



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

Evaluación de las propiedades mecánicas de morteros de cemento con  
Ceolita

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO CIVIL**

**Nombre de los autores:**

NICOLÁS ESTEBAN REGALADO ORTEGA

CAROLINA GISELLE CRESPO HEREDIA

**Nombre del director del trabajo:**

BERNARDO ANDRÉS FEIJOO GUEVARA

**CUENCA, ECUADOR**

**2024**

## **DEDICATORIA**

Con inmenso cariño y gratitud infinita, dedico este trabajo a mis adorados padres, Esteban y Ximena, los cuales me otorgaron la inestimable oportunidad de estudiar esta prestigiosa carrera. Su amor sin límites, sacrificio y sabiduría han sido mi mayor fuente de inspiración a lo largo de este proceso académico. A ustedes, queridos míos, les agradezco eternamente por ser mi luz y mi motivación.

A mis queridos abuelos, que, con su complicidad inquebrantable y ternura lograron sembrar en mí el valor de la perseverancia. Pues este logro es de su propiedad también, su presencia, legado y enseñanzas han sido esenciales en cada paso que he dado durante mi vida.

A toda mi familia, amigos y compañeros universitarios, su afecto y ánimo constante han hecho de esta etapa universitaria una etapa inolvidable y memorable. Las alegrías y vivencias en este periodo de vida me han hecho sentirme amado y valorado.

**Nicolás Esteban Regalado Ortega**

A mis padres, Anita y Pablo, por su amor incondicional y su apoyo a lo largo de esta etapa universitaria, por sus sacrificios, enseñanzas, paciencia y sobre todo ejemplo de perseverancia que me han guiado a lo largo de este camino. Gracias por confiar en mí incluso en los momentos que dudaba de mis propias capacidades.

A mi hermano, Tomás, por ser mi compañía y refugio en momentos difíciles. Gracias por estar siempre conmigo, apoyarme y compartir logros, sueños y aspiraciones. Sin su apoyo no hubiera podido llegar hasta aquí.

A mis colegas, amigos y compañeros, por los momentos compartidos en esta travesía académica, por hacer que la etapa universitaria no solo consista en estudiar, sino también en compartir momentos valiosos con esa familia que elegimos.

Además, quiero dedicar este trabajo a mí misma, por la perseverancia, el esfuerzo y la dedicación invertidos. Este es el resultado de años de preparación, representando un paso importante en mi desarrollo personal y profesional.

Finalmente, dedico este trabajo a la memoria de mi abuelita Rosa Clotilde Abril, cuya influencia sigue siendo una inspiración en mi vida. Este logro es también en su honor.

**Carolina Giselle Crespo Heredia**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar nuestra más sincera gratitud hacia nuestro director de tesis Ing. Bernardo Feijoo Guevara, quien con sus conocimientos, vivencias y experiencias profesionales nos permitieron la concepción de este proyecto, su compromiso y colaboración a lo largo de todo el proceso fueron constantes fundamentales para el desarrollo y culminación de nuestra propuesta.

De la misma manera, queremos expresar nuestro agradecimiento hacia nuestros docentes que contemplaron nuestro crecimiento educacional en la institución universitaria. Cada consejo y aprendizaje serán considerados plenamente en nuestra vida profesional.

## **RESUMEN**

La Zeolita se ofrece a la industria constructora como recurso versátil y valioso debido a la disponibilidad del mismo, procesos de tratamiento elementales e impactos ambientales reducidos. El objetivo principal fue evaluar los efectos que produce la sustitución del cemento por Zeolita en ensayo de compresión y porosidad. Se implementó porcentajes de sustitución del 10, 15 y 20% con tamaños de partícula diferente a edades de 3, 7 y 28 días. Se demostró que los morteros que constituyen un 15% de Zeolita a las edades de 7 y 28 días presentan una mejora en las propiedades mecánicas establecidas frente a morteros tradicionales. Se pudo evidenciar que, la morfología y el tamaño de partículas de Zeolita afecta en la hidratación de los silicatos y adherencia de los demás componentes.

**Palabras clave:** Morfología, morteros, recurso, silicatos, sustitución, tamaño de partícula.

## **ABSTRACT**

Zeolite is a valuable resource that offers versatility to the construction industry due to its availability, elementary treatment processes, and reduced environmental impacts. The main objective was to evaluate the effects of substituting cement with zeolite on compression and porosity tests. Substitution percentages of 10, 15, and 20% were implemented with different particle sizes over periods of 3, 7, and 28 days. It was demonstrated that mortars containing 15% zeolite at 7 and 28 days showed an improvement in established mechanical properties compared to traditional mortars. It was evidenced that its morphological composition and particle size affect the hydration of silicates and adherence of other components.

