos presentaron una mayor resistencia a la compresión a los 28 días. Los resultados

confirman la contribución de la activación alcalina para alcanzar los valores de resistencia a la compresión necesarios[14].

#### **1.4.4.3 Aplicaciones industriales de los geopolímeros**

Los geopolímeros son implementados principalmente en la fabricación de materiales de construcción de baja tecnología, en reparación de infraestructuras, compuestos de refuerzos, elementos refractarios, cementos y hormigones, materiales compuestos para interiores de automóviles y aviones, entre otros [15].

Este material se aplica en el desarrollo de materiales de construcción que tengan como finalidad reducir los niveles de CO<sub>2</sub> presentándose como alternativa a los cementos a base de Portland.

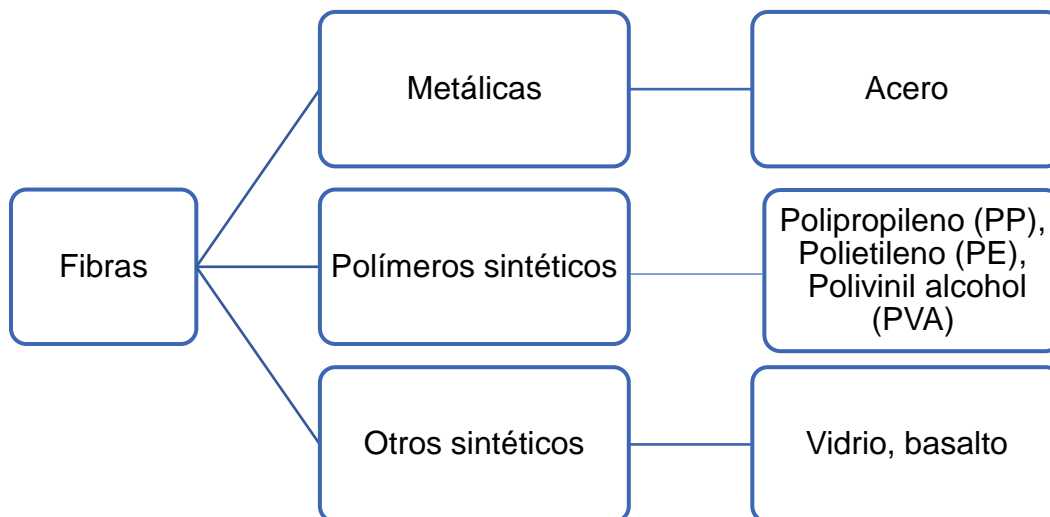
Entre las ventajas que presentan los geopolímeros se destacan la ganancia de resistencia en poco tiempo, la excelente durabilidad, la baja conductividad térmica y la alta resistencia al fuego. Estas propiedades brindan ventajas tecnológicas frente a los materiales de construcción actuales; además, también se utilizan en la encapsulación de desechos y la protección contra incendios de estructuras [16].

#### **1.4.5 Fibras**

Las fibras representan el refuerzo y primordial fuente de resistencia para la formación de un material compuesto; en este caso, son aquellas que llevan las cargas a lo largo de sus direcciones longitudinales. Los refuerzos de fibra comunes son el asbesto, fibras de grafito/carbono, berilio, carburo de berilio, óxido de berilio, molibdeno, óxido de aluminio, fibras de vidrio, poliamida, fibras naturales, entre otras.

##### **1.4.5.1 Fibras utilizadas como refuerzo en cementos**

Se conoce que los materiales cerámicos funcionan mejor en compresión, de hecho, son débiles al resistir fuerzas de tracción, además pueden ocasionarse fallas repentinas a causa de la propagación de grietas. Normalmente las fibras poseen un módulo de Young superior al material de la matriz.



**Figura 1. 1 Clasificación de fibras comunes. [16]**

Los parámetros como la cantidad, longitud y composición química de las fibras, están correlacionadas con el desempeño general del material compuesto final [17]. En la mayoría de los casos, el aumento de la cantidad de fibra afecta positivamente en las propiedades mecánicas de un concreto reforzado.

#### **1.4.5.2 Concretos reforzados con fibras**

Diversos estudios han demostrado que el refuerzo que brindan las fibras mejora significativamente la resistencia y tenacidad de la matriz de los materiales cementosos, ya que transmiten fuerzas de tracción a través de una fisura [18]. Las fibras de polipropileno (PP) son muy comunes principalmente por su relación costo-beneficio, proveen excelentes características, reducen la retracción, mejoran la resistencia al agrietamiento y tenacidad del concreto ordinario. Las fibras de acero pueden reducir entre 30-50% el ancho máximo de fisura (en el Estado Límite de Servicio ELS), las fibras de vidrio entre 25-30%, mientras las macrofibras poliméricas reducen este factor en menos del 10%, debido al bajo rendimiento que presentan luego de la fisuración de pequeñas grietas. Las vigas de concreto reforzado con fibras de acero y polímeros presentan una mejor capacidad resistente a la flexión, en comparación al refuerzo con fibras de vidrio. [19]

### **1.4.5.3 Concretos híbridos de geopolímero reforzados con fibras de acetato de polivinilo (PVA)**

En algunos estudios [20]–[22] el alcohol polivinilo mejora la resistencia mecánica e hidrofobicidad, específicamente el comportamiento dúctil de compuestos de morteros con alcohol polivinílico, donde con la adición de esta fibra la fluidez se vio disminuida, así también se reduce la trabajabilidad en la prueba de minislump. La poca fluidez se atribuye a la forma de las fibras incluyendo su interacción con la mezcla y superficie, además la adición de estas fibras aumenta la cantidad de partículas sólidas y reduce la cantidad de agua, lo que aumenta la fricción entre la fibra-fibra y fibra-matriz, por ello se recomienda la adición de un superplastificante para que mantenga la resistencia de los compuestos, en cuanto a la absorción de agua estos compuestos dependen del grosor de la zona de transición y la porosidad del compuesto, en diversos estudios la absorción de agua del mortero simple fue de 3.28%, mientras que el compuesto con PVA mostró absorción de 3.45%, lo que indica q podría haber un ligero aumento en la porosidad o espesor de la zona de transición. [21]

### **1.4.6 Superplastificantes policarboxílicos**

Desde 1980 los superplastificantes policarboxílicos han sido utilizados como nuevos aditivos para hormigón. Estos superplastificantes están compuestos por cadenas laterales de óxido de polietileno injertadas en un esqueleto de polímero aniónico. Estas cadenas laterales se intercalan de forma fácil entre las capas de aluminosilicato de las arcillas dando como consecuencia que, en lugar de adsorberse en la superficie del cemento, el superplastificante se agota por medio de la adsorción química de la arcilla [23].

#### **1.4.6.1 Policarboxílico en mezclas de cemento**

Los grupos carboxílicos que actúan como anclas se adsorben en las partículas del cemento. Las cadenas laterales injertadas con óxido de polietileno se extienden desde la superficie de las partículas de cemento hasta la solución de los poros produciendo un impedimento estérico y, de esta forma, evitar la aglomeración de las partículas de cemento. Por ende, los superplastificantes policarboxílicos retardan la hidratación del cemento, e incluso podrían ejercer diferentes efectos sobre su rendimiento.

# CAPÍTULO 2

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Diseño experimental

#### 2.1.1 Diseño de matriz

Un diseño robusto permite obtener un producto o proceso con un desempeño óptimo que no sea afectado por fuentes de variación no controlada (ruido), como la humedad y temperatura del ambiente, etc. [24]

En la fase inicial de la experimentación se aplicó el método de Taguchi con la finalidad de obtener las proporciones óptimas de materiales sólidos del mortero (cemento, zeolita, arena, y activadores). En esta investigación se utilizó hidróxido de sodio (NaOH), como activador alcalino y catalizador para acelerar la reacción del cemento y obtener resistencias a la compresión permisibles a corto plazo; adicional, se emplea sulfato de magnesio ( $MgSO_4$ ) para acelerar la reacción y completar el proceso de geopolimerización. El diseño de Taguchi suprime las interacciones que no influyen de forma significativa en los resultados, permitiendo resaltar las interacciones que causen mayores efectos al variar factores controlables. Al diseñar la primera fase experimental con la metodología de Taguchi, es posible resaltar los efectos principales de los factores controlables mencionados, con la menor cantidad de combinaciones posibles.