**Key words:** Morphology, mortars, resource, silicates, substitution and particle size.

## INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT .....	iv
INDICE DE CONTENIDOS .....	v
INDICE DE FIGURAS.....	x
INDICE DE TABLAS .....	xiii
INDICE DE ECUACIONES .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	3
OBJETIVOS .....	3
1 MARCO TEÓRICO .....	3
1.1 Problemática.....	3
1.2 Alcance.....	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Puzolanas.....	7
1.4.1 Acercamiento histórico .....	7
1.4.2 Definición.....	8

1.4.3	Características de las puzolanas .....	8
1.4.4	Clasificación de las puzolanas.....	9
1.4.5	Usos generales de puzolanas .....	11
1.4.6	Puzolanas en Ecuador.....	12
1.4.7	Reacción puzolánica.....	12
1.5	Zeolita.....	14
1.5.1	Acontecimientos históricos .....	14
1.5.2	Definición.....	14
1.5.3	Estructura de Zeolitas.....	15
1.5.4	Clasificación.....	17
1.5.5	Características de las Clinoptilolitas .....	19
1.5.6	Propiedades físicas .....	19
1.5.7	Propiedades químicas .....	20
1.5.8	Zeolita natural en Ecuador .....	22
1.5.9	Zeolita en ingeniería.....	23
1.5.10	Aplicaciones adicionales .....	24
1.6	Cemento .....	25
1.7	Fabricación del cemento Portland.....	25
1.8	Constituyentes del cemento Portland .....	26
1.9	Propiedades del cemento.....	29

1.9.1	Finura de molido .....	29
1.9.2	Calor de hidratación .....	29
1.9.3	Resistencias mecánicas .....	30
1.9.4	Peso específico .....	30
1.9.5	Estabilidad de volumen .....	30
1.10	Tipos de cemento.....	31
1.11	Hidratación .....	32
1.12	Agregados.....	32
1.12.1	Finos .....	32
1.13	Agua.....	33
1.14	Cemento portland puzolánico.....	33
1.14.1	Enfoque con Zeolita .....	34
1.15	Morteros.....	35
1.15.1	Usos de morteros.....	35
1.15.2	Clasificación de morteros según uso.....	37
1.15.3	Características de los morteros en su fase plástica.....	37
1.15.4	Características de los morteros en su fase endurecida .....	37
CAPÍTULO II.....		39
2 METODOLOGÍA.....		39
CAPÍTULO III.....		41



3	DESARROLLO.....	41
3.1	Consecución de la puzolana Zeolita.....	41
3.1.1	Composición morfológica.....	41
3.1.2	Densidad.....	41
3.1.3	Adsorción .....	44
3.1.4	Composición química.....	47
3.1.5	Clasificación de partículas .....	47
3.2	Cemento .....	48
3.3	Árido fino .....	50
3.3.1	Análisis Granulométrico árido fino.....	50
3.3.2	Curva granulométrica árido fino .....	53
3.4	Morteros .....	54
3.4.1	Dosificación de los morteros patrones .....	54
3.4.2	Dosificación de los morteros de cemento-Zeolita.....	55
3.5	Elaboración de los morteros.....	56
3.6	Curado de morteros .....	59
3.7	Ensayo de compresión simple.....	62
3.8	Ensayo de porosidad.....	64
3.9	Ensayo de fluidez en el hormigón.....	65
	CAPÍTULO IV.....	69

4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	69
4.1	Zeolita.....	69
4.1.1	Composición morfológica.....	69
4.1.2	Densidad.....	70
4.1.3	Adsorción .....	71
4.2	Análisis granulométrico .....	72
4.3	Resistencia a la Compresión .....	73
4.4	Porosidad.....	76
4.5	Fluidez.....	82
	CONCLUSIONES .....	83
	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA .....	86

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Muestra de una mina de Zeolita natural .....	15
<b>Figura 1.2</b> Configuración tetraédrica básica de Zeolita.....	16
<b>Figura 1.3.</b> Papel de cationes en la Zeolita .....	17
<b>Figura 1.4</b> Localización Zeolita en Ecuador .....	23
<b>Figura 3.1</b> Pesaje de la Zeolita para ensayo absorción .....	42
<b>Figura 3.2</b> Peso vacío del picnómetro.....	43
<b>Figura 3.3</b> Peso de picnómetro con agua .....	43
<b>Figura 3.4</b> Peso del picnómetro con agua más Zeolita .....	44
<b>Figura 3.5</b> Pesaje del molde vacío .....	45
<b>Figura 3.6</b> Pesaje del molde más la muestra de Zeolita.....	45
<b>Figura 3.7</b> Pesaje del molde con Zeolita incluyendo agua. ....	46
<b>Figura 3.8</b> Muestra de Zeolita y agua pasadas las 12 horas en el horno a 100°C.....	46
<b>Figura 3.9</b> Categorización de la Zeolita por tamaño de partícula .....	48
<b>Figura 3.10</b> Cemento hidráulico Atenas .....	49
<b>Figura 3.11</b> Proceso secado de árido fino .....	51
<b>Figura 3.12</b> Pesaje inicial de la muestra .....	52
<b>Figura 3.13</b> Clasificación de los tamices .....	52
<b>Figura 3.14</b> Colocación de tamices en el agitador mecánico.....	53
<b>Figura 3.15</b> Límites curva granulométrica norma INEN 872 (ASTM C33) .....	54
<b>Figura 3.16</b> Pesaje del árido fino: 1375 gramos .....	56
<b>Figura 3.17</b> Pesaje de la Zeolita: 50 gramos .....	57
<b>Figura 3.18</b> Pesaje del cemento hidráulico: 450gr.....	57
<b>Figura 3.19</b> Proceso de mezcla de los ingredientes .....	58