Los 4 factores de control son:

- A. Relación arena/aglutinante
- B. Relación agua/aglutinante
- C. % $MgSO_4$
- D. %NaOH

Se experimentó 3 niveles para cada factor controlable, obteniendo un total de 81 combinaciones posibles. Debido al tiempo de duración de la materia integradora, no es factible realizar tantas corridas experimentales, tomando en cuenta las 3 fases mencionadas. Por ello, se optó por una estrategia que permite reducir el número de tratamientos sin perder el mínimo de información valiosa. Tal estrategia la conforman los diseños factoriales fraccionados. Se seleccionó un arreglo ortogonal  $L_9$ ,

obteniendo 9 combinaciones con 3 repeticiones cada una, obteniendo un total de 27 muestras en la primera fase. El diseño con arreglo interno y factores controlables se muestra en la Tabla 1. En esta primera fase se realizaron ensayos de trabajabilidad, resistencia a la compresión, Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (TGA).

**Tabla 2.1 Iteraciones con la metodología de Taguchi**

Iteración	Réplica	A	B	C	D
1	1	1	0,35	0,00	0,00
2	1	1	0,45	2,50	2,50
3	1	1	0,55	5,00	5,00
4	1	2	0,35	2,50	5,00
5	1	2	0,45	5,00	0,00
6	1	2	0,55	0,00	2,50
7	1	3	0,35	5,00	2,50
8	1	3	0,45	0,00	5,00
9	1	3	0,55	2,50	0,00
10	2	1	0,35	0,00	0,00
11	2	1	0,45	2,50	2,50
12	2	1	0,55	5,00	5,00
13	2	2	0,35	2,50	5,00
14	2	2	0,45	5,00	0,00
15	2	2	0,55	0,00	2,50
16	2	3	0,35	5,00	2,50
17	2	3	0,45	0,00	5,00
18	2	3	0,55	2,50	0,00
19	3	1	0,35	0,00	0,00
20	3	1	0,45	2,50	2,50
21	3	1	0,55	5,00	5,00
22	3	2	0,35	2,50	5,00
23	3	2	0,45	5,00	0,00
24	3	2	0,55	0,00	2,50
25	3	3	0,35	5,00	2,50
26	3	3	0,45	0,00	5,00
27	3	3	0,55	2,50	0,00



**Tabla 2.2 Porcentaje de peso en sólidos de las combinaciones**

%wt sólidos					
Codificación	Cemento	Arena	MgSO4	NaOH	Zeolita
M1	15,00	50,00	0,00	0,00	35,00
M2	15,00	50,00	0,88	1,23	32,90
M3	15,00	50,00	1,75	2,41	30,84
M4	10,00	66,67	0,58	1,64	21,11
M5	10,00	66,67	1,17	0,00	22,17
M6	10,00	66,67	0,00	0,83	22,50
M7	7,50	75,00	0,88	0,60	16,02
M8	7,50	75,00	0,00	1,25	16,25
M9	7,50	75,00	0,44	0,00	17,06

### **2.1.2 Adición de superplastificante**

En la segunda fase se añadió un superplastificante policarboxílico en el agua, destinado a hidratar el aglutinante. Se aplicó la metodología de superficie de respuesta (MSR), la cual permite encontrar condiciones de operación óptima de un proceso por medio del diseño de un experimento basado en el conocimiento actual acerca de la posible ubicación del punto óptimo.

Los 2 factores de control son:

- A. Relación agua/aglutinante
- B. Porcentaje de superplastificante en el agua.

Se eligieron tales factores para la MSR con la finalidad de resaltar los efectos de las interacciones entre ellos, como la influencia del porcentaje de superplastificante en la trabajabilidad de la muestra. Se realizaron 12 combinaciones diferentes, manteniendo los porcentajes de sólidos (en peso) del aglutinante de la muestra óptima resultante en la fase 1. En esta segunda fase se realizaron ensayos de trabajabilidad y resistencia a la compresión, para determinar el porcentaje óptimo de superplastificante.

**Tabla 2.3 Combinaciones matriz-superplastificante**

<b>Código</b>	<b>Agua/aglutinante</b>	<b>% SP</b>
MSP1	0,40	0,40
MSP2	0,45	0,50
MSP3	0,33	0,75
MSP4	0,35	1,00
MSP5	0,45	1,00
MSP6	0,40	0,75
MSP7	0,40	0,75
MSP8	0,40	0,75
MSP9	0,35	0,50
MSP10	0,40	1,10
MSP11	0,40	0,50

### 2.1.3 Adición de fibras

En la tercera fase se añadieron fibras de PVA en la matriz, empleando 1, 1.5 y 2% de volumen. Las fibras fueron añadidas lentamente a la matriz con superplastificante. Se realizaron ensayos de trabajabilidad, resistencia a tracción y resistencia a la flexión con la finalidad de evaluar el comportamiento del concreto a medida que aumenta el porcentaje en volumen de fibras de PVA.

**Tabla 2.4 Porcentaje de peso de matriz con superplastificante – fibras PVA**

<b>%wt sólidos</b>						
<b>Código</b>	<b>Cemento</b>	<b>Arena</b>	<b>MgSO4</b>	<b>NaOH</b>	<b>Zeolita</b>	<b>Fibra PVA</b>
MF1	14,84	49,48	0,85	1,22	32,53	1,07
MF1.5	14,76	49,21	0,85	1,22	32,37	1,59
MF2	14,68	48,93	0,85	1,18	32,18	2,15

## 2.2 Equipos, materiales e insumos

### ***Balanza digital***

Este equipo, de marca BIOBASE se utilizó para pesar la cantidad de ingredientes del mortero, y las fibras de PVA.



**Figura 2. 1 Balanza digital**

### ***Espectrofotómetro de transformada de Fourier***

Este equipo, de marca PerkinElmer, modelo Spectrum 100 [25], se usó para identificar los grupos funcionales presentes en las muestras de la primera fase, utilizando radiación infrarroja (IR).



**Figura 2. 2 Espectrofotómetro de transformada de Fourier. [22]**

### ***Máquina de ensayos universales (FICT)***

Los ensayos de compresión en los cubos de concreto se realizaron en la máquina de ensayos universales, marca SHIMADZU y modelo UH-F500kNX [26].



**Figura 2. 3 Máquina de ensayos universales. [23]**

### ***Mezcladora***

El equipo de marca IKALABORTECHNIK y modelo RW20 DZM.n [27], se utilizó para homogeneizar la mezcla de cemento híbrido (en la fase 1, 2 y 3) con velocidades baja, media y alta.



**Figura 2. 4 Mezcladora. [24]**

### 2.3 Procedimiento experimental

En la fase inicial, se pesó la materia prima correspondiente al mortero, arena y activadores alcalinos, se incorporaron los sólidos en un recipiente hondo con la ayuda de una espátula metálica. Se midió con una probeta la cantidad de agua necesaria para hidratar el aglutinante y arena, y se vertió en el recipiente. Luego, se homogeneizó el mortero con la ayuda de una mezcladora. Se realizaron ensayos de trabajabilidad para verificar el asentamiento de las 9 combinaciones incluyendo sus réplicas. Las mezclas fueron vertidas en los moldes en forma de cubos de 5cm de arista. Los cubos de mortero estuvieron en el molde por un período de 7 días, luego fueron desmoldados y limados para eliminar imperfecciones superficiales. Se realizó el ensayo de resistencia a la compresión



Figura 2. 5 Combinaciones en moldes de cubos de 5x5



Figura 2. 6 Combinaciones evaluadas en la siguiente fase

En la segunda fase, se realizó el mismo procedimiento de la fase anterior. En esta ocasión, para hidratar el aglutinante, se midió en una probeta la cantidad de agua necesaria y la cantidad de superplastificante policarboxílico. Las sustancias sólidas se homogeneizaron junto al agua y superplastificante con la ayuda de una mezcladora. Se realizó un ensayo de trabajabilidad a cada una de las 12 combinaciones, que luego fueron vertidas en moldes cúbicos de 5cm de arista. Las réplicas envejecieron en el molde por 14 días, luego se prepararon para realizar el ensayo de compresión.