<b>Figura 3.20</b> Proceso de colocación y compactado de los morteros .....	58
<b>Figura 3.21</b> Desencofrado de Morteros .....	59
<b>Figura 3.22</b> Proceso de curado para morteros.....	60
<b>Figura 3.23</b> Especímenes sin grumos .....	63
<b>Figura 3.24</b> Cubos en la máquina de compresión .....	64
<b>Figura 3.26</b> Compactación por capas.....	66
<b>Figura 3.27</b> Enrasamiento la superficie .....	67
<b>Figura 3.28</b> Levantamiento del molde .....	67
<b>Figura 3.29</b> Distancia entre barra y el centro original del hormigón.....	68
<b>Figura 4.1</b> Análisis partículas de Zeolita .....	69
<b>Figura 4.2</b> Observación de componentes en la Zeolita.....	70
<b>Figura 4.3</b> Granulometría árido fino en base a norma INEN 872 (ASTM C33) .....	72
<b>Figura 4.4</b> Resistencia a compresión de mezcla convencional a diferentes edades.....	75
<b>Figura 4.5</b> Resistencia a compresión de mezclas con T200 a diferentes edades .....	75
<b>Figura 4.6</b> Resistencia a compresión de mezclas con T325 a diferentes edades .....	76
<b>Figura 4.7</b> Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 28 días .....	77
<b>Figura 4.8</b> Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 28 días .....	77
<b>Figura 4.9</b> Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 7 días.....	78
<b>Figura 4.10</b> Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 7 días.....	78
<b>Figura 4.11</b> Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 3 días.....	79
<b>Figura 4.12</b> Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 3 días .....	79
<b>Figura 4.13</b> Coeficiente de capilaridad 3 días.....	81
<b>Figura 4.14</b> Coeficiente de capilaridad 7 días.....	81

<b>Figura 4.15</b> Coeficiente de capilaridad 28 días.....	82
<b>Figura 4.16</b> Medición de la variación .....	83

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Requisitos de composición física para puzolanas naturales .....	10
<b>Tabla 1.2</b>	Requisitos de composición química para puzolanas naturales .....	11
<b>Tabla 1.3</b>	Tabla simplificada de clasificación de Meier .....	18
<b>Tabla 1.4</b>	Cualidades físicas más resaltables .....	20
<b>Tabla 1.5</b>	Valores típicos representativos en Zeolitas.....	20
<b>Tabla 1.6</b>	Silicatos y aluminatos fundamentales.....	27
<b>Tabla 1.7</b>	Límites comunes en la composición del cemento.....	27
<b>Tabla 1.8</b>	Composición convencional de compuestos químicos de cementos Portland ..	29
<b>Tabla 1.9</b>	Usos recurrentes en base a dosificación.....	36
<b>Tabla 3.1</b>	Composición química convencional de Zeolita.....	47
<b>Tabla 3.2</b>	Composición cemento Atenas tipo GU.....	49
<b>Tabla 3.3</b>	Requisitos físicos del cemento Atenas.....	50
<b>Tabla 3.4</b>	Dosificación morteros patrones .....	55
<b>Tabla 3.5</b>	Dosificación en base a los porcentajes de sustitución .....	55
<b>Tabla 3.6</b>	Apisonamientos de los morteros por capas en base a la norma de porosidad .	62
<b>Tabla 3.7</b>	Tolerancia admisible según la edad del ensayo .....	63
<b>Tabla 3.8</b>	Dosificación de la mezcla de hormigón.....	65
<b>Tabla 4.1</b>	Análisis Granulométrico del árido fino.....	73
<b>Tabla 4.2</b>	Resistencias a compresión de las distintas mezclas.....	74

## INDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.1:</b> Hidratación cemento portland simplificada.....	13
<b>Ecuación 1.2:</b> Reacción puzolánica .....	13
<b>Ecuación 3.1:</b> Ecuación de densidad.....	44
<b>Ecuación 3.2:</b> Ecuación de volumen.....	44
<b>Ecuación 4.1:</b> Cálculo del coeficiente de absorción .....	80
<b>Ecuación 4.2:</b> Cálculo de componentes del coeficiente de absorción $\epsilon e$ .....	80
<b>Ecuación 4.3:</b> Cálculo del componente de absorción m .....	80

## INTRODUCCIÓN

El uso de materiales para construcción con propiedades aglomerantes se remonta desde las antiguas civilizaciones, donde se optó por levantar edificaciones que utilizaban una variedad de combinaciones de minerales y tipos de piedra con agua para cohesionar ladrillos y bloques, dando lugar a una variedad de estructuras duraderas acordes a la época. Vidaud (2013) menciona que, alrededor del año 2570 A.C. los egipcios utilizaron mezclas elaboradas a partir de la unión de agua con yesos y piedra caliza para vincular bloques de piedra sólida, como los que se mantienen entre los bloques de las pirámides de Gizeh.

A partir del siglo VII A.C. los griegos se encargaron de elaborar morteros con una mayor resistencia a la contracción y rupturas. Lo lograban triturado la cal con el fin de conformar una estructura superficial densa, y a su vez, produciendo un incremento en la impermeabilidad del material y aceleración en la hidratación para mejorar la durabilidad del mismo. (Álvarez et al., 2015, p. 11). Por otra parte, los romanos para el siglo II A.C desarrollaron el cemento puzolánico mediante la combinación de caliza quemada con puzolanas naturales, particularmente de ceniza volcánica, que resultó en un compuesto con una elevada resistencia y propiedades cohesivas superiores.

Dentro del transcurso de los acontecimientos históricos, se ha propiciado el correcto desarrollo y refinamiento del compuesto cementante utilizado en la contemporaneidad, incluyendo los elementos que conforman al mismo y que cumplen una función vital en el desempeño del producto aglutinante. Dicho componente cementicio empleado por excelencia es el cemento hidráulico portland. Este tipo de cemento es un componente trascendental dentro del campo de la ingeniería civil; su presencia ha impulsado el progreso y la configuración de nuestras sociedades modernas, evidenciada en la mejora continua de la calidad de vida mediante proyectos ingenieriles.