En la tercera fase, se realizó un procedimiento similar al de la fase dos. Se pesó la cantidad de fibras de PVA necesarias para obtener muestras de 1%, 1.5% y 2% de peso en volumen. Las fibras fueron añadidas poco a poco mientras se mezclaban los componentes sólidos y líquidos en la mezcladora. Finalmente, se realizó el ensayo de trabajabilidad y se procedió a verter la mezcla en los moldes en forma de huesos de perro y viguetas para cada una de las réplicas realizadas. Las muestras se envejecieron por 28 días.

## **2.4 Ensayos**

### **2.4.1 Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)**

En la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier, la radiación IR pasa a través de una muestra, y parte de la radiación es absorbida por ella, mientras la restante es transmitida. La señal resultante en el detector es un espectro que representa una “huella digital” molecular de la muestra, indicando la predominancia de grupos funcionales por medio de picos a una longitud de onda específica. [28]

### **2.4.2 Análisis termogravimétrico (TGA)**

El análisis termogravimétrico (TGA), es un método utilizado para determinar la masa total de una muestra como una propiedad dependiente de la temperatura. El cambio de masa en función de la temperatura es una propiedad fundamental de muchos materiales, ya que se degradan y pierden componentes volátiles.

El análisis termogravimétrico se representa como un cambio porcentual en la masa frente a la temperatura. También proporciona información sobre oxidación, descomposición, absorción, adsorción y cambio de fase.

## 2.5 Ensayos mecánicos

### 2.5.1 Trabajabilidad

La norma ASTM C 143, que describe el ensayo de revenimiento del concreto de cemento hidráulico, indica que una muestra de concreto fresco es colocada y compactada mediante varillado en un molde con forma de cono truncado. El molde es levantado durante  $5 \pm 2$  segundos en forma ascendente. De inmediato, el concreto se hunde. La distancia entre la posición original y desfasada del centro de la cara superior del concreto es medida y reportada como el revenimiento del concreto. Es una medida indirecta de la trabajabilidad, expresada en mm. [29]

El molde debe tener la forma de la superficie lateral de un cono truncado, con la base de 200 mm (8 pulg) de diámetro, la parte superior de 100 mm (4 pulg) de diámetro, y la altura de 300 mm (12 pulg). Los diámetros y alturas individuales deben tener una tolerancia de  $\pm 3$  mm (1/8 de pulg) de las dimensiones especificadas.



Figura 2. 7 Ensayo de trabajabilidad

### 2.5.2 Resistencia a la compresión

El método de ensayo ASTM C109 permite determinar la resistencia a la compresión de cemento hidráulico y otros morteros. Los cubos de ensayo de 50 mm de dimensiones fueron compactados por aprisionamiento en la máquina de ensayos universales. Se generó una curva de esfuerzo vs desplazamiento en mm por cada ensayo, donde se indica el esfuerzo máximo a la compresión del concreto. Se reportaron datos del límite elástico en la compresión, que es análogo al método offset (resistencia a la fluencia para una deformación de 0.2%). [22] Este ensayo se realizó a una velocidad de 900N/s.

De acuerdo con la normativa NTE INEN 488, la resistencia a la compresión de cubos de 50mm de arista se calcula mediante la ecuación 2.1 :

$$F = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

F: Resistencia a la compresión, en MPa.

P: Carga total máxima de falla, en N.

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



Figura 2. 8 Ensayo de resistencia a la compresión



### 2.5.3 Resistencia a la tracción

Generalmente, las propiedades de tracción del concreto se determinan utilizando tres tipos de métodos de ensayo: ensayos de tracción directa, ensayos de división y ensayos de flexión. Para la determinación de la resistencia mecánica de los compuestos desarrollados se ha optado por ensayos de tracción directa. [30]. Para el ensayo de tracción uniaxial, se utilizaron probetas del tipo “hueso de perro”, denominadas así por su configuración geométrica.[31] Las medidas de los especímenes utilizados se muestran en la figura 2.10.

Luego de un envejecimiento de 28 días, las muestras se sometieron a una carga de tracción uniaxial cuasiestática proporcionada por la máquina de ensayos universales SHIMADZU UH-F500kNX, a una velocidad de 10MPa/s y una temperatura ambiente de 22,5°C, de manera similar al trabajo desarrollado por Kan et. al, en el estudio de las propiedades mecánicas de los composites de geopolímero a base de zeolita y fibras de PVA. [22]

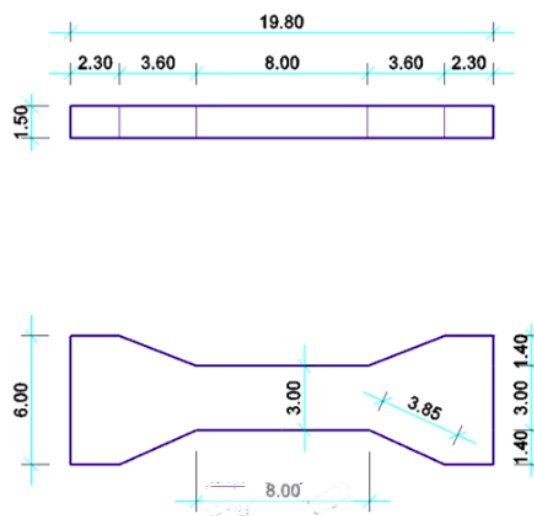
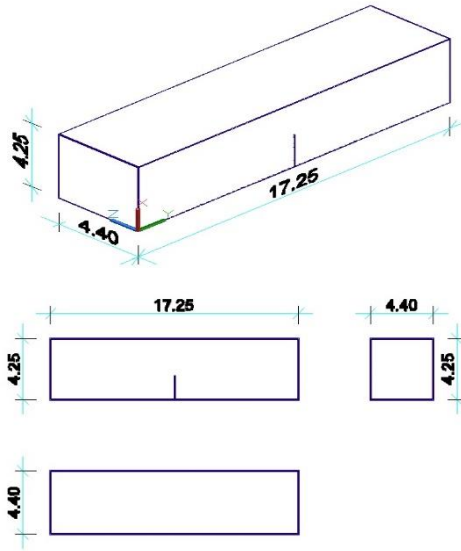


Figura 2.9 Representación de molde en forma de hueso de perro

### 2.5.4 Flexión de 3 puntos

El método de ensayo ASTM C1609 [32] evalúa el comportamiento a la flexión del hormigón reforzado con fibra utilizando parámetros derivados de la curva de esfuerzo-deformación obtenida al ensayar una viga simplemente apoyada bajo una carga en un tercer punto. Las muestras para este ensayo presentan dimensiones

de 44.0 x 42.5 x 172.5 mm, con una muesca fina en el medio, como se muestra en las figuras 2.11 y 2.12. La distancia entre los apoyos inferiores es de 120mm.



**Figura 2.10 Representación de medidas de viguetas**

# CAPÍTULO 3

## 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Fase 1

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 2.2 la combinación M2 mostró el valor más alto de resistencia a la compresión, entre las combinaciones ensayadas. El porcentaje de peso en sólidos de esta combinación es 15.00% de cemento, 50.00% de arena, 0,88% de sulfato de magnesio, 1,23% de hidróxido de sodio y 32,90% de zeolita. Para determinar la trabajabilidad objetivo se empleó la ecuación 3.1 que representa el promedio entre el límite superior y el límite inferior del descenso, considerando la fluidez de la mezcla, de tal forma que las fibras de PVA se compacten en la matriz. De acuerdo con los datos obtenidos de trabajabilidad en la primera fase, el parámetro objetivo es de 8 mm. La combinación cuya trabajabilidad es cercana al valor objetivo, es M2.

$$\text{Trabajabilidad óptima} = \frac{\text{Límite superior} - \text{Límite inferior}}{2} + \text{límite inferior} \quad (3.1)$$

$$\text{Trabajabilidad óptima} = \frac{15 - 1}{2} + 1 = 8 \text{ mm}$$

**Tabla 3. 1 Resultados de resistencia a la compresión y trabajabilidad de la fase 1**

Combinación	Resistencia a la compresión			Trabajabilidad
	Esfuerzo máximo [N]	Compresión [MPa]	Compresión promedio [MPa]	Descenso [mm]
M1R1	10227,40	3,76	3,76	2
M2R1	15270,90	6,15	5,55	5
M2R2	13719,20	5,39		5
M2R3	12955,8 0	5,12		5
M3R1	3857,61	1,82	1,99	15
M3R2	4566,35	1,96		15
M3R3	5203,41	2,19		15
M6R1	5687,95	2,18	1,98	1
M6R3	4843,63	1,80		1

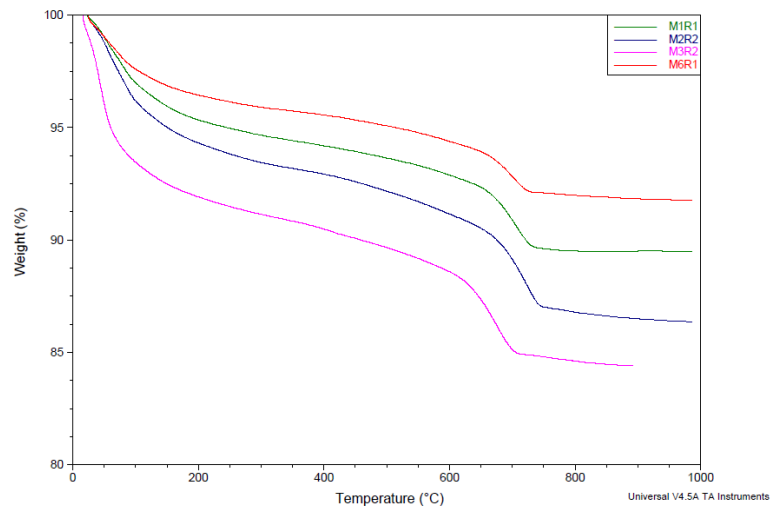
Dado que para M2 se obtuvo una buena resistencia a la compresión promedio y descenso, se consideró como la combinación óptima para diseñar la matriz del material compuesto.

El análisis termogravimétrico (TGA) de las 4 combinaciones M1, M2, M3 M6, indica que entre 25°C y 200°C se evidencia la evaporación de agua higroscópica, la cual se encuentra retenida en los poros más finos y en la capa intermedia del silicato de calcio hidratado (C-S-H). Entre 200°C a 500°C ocurre la deshidroxilización de los grupos hidroxilos del agua cristalina, y los aluminosilicatos hidratados. Entre 500°C a 800°C ocurre la descarbonatación del carbonato de sodio perteneciente a la reacción entre el activador y el aglutinante [33].

En la siguiente tabla se detalla la pérdida de peso por rangos característicos de temperatura, para cada combinación. La combinación M3 mostró un mayor porcentaje de pérdida de peso, mientras la M6 mostró la menor pérdida. Este comportamiento se encuentra relacionado con la cantidad de agua utilizada para hidratar el aglutinante. Mientras más agua posee la combinación, mayor es la pérdida en el primer rango de temperatura descrito.

**Tabla 3. 2 Resultados de pérdida de peso por rangos de temperatura**

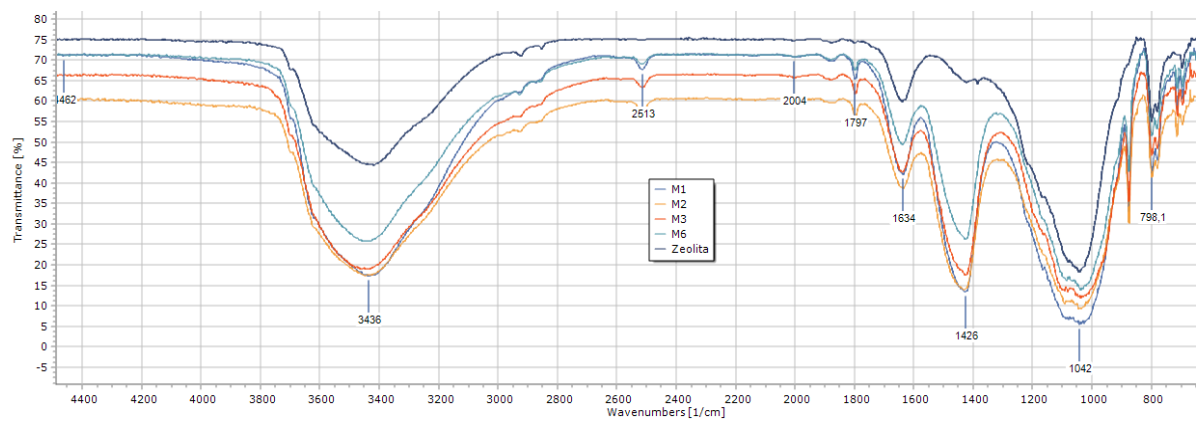
Muestra	% Pérdida de peso			
	25-200 °C	200-500°C	500-800°C	Total
<b>M1</b>	4,65	1,69	4,14	10,48
<b>M2</b>	5,69	2,14	5,38	13,21
<b>M3</b>	8,03	2,26	5,05	15,33
<b>M6</b>	3,55	1,37	3,09	8,01



**Figura 3. 1 Resultados del análisis termogravimétrico de M1,M2,M3,M6**

En la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), el pico alrededor de  $3436\text{ cm}^{-1}$  y el pico en  $1634\text{ cm}^{-1}$  corresponden a vibraciones de enlaces O-H de estiramiento y flexión, respectivamente [22]. La banda alrededor de  $1426\text{ cm}^{-1}$  representa vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O-C de los grupos  $\text{Co}_3^{2-}$ . El pico agudo en  $860\text{ cm}^{-1}$  puede estar relacionado con la presencia de enlaces C-O-C. El pico en  $798\text{ cm}^{-1}$  indica las vibraciones de estiramiento del enlace coordinado Al-O. [34]

El desplazamiento del pico hacia la izquierda o derecha depende del ratio Si:Al de la zeolita. Existe un desplazamiento en uno de los picos principales que confirma la activación alcalina de la zeolita, para dar paso a la geopolimerización.



**Figura 3. 2 Resultados de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)**

### 3.2 Fase 2

En la fase 2, se utilizó el mismo porcentaje de peso en sólidos de la combinación M2, la cual presentó una mejor trabajabilidad y resistencia a la compresión, en la fase 1. Se obtuvieron 12 combinaciones, variando los coeficientes de relación agua/aglutinante y porcentajes de superplastificante en el agua, detallados en la Tabla 3.3 Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y trabajabilidad y, con los resultados obtenidos en ambos ensayos, se determinó la combinación óptima en esta fase.

**Tabla 3. 3 Resultados de resistencia a la compresión y trabajabilidad combinaciones con superplastificante**

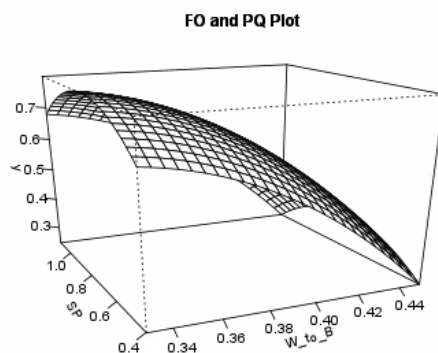
Combinación	Agua/aglutinante	% Superplastificante en agua	Resistencia a la compresión [MPa]	Trabajabilidad [mm]
MSP1	0,40	0,40	6,30	7,20
MSP2	0,45	0,50	5,52	3,87
MSP3	0,33	0,75	4,27	5,80
MSP4	0,38	1,00	7,10	6,00
MSP5	0,45	1,00	6,16	4,93
MSP6	0,40	0,75	7,21	7,00
MSP7	0,40	0,75	6,79	7,20
MSP8	0,40	0,75	5,39	5,00
MSP9	0,35	0,50	3,92	6,80
MSP10	0,40	1,10	5,64	4,27
MSP11	0,40	0,50	6,84	4,80
MSP12	0,47	0,75	5,59	5,20

$$\text{Trabajabilidad óptima} = \frac{\text{Límite superior} - \text{Límite inferior}}{2} + \text{límite inferior} \quad (3.1)$$

$$\text{Trabajabilidad óptima} = \frac{7,20 - 3,87}{2} + 3,87 = 5,54 \text{ mm}$$

Se elaboró un gráfico de superficies de respuesta a partir de los datos descritos en la Tabla 3.3, donde el eje Y corresponde la trabajabilidad (en centímetros), el eje X

corresponde al porcentaje de superplastificante, y el eje Z indica la relación agua/aglutinante.