No obstante, su ubicuidad en la civilización debe recordarnos los desafíos asociados con su uso excesivo para el planteamiento de medidas mitigadoras dentro de la industria constructiva. Hoy en día, la industria mencionada se centra en la ejecución de obras de construcción mediante el uso de materiales que brinden prioridad a la reducción de la contaminación durante su obtención y proceso de fabricación. Así mismo, se espera que estas medidas impacten positivamente en el rendimiento de productos como el cemento portland en sus diversas aplicaciones. Distintas entidades científicas presentes en la ingeniería civil, se han propuesto como misión hallar alternativas de componentes aglutinantes que sean capaces de sustituir total o parcialmente al cemento utilizado convencionalmente.

Estos estudios se enfocan en hallar materiales que no solo reduzcan la degradación ambiental en su obtención, sino también conserven o incluso potencien las propiedades del cemento portland. La inclusión de materiales innovadores en la industria de la construcción se considera un intento alentador por promover el uso de nuevos insumos sostenibles en los procesos constructivos. En el desarrollo de este procedimiento, la incorporación de minerales puzolánicos como la Zeolita en conjunto con el cemento prometen resultados alentadores y amigables con el medio ambiente. Maldonado (2021) enfatiza que, hay múltiples investigaciones llevadas a cabo por distintos autores en donde utilizan una puzolana natural como la Zeolita en calidad de sustituto parcial del cemento.

A través de la inclusión de este aluminosilicato se ha demostrado la mejora en cuanto a las propiedades de hormigones en estado fresco como endurecido. Así mismo, cabe recalcar que las puzolanas son elementos conformados principalmente por sílice amorfa, la cual en sí sola no se atribuye ninguna propiedad conglomerante, no obstante, en presencia de agua reaccionan con el hidróxido de calcio y forman compuestos aglomerantes (Maldonado, 2021).

# CAPÍTULO I

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Determinar el efecto de la sustitución de cemento por Zeolita en diferentes tamaños de partícula en propiedades mecánicas de morteros.

### Objetivos específicos

- Comparar física y morfológicamente la Zeolita en diferentes tamaños.
- Determinar la incidencia de la Zeolita en diferentes tamaños de partícula sobre la resistencia a la compresión de morteros de cemento.
- Determinar la incidencia de la Zeolita en diferentes tamaños de partícula sobre la porosidad de morteros de cemento.

## 1 MARCO TEÓRICO

### 1.1 Problemática

El cemento Portland está entre los componentes constructivos mayormente manufacturados en el mundo. Adicionalmente, es tal nuestra necesidad de dicho elemento que en el mundo se produce aproximadamente 3.6 mil millones de toneladas métricas por año, y se estima que para el 2030 el volumen aumente a 5 mil millones de toneladas métricas, como consecuencia de un desarrollo emergente en las economías globales. (Imbabi et al., 2012, p. 2).

Mundialmente, la industria del cemento enfrenta a grandes desafíos, entre ellos la disminución de reservas de combustibles fósiles, baja calidad de materia prima, y la continua demanda debido al crecimiento urbano global. Por otro lado, en un contexto de crisis ambiental

cada tonelada producida de cemento Portland es responsable de emitir la misma cantidad aproximadamente de dióxido de carbono hacia la atmósfera, lo que es equivalente al 6% de todas las emisiones de dióxido de carbono mundiales por actividad humana (Imbabi et al., 2012, p. 4).

Cabe recalcar que, el proceso de manufacturación del cemento hidráulico engloba bastantes fases, desde el transporte de materias primas hasta los procesos homogenización realizados en hornos rotatorios, para finalmente ser depositados en espacios de almacenaje. Es decir, todos los procesos involucrados en la producción de cemento conllevan consecuencias significativas de contaminación, desde la movilización de los componentes primarios hasta el almacenamiento del producto final (Castillo & Seijas, 2019, p. 169).

El Clinker, principal constituyente del cemento está integrado por compuestos especiales que, involucran procesos de sintetización de óxidos metálicos, aluminosilicatos y otros elementos en una etapa de secuencias denominada clinkerización. Durante este proceso químico, la descomposición de carbonatos de calcio genera grandes consumos de energía fósil y emisiones de anhídridos carbónicos, debido al uso de hornos de combustión a una temperatura que ronda los 1450 grados Celsius (Petroche & Ramírez, 2021, p. 3).

Además, en los distintos procesos de clinkerización, se emiten subproductos resultado de la combustión, tales como, cenizas y gases nitrosos directo a la atmósfera; dichas emisiones generan un impacto contraproducente en la calidad de aire y es esencial recalcar que es un problema inevitable durante la fabricación del cemento (Castillo & Seijas, 2019, p. 170). De la misma manera, la calcinación de piedra caliza es responsable de un porcentaje considerable de emisiones nocivas al entorno ambiental y un porcentaje menor relacionado a procesos indirectos de producción. (Maddalena et al., 2018, p. 186)

En el Ecuador, el panorama que atraviesa la industria cementera no es alentador, debido a que, los procesos y componentes empleados por dichas empresas han sufrido un aumento de costos. El incremento en el valor de las tasas energéticas, costos elevados de producción y deterioro de materia prima forman parte de los detonantes de la problemática, de la misma manera, la obligación de cuidar el medio ambiente resulta en un aumento de los costos para adquirir maquinaria que pueda llevar a cabo los mismos procesos con una reducción en las emisiones de dióxido de carbono. (Huillca, 2023, p. 33). Mora (2023) expone que, en Ecuador se ha evidenciado que los materiales de construcción tradicionales representan componentes costosos y poseen una disponibilidad tanto reducida como remota.

## **1.2 Alcance**

Este trabajo de titulación tiene como objetivo determinar el efecto de la sustitución parcial de cemento por Zeolita en diferentes tamaños de partícula en propiedades mecánicas de morteros. Enfocado en evaluar el desempeño en porosidad y resistencia de los morteros adicionados con Zeolita en diferentes porcentajes de sustitución comparados con los morteros convencionales.

En caso de tener resultados positivos, esto dará pie a promover más estudios tanto físicos, químicos y mecánicos los cuales habiliten la incorporación de la Zeolita como sustituyente parcial del cemento en el campo constructivo, generando así, una sucesión de beneficios en el ámbito ingenieril, ambiental y económico.

## **1.3 Justificación**

Las Zeolitas naturales han tenido su justo reconocimiento en diversas ramas, entre ellas la salud y agricultura por su manera de desenvolverse y aplicarse en diversos procedimientos, generando así, un aumento en las investigaciones que otorguen más aplicaciones de la misma. En Ecuador los primeros estudios en Zeolitas naturales se llevaron a cabo a finales de 1990; en la

actualidad posee un mercado establecido y tiene algunos propósitos, entre ellos tenemos en la capacidad de ser fertilizante, en acuicultura en piscinas camaroneras como agente absorbente de exceso de amonio y en las aguas servidas como parte de procesos purificadores (Fernández & Ureña, 2021, p.12).

A día de hoy, la tecnología usada en la ingeniería civil ha podido adjudicar más funciones para la Zeolita, entre ellas la capacidad de ser una adición mineral en las dosificaciones de cemento. Sin embargo, la sociedad carece del conocimiento necesario para apreciar la utilidad de dicha puzolana en el campo constructivo (Martínez, 2015). Dado el contexto, se ha optado por el uso de Zeolita para la sustitución parcial del cemento como parte del elemento con características cementantes.

La Zeolita tiene el potencial de convertirse en un recursopreciado para la industria constructora por su adaptabilidad, incluyendo la facilidad en cuanto la sustracción, la disponibilidad de depósitos puzolánicos, la poca o casi nula complejidad en su tratamiento y la considerable reducción de efectos negativos en relación al entorno ambiental. Incluso, en la correcta proporción de mezcla se puede mejorar ciertas cualidades de los hormigones tradicionales, donde destacamos el aumento de la resistencia a compresión, menor permeabilidad, disminución de segregación de agregados y aumento de la compacidad entre otras características.

Gokhan (2022) sostiene que, la sustitución de cemento por Zeolita resulta beneficiosa en un 15% a 20% del peso total, teniendo en cuenta aspectos como la resistencia a ataques químicos, permeabilidad, emisión de gases y cumplimiento con las especificaciones de las normas que rigen el uso del material en cada país. En cuanto a la puzolana como suplemento se pudo encontrar que, además de conllevar beneficios económicos y ambientales, sus propiedades mecánicas hacen que

este sea usado para mejorar la resistencia a la compresión y flexión en un 5-10% frente al concreto convencional.

Al tener un grupo perteneciente a materiales puzolánicos, la Zeolita es uno de los materiales más utilizados con éxito para sustituir fraccionalmente el contenido de cemento en la preparación de elementos de mortero u hormigón, mejorando sus propiedades mecánicas, respecto a resistencia, durabilidad y adsorción entre otros. Teniendo en cuenta que, el valor que usualmente se utiliza es de un 10% de dosificación del peso total de cemento. Agregando a lo anterior, se plantearán los análisis con porcentajes de sustitución del 10, 15 y 20% para propiciar la diferencia de resultados entre ellas.

## **1.4 Puzolanas**

### ***1.4.1 Acercamiento histórico***

El término puzolana tiene su origen en una localidad aledaña a Nápoles en Italia, denominada Puzzuoli, la cual se ubica en las faldas del volcán Vesubio. Fue la civilización romana la encargada de atribuir el término a todos los materiales que, por sus características, se asemejaban a las de puzolanas naturales en cuanto a contenido de ciertos minerales y su origen.

De la misma manera, dicha cultura logró percibir el potencial que este material podría ofrecer. Hallazgos arqueológicos del imperio romano evidencian estructuras conformadas por mezclas de cal, puzolana y agua. Entre ellas tenemos el Panteón de Roma, que ostenta el título de la mayor cúpula construida a partir de hormigón no armado, con un diámetro de 43,3 metros (Orrala & Gómez, 2015, p. 18).

### **1.4.2 Definición**

Es un material silíceo que en su estado normal no posee ninguna propiedad aglomerante resaltable ni actividad hidráulica, no obstante, experimenta una reacción química cuando se encuentran en partículas de polvo fino y en contacto con el agua, debido a la humedad, con el hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}_2$  en adelante) producido en la etapa de hidratación del cemento Portland. Dicho proceso conduce a la formación de silicato de calcio hidratado (CSH en adelante) y otros compuestos conglomerantes (Peñafiel, 2021).