**Figura 3. 3 Gráfico de superficies de respuesta**

En la figura 3.3 se aprecia que la trabajabilidad (eje Y) no varía significativamente al añadir diferentes porcentajes de superplastificante (eje X). Las combinaciones MSP4 y MSP6 mostraron los valores más altos de resistencia a la compresión, siendo 7.10MPa y 7.21MPa respectivamente, sin embargo, se determinó como óptima a la combinación MSP4, con la relación agua/aglutinante de 0.38, y 1% de superplastificante en el agua, debido a la trabajabilidad que obtuvo, puesto que es más cercana al valor óptimo estimado (5,54mm) para obtener una combinación con buena reología, de acuerdo con la ecuación diseñada.

### 3.3 Fase 3

En esta fase, a la mezcla MSP4 (Fase 2) se agregaron diferentes porcentajes en volumen de PVA(1%, 1.5% y 2%) con el fin de mejorar la ductilidad del material. . En la figura 3.4 se observan las respectivas curvas de esfuerzo-deformación del ensayo de tensión de estas combinaciones (MF1, MF1.5 y MF2) de fibras de PVA, luego de un envejecimiento de 28 días, en condiciones de laboratorio. Es de recalcar que cada muestra fue ensayada por triplicado (R1, R2, R3).

Tabla 3. 4 Resultados del ensayo de tensión

ENSAYO DE TENSIÓN			
Combinación	%Volumen en fibras de PVA	Esfuerzo Máximo promedio [MPa]	Deformación Máxima promedio [%]
MF1	1%	0,69 ± 0,04	1,39 ± 0,19
MF1.5	1.5%	0,67 ± 0,06	1,32 ± 0,18
MF2	2%	0,51 ± 0,08	1,07 ± 0,08

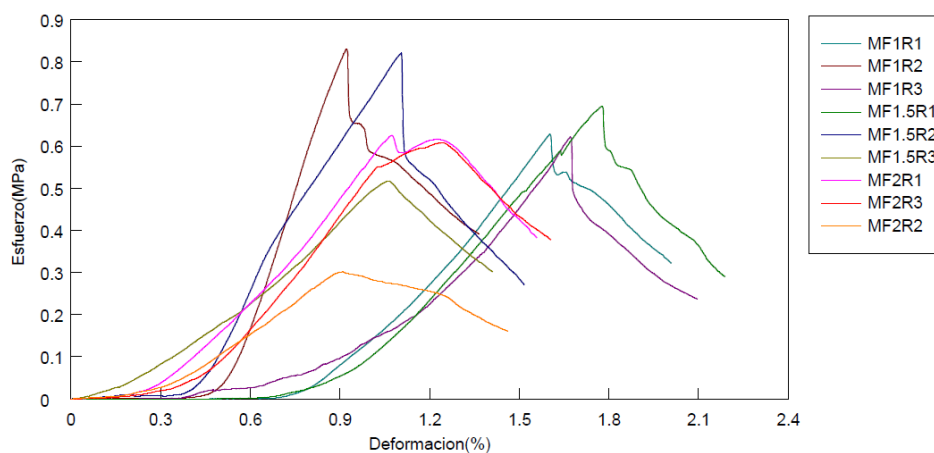
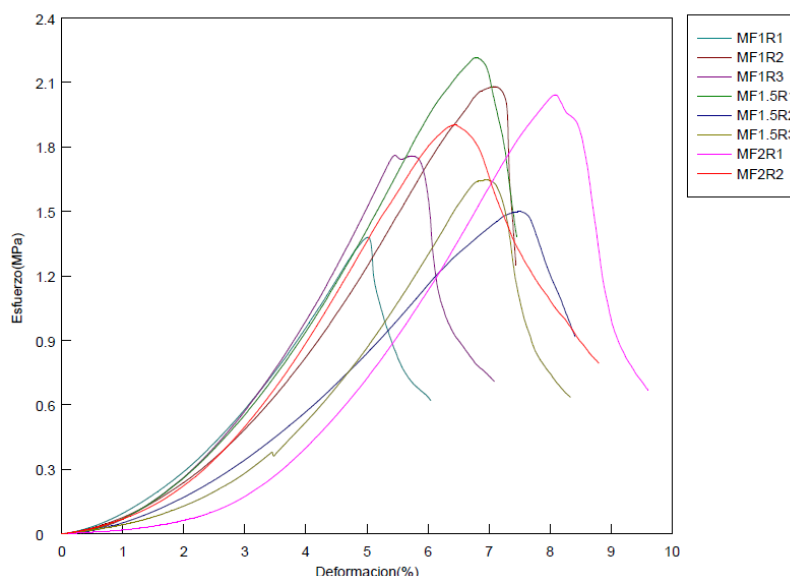


Figura 3. 4 Diagrama esfuerzo-deformación en ensayo de tensión

Con los datos obtenidos por la máquina de ensayos universales, de acuerdo al procedimiento en la investigación desarrollada por Kan et al. [22], se obtuvo valores de deformación máxima promedio para cada combinación. La combinación MF1, que contiene el 1% de volumen en fibras de PVA, presentó la mayor deformación máxima promedio de 1.39%, mientras que, con un 2% de volumen en fibras, se registró la menor deformación máxima promedio, de 1.07%. Por lo tanto, se puede concluir que un aumento del porcentaje de fibra en la muestra disminuye la



deformación máxima promedio del material. Además, la combinación MF1, que contiene el 1% de volumen en fibras de PVA, presentó mayor esfuerzo máximo promedio de 0.69 MPa mientras que con un 2% de volumen en fibras, se registró menor esfuerzo máximo promedio de 0.51 MPa concluyendo también que al aumentar el porcentaje en volumen de fibra disminuye el esfuerzo máximo promedio. A diferencia del hormigón ordinario, el material compuesto de cemento híbrido y fibras de PVA, muestra ductilidad relacionada a un endurecimiento por deformación. [35] Diversos estudios indican que la ductilidad a la tracción puede alcanzar hasta un 5%, que es 500 veces superior a la de un hormigón ordinario. [36] La adición de fibras de PVA limita la propagación de grietas en el hormigón [37], permitiendo alcanzar valores mayores de deformación máxima, mejorando la resistencia a la tensión. Wei et al.[38] descubrieron que la resistencia a la tracción del concreto alcanza cerca de 3.6MPa (a 28 días de envejecimiento) añadiendo entre 0.9 a 1.5% en volumen de fibras. De acuerdo con Kan [22] al añadir 1.1% de fibra se obtuvo un esfuerzo máximo de tensión promedio de 2,98 MP (a 28 días de envejecimiento), utilizando cenizas volantes y zeolitas activadas con hidróxido de sodio y silicato de sodio, con un pre-tratamiento de recubrimiento oleico en las fibras. En la presente investigación se alcanzó un esfuerzo máximo de 0.69MPa, el cual es menor a los resultados obtenidos en otros estudios. Esto puede atribuirse a la influencia de la incorporación de fibras en la trabajabilidad (fluidez) del hormigón y la combinación entre fibra y matriz de hormigón. [39]. Por otro lado, la figura 3.5 muestra las curvas del diagrama esfuerzo- deformación del ensayo de flexión, para cada una de las combinaciones y sus réplicas de la Fase 3.