Igualmente, Peñafiel (2021) enfatiza que, las puzolanas sin importar su clasificación están compuestas principalmente por sílice amorfa y que su color se exhibirá mediante una gama de variaciones que dependen de su ubicación geográfica y composición química entre otras. Es posible hallar puzolanas con tonalidades que comprenden desde el gris oscuro hasta el blanco lechoso, pasando por el blanco amarillento, rojizo y verdoso entre otros.

### **1.4.3 Características de las puzolanas**

- **Propiedades Físicas:** Se derivan de su tamaño de partícula o granulometría, el cual puede variar en dimensiones y formas en relación a su naturaleza y estructura. Comúnmente, son materiales muy finos y menos densos que el Clinker Portland. Las puzolanas tienden a estar molidas en partículas muy finas, y su eficacia incrementa cuando son capaces de fijar una gran porción de cal de manera rápida (Jara & Palacios, 2015, p. 23).
- **Propiedades Químicas:** Al momento de que las puzolanas son molidas, finalmente, su eficiencia aumenta en cuanto a la capacidad para fijar la cal del cemento Portland debido al contenido de sílice y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en su composición. Así mismo, tienen la capacidad de reducir la expansión de los

morteros y mejorar las resistencias mediante procesos térmicos con vapor saturado (Jara & Palacios, 2015, p. 24).

#### ***1.4.4 Clasificación de las puzolanas***

Se hallan diversos métodos de categorización para puzolanas en el medio, donde se analizan varios criterios. Estos abarcan sistemas basados en la composición química, mineralógica, propiedades físicas y según su reactividad. Comúnmente, el sistema mayor usado es aquel que considera el origen.

Existen dos amplias categorías de puzolanas considerando su origen: las naturales y las artificiales. A pesar de ello, se hace referencia a un conjunto intermedio de puzolanas naturales que, en su clasificación incluyen aquellas que requieren ser sometidas a tratamientos térmicos de activación para potenciar su reactividad.

- **Puzolanas naturales:** Productos minerales con composiciones sílico-aluminosas, estructuras amorfas, y están compuestas principalmente por rocas volcánicas o formaciones rocosas que incluyen ópalos, entre las que se encuentran la roca de sílice; así mismo, algunos tipos de estas puzolanas son los sedimentos volcánicos, Diatomitas y Zeolitas entre otras (Soffiatti, 2015).
- **Puzolanas artificiales:** Constituido principalmente por subproductos de ciertos procesos industriales que, en consecuencia, de las alteraciones en dichas etapas adquieren propiedades puzolánicas. Entre los residuos obtenidos se incluye las cenizas volantes a partir de la pulverización del combustible, escorias originadas en altos hornos, arcilla cocida y ceniza de bagazo de caña de azúcar entre varias opciones (Gómez, 2009).



- **Puzolanas mixtas:** Consiste en un conjunto integrado por materiales que son ricos en silicatos y poseen una configuración arcillosa. Estos elementos al ser expuestos a tratamientos térmicos posteriores adoptan una mejoría en sus propiedades puzolánicas. Entre sus mayores representantes tenemos al polvo de ladrillo, el cual es un residuo de procesos cerámicos de alfarería (Soffietti, 2015).

Es importante recalcar que, American Society for Testing and Materials, (2019) (ASTM en adelante) C618 se puede clasificar a las puzolanas en tres grandes agrupaciones, colectivo F, N y C. En la **Tabla 1.1** y **Tabla 1.2** se exponen las particularidades físicas y químicas que deben cumplir a cabalidad los respectivos grupos. Asimismo, para la elaboración de morteros y hormigones se estipula el uso de la clase N que corresponde a puzolanas naturales.

**Tabla 1.1**

*Requisitos de composición física para puzolanas naturales*

<b>Requisitos</b>	<b>N</b>	<b>F</b>	<b>C</b>
<b>Fineza:</b>			
Cantidad retenida en el tamizado vía húmeda en la malla de 45 µm (N° 325), % máx.	34	34	34
<b>Índice de actividad resistente: <sup>A</sup></b>			
Con cemento Portland, a 7 días, % mín. del control	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Con cemento Portland, a 28 días, % mín. del control	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>	75 <sup>B</sup>
Demanda de agua, máx., porcentaje del control	115	105	105
<b>Estabilidad: <sup>C</sup></b>			
Expansión o contracción en autoclave, % máx.	0,8	0,8	0,8
<b>Requisitos de uniformidad:</b>			
Densidad, máxima variación del promedio, %	5	5	5
Porcentaje retenido en 45 µm (N° 325), variación máx., puntos de porcentaje del promedio	5	5	5

*Nota.*<sup>A</sup> El índice de actividad resistente con cemento Portland no debe ser considerado una medida de la resistencia a la compresión del concreto que contiene la puzolana natural o ceniza volante. El índice de actividad resistente con cemento Portland es una medida de la reactividad con un cemento dado y puede variar dependiendo del origen de la puzolana natural o ceniza volante y del cemento.

<sup>B</sup> La verificación del índice de actividad resistente a los 7 días o a los 28 días indicará el cumplimiento de la especificación.

<sup>C</sup> Si la puzolana natural o ceniza volante representará más del 20 % en masa del material cementoso en el diseño de mezcla del proyecto, los especímenes de ensayo para la expansión en autoclave deben contener dicho porcentaje. La expansión en autoclave excesiva es significativamente más alta en casos donde las proporciones de agua material cementoso son bajas, por ejemplo, en mezclas para bloques o para concreto proyectado. Obtenido de ASTM (2019)

**Tabla 1.2**

*Requisitos de composición química para puzolanas naturales*

Composición química	N	F	C
Dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) + óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) + óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ), % mín.	70,0	70,0	50,0
Trióxido de azufre ( $SO_3$ ), % máx.	4,0	5,0	5,0
Contenido de humedad, % máx.	3,0	3,0	3,0
Pérdida por calcinación, % máx.	10,0	<b>6,0<sup>A</sup></b>	6,0

*Nota.*<sup>A</sup> Se puede emplear puzolana de Clase F con contenidos de hasta 12 % de pérdida por calcinación si cuenta con registros de performance o resultados de ensayos de laboratorio aceptables. Obtenido de ASTM (2019)

**1.4.5 Usos generales de puzolanas**

La puzolana de origen natural por sus propiedades no sólo se utiliza como adición a la fabricación de cemento, sino también, posee diversas aplicaciones de interés, por ejemplo:

- Drenaje natural en campos de fútbol e instalaciones deportivas por su estructura porosa.
- Materia prima en fabricación de cerámicas por mejorar resistencia a los materiales cerámicos.

- Agente absorbente de metales pesados y sustancias orgánicas en procesos de tratamiento de aguas.
- Agente dosificador de minerales en la agricultura y potenciador de las propiedades del suelo.

#### ***1.4.6 Puzolanas en Ecuador***

El Ecuador, por su ubicación territorial, se encuentra situado en el cinturón de fuego el cual cubre todo el océano pacífico, América del norte, centro, sur y Asia. La región sierra está constituida por una cadena montañosa en donde destacan al menos una decena de volcanes cercanos entre sí, y algunos de ellos activos.

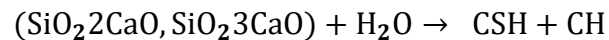
Estas elevaciones volcánicas son los artífices en la producción de residuos como rocas y cenizas volcánicas las cuales solo han provocado consecuencias negativas en la sociedad ecuatoriana. Pese a ello, fue hasta la década de 1970 en donde la industria cementera del país comenzó a emplear técnicamente y de manera normalizada dichos residuos como sustitutos parciales del Clinker o del cemento portland, añadiendo atribuciones que antes no poseían y disminuyendo costos de producción (Orrala & Gómez, 2015, p. 21).

#### ***1.4.7 Reacción puzolánica***

El comportamiento puzolánico se fundamenta en un principio básico, en donde los componentes ácidos de elementos puzolánicos como la  $\text{SiO}_2$  y el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se combinan con el  $\text{CaOH}_2$  y el agua, produciendo así, los CSH. La interacción entre las distintas sustancias es equivalente a las que ocurren en el procesamiento del cemento portland, obteniendo un producto bastante similar.

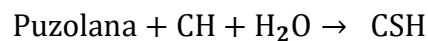
Una vez generada la reacción principal, se originan otras secundarias, entre ellas se forma el aluminato de calcio ( $C_3A$  en adelante). En la **Ecuación 1.1** se observa la simplificación de la hidratación del cemento portland, excluyendo consideraciones como estequiometría y fases aluminosas.

**Ecuación 1.1:** Hidratación cemento portland simplificada



En la ecuación, los silicatos bicálcico y tricálcico ( $\text{SiO}_2\text{2CaO}$  y  $\text{SiO}_2\text{3CaO}$ ) representan los componentes primordiales del cemento portland, por otro lado, los CSH y el hidróxido de calcio de residuo (CH en adelante) constituyen los productos de esta interacción química. Por otro lado, en la **Ecuación 1.2** se expone la reacción puzolánica.

**Ecuación 1.2:** Reacción puzolánica



A diferencia de la hidratación del cemento, en esta reacción no se produce cal, sino que, la consume, produciendo así, CSH como principal resultado. En consecuencia, si se agrega cierta proporción adecuada de puzolana en el cemento portland, la misma reaccionaría con el CH resultado de la hidratación, obteniendo una reducción de procesos no deseados y convirtiéndolas en otros que impulsarían el incremento en la resistencia.

Pese a todo, si el consumo de CH resulta excesivo, se puede derivar a un problema de auto neutralización, es decir, se impulsa un estado de desequilibrio entre las partes de la reacción. En el caso del concreto armado, sufriría efectos adversos, ya que se impulsará la corrosión del acero interno (Soffietti, 2015).

## **1.5 Zeolita**

### ***1.5.1 Acontecimientos históricos***

Mora (2023) afirma que, el origen etimológico se remonta a la cultura griega, en donde *Zéo* y *Líthos* se traduce como de roca efervescente o piedra que hierve. Fue en el año 1756 cuando las Zeolitas fueron reconocidas, y el primer tipo de Zeolita denominada *Stilbita* fue descubierta por el mineralogista sueco Barón Alex Frederick Consted; este descubrimiento fue decisivo dado que, estableció la identidad y presencia de las Zeolitas dentro del mundo mineralógico. En el siglo XIX se intensificaron las investigaciones acerca de este mineral, lo que permitió comprender de manera más adecuada su estructura cristalina y composición química.