**Figura 3. 5 Diagrama esfuerzo-deformación en ensayo de flexión**

**Tabla 3. 5 Resultados del ensayo de flexión**

<b>ENSAYO DE FLEXIÓN</b>	
<b>Combinación</b>	<b>Esfuerzo Máximo promedio [MPa]</b>
MF1	1,74 ± 0,16
MF1.5	1,79 ± 0,17
MF2	1,97 ± 0,04

Este nuevo material desarrollado después de que se produce una grieta, el esfuerzo de tensión se transfiere de la matriz de concreto a la fibra de refuerzo; ya que ésta tiene una gran capacidad de unión con las matrices de geopolímeros. La investigación desarrollada por Kaputri [20] demostró que la resistencia a la tracción de los concretos reforzados con fibras (0.3, 0.5 y 0.8 en wt%) es mayor en comparación a concretos convencionales de geopolímeros de metacaolín; sin embargo, la resistencia a la tensión disminuye con el aumento de porcentaje de fibras. Además, se indica que la temperatura de curado del concreto influye en la resistencia a la flexión, al introducir las muestras en un horno a 65°C durante 24 horas se obtienen mayores resultados. En la presente investigación, el curado se realizó a temperatura ambiente.

De acuerdo con la norma NTE INEN 1806:2015 [40], el material desarrollado podría ser utilizado como cemento de mampostería tipo N, para la unión de bloques y ladrillos no estructurales, realizar enlucidos y corregir detalles constructivos que no tengan aporte estructural. La norma no especifica la composición química para el cemento. La combinación MSP4, de la cual se obtuvieron los parámetros óptimos para la tercera fase, excede la resistencia a la compresión de 6,2 MPa a 28 días de envejecimiento. Además, las fibras de PVA incrementan la resistencia al fisurado, lo cual provoca que la propagación de grietas sea mucho más lenta. [41]

Finalmente, es importante recalcar que la utilización de zeolita en compuestos cementicios de construcción tiene efectos positivos en la reducción de los gases de efecto invernadero. Es así que, la emisión de dióxido de carbono por cada tonelada de COP oscila entre 0,82 y 1,0 toneladas métricas, siendo uno de los sectores de producción que más afecta al medioambiente.[42] La principal ventaja de utilizar

zeolita en el hormigón es que absorbe el dióxido de carbono de la atmósfera y reduce las emisiones totales de dióxido de carbono en el proceso de fabricación del hormigón. Generalmente, el hormigón tiene capacidad para absorber dióxido de carbono, pero este fenómeno se produce de forma lenta.[39] La capacidad de absorción de dióxido de carbono del hormigón aumenta aproximadamente un 30% cuando se mezcla con zeolita. La cantidad de CO<sub>2</sub> que puede absorber el hormigón está directamente relacionada con la cantidad de zeolita que se le añade.[1]

### 3.4 Análisis de Costos

- *Costo de aglutinante + arena + fibras PVA + superplastificante*

En la tabla se muestra el costo de arena y cada uno de los insumos que componen el aglutinante, determinando que el costo unitario de la matriz es de \$10,22 por cada saco de cemento de 50kg.

**Tabla 3. 6 Cálculo del costo unitario**

Insumo	Unidad de medida	No. Unidades	Costo por unidad	Costo total por insumo	Costo Unitario por insumo	%
<b>Cemento</b>	Kilo	7,50	\$0,17	\$1,28	\$ 1,28	13%
<b>Zeolita</b>	Kilo	16,45	\$0,20	\$3,29	\$ 3,29	32%
<b>Hidróxido de sodio</b>	Kilo	0,61	\$1,50	\$0,92	\$ 0,92	9%
<b>Sulfato de magnesio</b>	Kilo	0,44	\$3,00	\$1,32	\$ 1,32	13%
<b>Arena</b>	Kilo	25,00	\$0,05	\$1,25	\$ 1,25	12%
<b>Superplastificantes</b>	L	0,0949	\$2,61	\$0,2	\$ 0,25	2%
<b>Fibras de PVA</b>	Kilo	0,801	\$2,40	\$1,92	\$ 1,92	19%
<b>Costo Unitario:</b>					\$ 10,22	100,0%

# CAPÍTULO 4

## 4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- El nuevo material puede reducir los efectos del agente emisor de CO<sub>2</sub>, debido al uso del cemento ordinario Portland en menor proporción en la mezcla del concreto. La combinación óptima presenta un 32,9 wt% de zeolita y 15 wt% en cemento. Además, la cantidad de dióxido de carbono que puede absorber el hormigón está directamente relacionada con la cantidad de zeolita que se le añade.
- El porcentaje de superplastificante no influye significativamente en la trabajabilidad de la muestra, debido a que este actúa únicamente en la fracción de cemento, el cual se incluye únicamente en un 15 wt% de la combinación
- Se alcanzó una deformación máxima de 1.32% menor a la esperada (5%), debido a una posible incorporación ineficiente de las fibras en la trabajabilidad (fluidez) del hormigón y la combinación entre fibra y matriz de hormigón.
- El costo del producto (por sacos de 50kg) con fibras de PVA es \$10,12; este valor en comparación con el costo del cemento tradicional es \$1,62 más costoso.
- De acuerdo a los ensayos de laboratorio realizados, el material desarrollado posee características similares al cemento de mampostería tipo N, según la norma NTE INEN 1806:2015. Presenta 7,10 MPa de resistencia a la compresión y al ser un compuesto con fibras de refuerzo posee un mejor desempeño ante la propagación de grietas.

### 4.2 Recomendaciones

- Modificar la trabajabilidad objetivo a fin de obtener una combinación más fluida para compatibilizar las fibras. Para esto, se recomienda emplear el método de superficie de respuestas considerando la relación agua/aglutinante y el % de superplastificante como variables de respuesta.
- Para futuros estudios, se recomienda utilizar fibras como el polipropileno y polietileno, en el diseño de cementos híbridos, con la finalidad de optimizar

costos. Las fibras de PVA en la presente investigación fueron importadas, lo que provocó un costo mayor. Al utilizar fibras de polipropileno el costo final por un saco de 50kg es de \$9,99 mientras que el costo final empleando fibras de polietileno es de \$10,07; por lo tanto, se obtiene una reducción de \$0,23 y \$0,15 respecto al precio inicial.

- Realizar un pretratamiento a las fibras sintéticas. Se podrían sumergir en un agente oleico, como dímero de alquilceteno o polisiloxano epoxi modificado [35], días antes de la preparación de las muestras, para mejorar la trabajabilidad del mortero, y por ende mejorar la compatibilidad con la matriz. No es recomendable utilizar fibras naturales en este experimento, ya que presentan una ductilidad mucho más baja.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Durisety, K. Palcham, and K. Prasad Babu, "The Concrete Incorporated With Zeolite for Reducing Atmospheric Carbon Dioxide," *Online*), vol. 8, no. 6, 2020, doi: 10.35940/ijrte.F8083.038620.
- [2] C. Ospina Meneses, S. Marcela, C. Valenzuela, and J. Régulo, "Revista Lasallista de Investigación," *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 5, no. 2, pp. 112–123, 2008, Accessed: Aug. 20, 2021. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=695502>.
- [3] G. Habert, "Environmental impact of Portland cement production," *Eco-Efficient Concr.*, pp. 3–25, Jan. 2013, doi: 10.1533/9780857098993.1.3.
- [4] C. Juarez, "Concretos a base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lecheguilla), como materiales para construcción en México."
- [5] Y. T. Tran, J. Lee, P. Kumar, K. H. Kim, and S. S. Lee, "Natural zeolite and its application in concrete composite production," *Composites Part B: Engineering*, vol. 165. Elsevier Ltd, pp. 354–364, May 15, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.12.084.
- [6] K. S. Devi, V. V. Lakshmi, and A. Alakanandana, "IMPACTS OF CEMENT INDUSTRY ON ENVIRONMENT-AN OVERVIEW," *Asia Pacific J. Res. ISSN*, pp. 2347–4793, 2017, Accessed: Oct. 06, 2022. [Online]. Available: [www.apjor.com](http://www.apjor.com).
- [7] N. Mohamad, K. Muthusamy, R. Embong, A. Kusbiantoro, and M. H. Hashim, "Environmental impact of cement production and Solutions: A review," in *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 48, pp. 741–746, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.212.
- [8] "Portland Cement: Composition, Production and Properties - G. C. Bye - Google Libros." <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=W8oYW15gH18C&oi=fnd&pg=PA46&dq=portland+cement+production+process&ots=GcGF3Y7cCY&sig=TvSrvNeGJFM0IRZm6MTbSI2xWVE#v=onepage&q&f=true> (accessed Oct. 06, 2022).
- [9] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, and L. O. Meida, "Carbon Dioxide Emission from the Global Cement Industry SafeBBE-RIVM View project CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM THE GLOBAL CEMENT INDUSTRY \*," 2014, doi:

10.1146/annurev.energy.26.1.303.

- [10] K. J. D. Mackenzie and M. Welter, *Geopolymer (aluminosilicate) composites: Synthesis, properties and applications*. Woodhead Publishing Limited, 2014.
- [11] C. a. Strydom and J. C. Swanepoel, "Utilisation of fly ash in a geopolymeric material," *Appl. Geochemistry*, vol. 17, no. 8, pp. 1143–1148, 2002.
- [12] A. Wongsa, A. Wongkvanklom, D. Tanangteerapong, and P. Chindaprasirt, "Comparative study of fire-resistant behaviors of high-calcium fly ash geopolymer mortar containing zeolite and mullite," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 9, no. 5, pp. 307–321, 2020, doi: 10.1080/21650373.2020.1748741.
- [13] C. Villa, E. T. Pecina, R. Torres, and L. Gómez, "Geopolymer synthesis using alkaline activation of natural zeolite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 11, pp. 2084–2090, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.052.
- [14] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, G. Kovalchuk, L. M. Ordoñez, and M. C. Naranjo, "Opc-fly ash cementitious systems: Study of gel binders produced during alkaline hydration," *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2958–2966, 2007, doi: 10.1007/s10853-006-0585-7.
- [15] "Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications." <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NqijAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&q=industrial+applications+of+geopolymers&ots=e2n71fxkht&sig=6G7m228V3pdoABWO6vWkaZNL2wU#v=onepage&q&f=true> (accessed Oct. 06, 2022).
- [16] D. D. Burduhos Nergis, M. M. A. B. Abdullah, P. Vizureanu, and M. F. Mohd Tahir, "Geopolymers and Their Uses: Review," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 374, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/374/1/012019.
- [17] R. Babaie, M. Abolfazli, and A. Fahimifar, "Mechanical properties of steel and polymer fiber reinforced concrete," *J. Mech. Behav. Mater.*, vol. 28, no. 1, pp. 119–134, 2020, doi: 10.1515/jmbm-2019-0014.
- [18] M. Reed, W. Lokuge, and W. Karunasena, "Fibre reinforced geopolymer concrete with ambient curing for in-situ applications," vol. 18.
- [19] A. Conforti, R. Zerbino, and G. A. Plizzari, "Influence of steel, glass and polymer fibers on the cracking behavior of reinforced concrete beams under flexure," *Struct. Concr.*, vol. 20, no. 1, pp. 133–143, 2019, doi: 10.1002/suco.201800079.
- [20] M. L. Manfaluthy and J. J. Ekaputri, "The Application of PVA Fiber to Improve the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete," *MATEC Web Conf.*, vol. 138, 2017, doi: 10.1051/matecconf/201713801020.

- [21] P. Dong, M. R. Ahmad, B. Chen, M. J. Munir, and S. M. S. Kazmi, "A study on magnesium phosphate cement mortars reinforced by polyvinyl alcohol fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 302, no. June, p. 124154, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124154.
- [22] L. Kan, L. Zhang, Y. Zhao, and M. Wu, "Properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced fly ash based Engineered Geopolymer Composites with zeolite replacement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117161, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117161.
- [23] L. Lei and J. Plank, "A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 10, pp. 1299–1306, 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.07.001.
- [24] H. Gutiérrez Pulido and R. de la Vara Salazar, *Análisis y diseño de experimentos*, 2da ed. 2004.
- [25] P. Elmer, "Serie Spectrum IR," 2009. [www.perkinelmer.com](http://www.perkinelmer.com) (accessed Oct. 25, 2022).
- [26] Shimadzu, "UH-X/FX Series," *Hydraulic Universal Testing Machines*, 2018. <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/uh-xfx-series/configurations.html> (accessed Oct. 25, 2022).
- [27] IKA, "IKA Digital Labortechnik Model #RW 20 DZM.N S1," *RW 20 digital*, 2016. <https://www.ika.com/es/Productos-Lab-Eq/Agitadores-de-Helice-csp-187/RW-20-digital-cpdt-3593000/> (accessed Oct. 25, 2022).
- [28] M. Bradley, "FTIR Spectroscopy Basics," *Introduction to FTIR spectroscopy*, 2017. <https://www.thermofisher.com/dk/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-basics.html> (accessed Oct. 07, 2022).
- [29] American Society of Testing Materials, "ASTM C 143 – 01. Método de Ensayo Estándar para REVENIMIENTO DEL CONCRETO DE CEMENTO HIDRAULICO.," *ASTM Int.*, pp. 1–6, 2001.
- [30] A. M. T. Hassan, S. W. Jones, and G. H. Mahmud, "Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete(UHPFRC)," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 874–882, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030.
- [31] J. Yang, J. Su, B. Chen, X. Luo, and X. Shen, "The optimized design of dog-



- bones for tensile test of Ultra-high performance concrete,” 2017.
- [32] C. C. Test, T. Drilled, C. Concrete, and S. T. Panels, “C 1609/C 1609M-05 Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading),” *Astm*, vol. i, no. C 1609/C 1609M-05, pp. 1–8, 2005.
- [33] B. A. Ramesh and B. Kondraivendhan, “Effect of Accelerated Carbonation on the Performance of Concrete Containing Natural Zeolite,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no. 4, pp. 1–10, 2020, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003050.
- [34] · Book, “Geopolymer CHEMistry and Applications, 5th edition,” *J. Davidovits.– Saint-Quentin, Fr.*, no. January 2008, p. 680, 2008, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/265076752>.
- [35] M. F. Arain, M. Wang, J. Chen, and H. Zhang, “Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC),” *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 107–116, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.072.
- [36] V. C. Li, “On Engineered Cementitious Composites (ECC) A Review of the Material and Its Applications,” *J. Adv. Concr. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 215–230, 2003, doi: 10.3151/jact.1.215.
- [37] W. Hu, X. Yang, J. Zhou, H. Xing, and J. Xiang, “Experimental research on the mechanical properties of PVA fiber reinforced concrete,” *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 5, no. 18, pp. 4563–4567, 2013, doi: 10.19026/rjaset.5.4375.
- [38] P. Zhang, X. Han, Y. Zheng, J. Wan, and D. Hui, “Effect of PVA fiber on mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete,” *Rev. Adv. Mater. Sci.*, vol. 60, no. 1, pp. 418–437, 2021, doi: 10.1515/rams-2021-0039.
- [39] S. H. Xiao *et al.*, “Dynamic properties of PVA short fiber reinforced low-calcium fly ash - slag geopolymer under an SHPB impact load,” *J. Build. Eng.*, vol. 44, no. March, p. 103220, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103220.
- [40] NTE INEN 1528, “Cemento para mampostería. Requisitos,” *INEN*, vol. 1, p. 4, 2015, [Online]. Available: <https://archive.org/stream/ec.nte.1528.2012#page/n6/mode/1up%5Cnhttps://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.1528.2012.pdf>.
- [41] C. Zanotti, P. H. R. Borges, A. Bhutta, and N. Banthia, “Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 80, pp. 307–

316, 2017, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2016.12.014.

- [42] A. Alsalman, L. N. Assi, R. S. Kareem, K. Carter, and P. Ziehl, "Energy and CO<sub>2</sub> emission assessments of alkali-activated concrete and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of concrete," *Clean. Environ. Syst.*, vol. 3, no. April, p. 100047, 2021, doi: 10.1016/j.cesys.2021.100047.

# 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.**

Los materiales de construcción con fines estructurales hechos a base de cemento Portland presentan una ductilidad de 0.1%, por lo cual, se complementa su uso con varillas de acero para reforzamiento. La ductilidad en los materiales de construcción es de gran importancia debido a que esta propiedad aumenta la capacidad de soportar cargas cíclicas, en tensión y de corte, presentando un mejor desempeño en eventos sísmicos, a priori. Por otro lado, la emisión excesiva de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero presentes en el proceso de manufactura del cemento ordinario Portland representan una problemática ambiental global, además del consumo de combustibles indispensables en la producción de clínker considerando que se consume cerca del 7% de la energía industrial global.

#### **Factores críticos:**

- Impacto ambiental:

La Organización Meteorológica Mundial (WMO), como agencia especializada de las Naciones Unidas, ha advertido que las concentraciones de gases de efecto invernadero, se encuentran en niveles nunca alcanzados. Si continúa la tendencia actual, es muy posible que, para finales del presente siglo, se evidencien aumentos de temperatura entre 3 a 5°C. Se espera que, en el 2065, el nivel del mar cuente con 24 a 30 cm más que en el año 2019, debido al derretimiento del hielo ártico, aumento

de la temperatura del océano, y otros eventos climáticos extremos que influirán sobremanera en la infraestructura civil, cultivos y ecosistemas.

Sólo la industria del cemento emite cerca del 9% de las emisiones globales de dióxido de carbono. Si este sector fuera un país, podría posicionarse luego de China y Estados Unidos como los causantes más potentes de gases de efecto invernadero. Por esto, las investigaciones basadas en el reemplazo parcial del cemento Portland en la fabricación de concreto va en aumento por medio de materiales cementicios suplementarios que se presentan como una alternativa ecológica. En este proyecto implementamos zeolitas naturales como reemplazo parcial del cemento portland; las zeolitas son materiales puzolánicos presentes en el aglutinante para la formación del concreto: no sólo cumplen con las propiedades del cemento Portland sino que las superan con el valor agregado de disminuir la contaminación ambiental. Se estima que con la producción de cemento por medio de zeolitas naturales activadas alcalinamente pueden resultar en una disminución de hasta el 86% de las emisiones de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de concreto.

- Impacto económico

Las excesivas emisiones de dióxido de carbono también generan graves consecuencias en la economía global. De acuerdo con el estudio realizado por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, en el año 2016 se predijo que la contaminación del aire le costaría al mundo cerca de 2,6 billones de dólares al año y para el 2060 representaría el 1% del PIB mundial. Adicional, la contaminación del ambiente podría llegar a causar cerca de 9 millones de muertes prematuras para el 2060 incrementado al mismo tiempo los gastos de salud a 25 billones de dólares en este mismo período de tiempo. Es por esto que, para mitigar este impacto se desarrollan múltiples proyectos de cementos verdes que permitan controlar esta contaminación del ambiente evitando que los presupuestos estatales establecidos se vean alterados por el incremento en sus gastos en cuanto a salud. Al implementar zeolita en la matriz del concreto el envejecimiento ocurre a temperatura ambiente, no es necesario la adición de calor (lo cual demanda energía), y se obtiene mayor resistencia a la compresión.

- **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:** Nuestro proyecto promueve la implementación de materiales puzolánicos no tradicionales obtenidos de forma local de la cordillera Chongón Colonche con la finalidad de mitigar las emisiones de dióxido de carbono presentes en el proceso de manufactura del cemento Portland. La extracción de forma masiva de este tipo de materiales resulta económicamente viable para las personas que cuentan con los derechos de tierra de esta cordillera, no obstante, para los habitantes de las zonas aledañas representa la contaminación del aire por la generación del polvillo tóxico que se encuentra constituido por químicos pesados absorbidos por seres humanos y por animales afectando su calidad de vida. Adicional, las zeolitas naturales son recursos no renovables y, al ser sobreexplotados generan un gran déficit ya que cada año de acuerdo con el Fondo Mundial para la Naturaleza se consume un 20% más de los recursos que se pueden regenerar y esta tendencia va en aumento. [1]

## **Partes interesadas**

### **Directas:**

- Productores de cemento híbrido: Clientes potenciales de las compañías extractoras de zeolita.
- Compañías extractoras de zeolita: Encargados de la explotación de zeolita.
- Habitantes de las zonas aledañas a las minas de extracción de zeolita: Principales afectados

## Indirectas:

- Gobierno y municipios locales: Ente encargado de administrar, regular, controlar y gestionar el desarrollo de la industria minera priorizando el desarrollo sustentable y el fomento de la participación social. [2]

Los responsables de tomar una decisión en base al dilema ético son el gobierno, los municipios locales bajo los cuales recae la responsabilidad de controlar y regular las actividades mineras priorizando el bienestar social y el desarrollo sustentable.

- **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.**

El proyecto desarrollado en la materia integradora es inédito en el país y la región. Se propuso una solución simultánea a dos problemáticas: La excesiva emisión de gases de efecto invernadero provenientes del proceso de producción del cemento Portland y la baja ductilidad del concreto. El nuevo material propuesto contiene un 32,53 wt% de zeolita, y un 14,84 wt% de cemento. Se desconocen el valor de Kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento híbrido, puesto que el Análisis del Ciclo de Vida está contemplado en una fase futura del proyecto. Sin embargo, en base a estudios anteriores, se asegura que la zeolita en el hormigón y el mortero disminuye la permeabilidad e impide reacciones dañinas como reacciones álcali-sílice y álcali-carbonato que causan agrietamiento del hormigón.

La zeolita actualmente no se produce en el país de forma masiva, a diferencia del concreto. A corto plazo (1 año), los costos de fabricación del cemento híbrido pueden ser elevados. La zeolita es un recurso muy abundante, presente en las cordilleras y

montañas de las distintas regiones de Ecuador. Generalmente se obtiene por medio de explotación a cielo abierto. Al igual que con todas las formas de extracción de minerales a gran escala, la minería a cielo abierto puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y los ecosistemas circundantes. [3] Se conoce que este tipo de minería elimina la vegetación y la superficie del sitio de excavación queda completamente estéril, pudiendo tardar décadas en recuperarse. Los pozos mineros abandonados también pueden presentar riesgos extremos. Si en los próximos años se promueve la explotación de zeolitas a gran escala, los costos del material disminuirán, no obstante, se desencadenará una nueva forma de contaminación. En este caso, una posible solución sería el uso de residuos industriales, como cenizas volantes o escoria de alto horno, como reemplazo parcial al cemento Portland. [4]

También, para reducir costos a largo plazo, se podría reemplazar las fibras sintéticas importadas de alcohol polivinílico, por fibras nacionales, como el polipropileno.

## Referencias

- [1] “WWF recuerda que la humanidad necesitaría casi tres Planetas para satisfacer sus demandas en 2050 | WWF España.” <https://www.wwf.es/?19960/3-planetas> (accessed Sep. 19, 2022).
- [2] R. Oficial Suplemento, “LEY DE MINERIA Estado: Vigente ASAMBLEA NACIONAL COMISION LEGISLATIVA Y DE FISCALIZACION,” Accessed: Sep. 19, 2022. [Online]. Available: [www.lexis.com.ec](http://www.lexis.com.ec).
- [3] “Pros y contras de la minería a cielo abierto.” [https://www.ehow.co.uk/info\\_8280665\\_open-pit-mining-pros-cons.html](https://www.ehow.co.uk/info_8280665_open-pit-mining-pros-cons.html) (accessed Sep. 18, 2022).
- [4] M. K. Dash, S. K. Patro, and A. K. Rath, “Sustainable use of industrial-waste as partial replacement of fine aggregate for preparation of concrete – A review,” *Int. J. Sustain. Built Environ.*, vol. 5, no. 2, pp. 484–516, 2016, doi: 10.1016/j.ijsbe.2016.04.006.