Para el siglo XX, a las Zeolitas se les atribuyó aplicaciones dentro del campo industrial y científico, así mismo, se descubrieron formas de sintetizarla en laboratorio para potenciar su uso en una variedad de campos más. En la actualidad la Zeolita por sus características particulares es utilizada en procedimientos sostenibles dentro de sectores como la ingeniería, con el fin de mitigar los efectos producidos por sus diversas ramas, entre ellas, la construcción.

### ***1.5.2 Definición***

Las Zeolitas naturales son rocas volcano-sedimentarias que se conforman a partir de un proceso volcánico que se desarrolla en el transcurso del tiempo, donde la lava derretida entra en contacto con soluciones salinas, tal fusión hidro-termal da lugar a la formación del material tratado. Estructuralmente, son minerales conocidos como aluminosilicatos de metales alcalinos o alcalinos terrosos, donde los principales elementos que lo conforman son el sodio y el potasio.

Dicha composición da lugar a estructuras de naturaleza diversa, con una configuración molecular microporosa, la cual permite el origen de las diferentes familias de este mineral. Aparte de la relación de silicio y aluminio, se consideran relevantes en la formación de las distintas

variedades de Zeolitas otros factores como la temperatura, presión, tiempo de reacción y cationes de intercambio, entre otros. (Valenzuela, 2017).

### **Figura 1.1**

*Muestra de una mina de Zeolita natural*



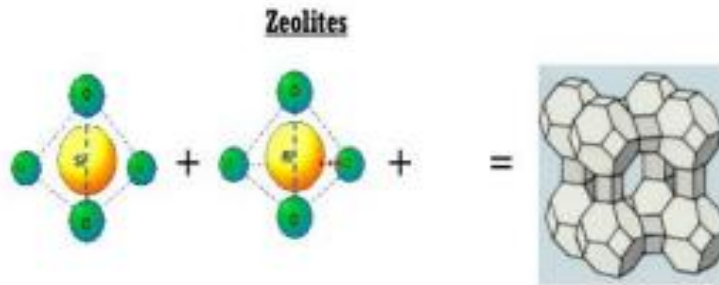
**Fuente:** (Maldonado, 2021)

#### **1.5.3 Estructura de Zeolitas**

De acuerdo con la International Zeolitic Association (IZA en adelante), una Zeolita dentro de su ordenamiento estructural está constituida por tetraedros de silicio y aluminio (Si y Al en adelante) enlazados mediante los iones de oxígeno que se comparten entre los tetraedros adyacentes, conformando puentes de oxígeno no lineales, que dan como resultado unidades estructurales básicas eléctricamente neutras que, cuando se conectan entre sí forman un armazón tridimensional como se observa en la **Figura 1.2**. Por consecuencia, la configuración de las Zeolitas es traducida en cristales que abarcan un sistema estructural abierto con cavidades en forma de canales y jaulas.

## Figura 1.2

*Configuración tetraédrica básica de Zeolita*



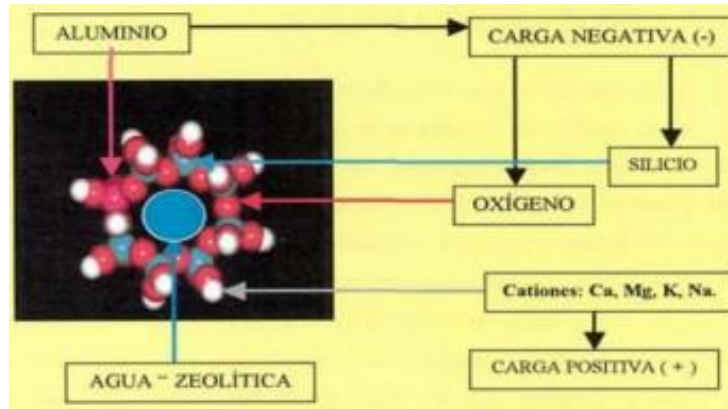
**Fuente:** (Salcedo, 2021)

En la **Figura 1.3** se puede apreciar la configuración elemental de una Zeolita, se observa los 4 átomos de oxígeno rodeando al de Si; el  $\text{Si}^{4+}$ , esta siendo sustituido por el  $\text{Al}^{3+}$ , lo que provoca una falta de cargas positivas o un aumento de las cargas negativas, las cuales son equilibradas por los cationes de intercambio tales como  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ , con el propósito de mantener la estabilidad en la red de la Zeolita. A más de eso, en el interior de la estructura se aprecia el agua zeolítica, en donde esta disposición facilita la desprendición de los cationes intercambiables y su cambio con cationes selectivos presentes en su entorno (Valenzuela, 2017).

El agua constituye entre el 10% y el 20% del peso de la Zeolita y puede extraerse al calentarla hasta aproximadamente  $350^{\circ}\text{C}$ . Los canales vacíos de la Zeolita tienen la capacidad de adsorber cationes o radicales de ocupando posiciones cercanas a los tetraedros estructurales. La configuración de la Zeolita presenta canales y cavidades de dimensiones moleculares variables. Dicho proceso térmico proporciona a las Zeolitas una gran superficie interna en contraste de su superficie externa.

**Figura 1.3.**

*Papel de cationes en la Zeolita*



**Fuente:** (Mora, 2023)

#### **1.5.4 Clasificación**

Las Zeolitas se hallan distribuidas en diversos depósitos sedimentarios y están presentes en diversas regiones del mundo, habitualmente se encuentran en formaciones rocosas que se han constituido en su totalidad o fraccionalmente a partir de la transformación de material volcánico. En efecto, dicho mineral está disponible ampliamente en áreas donde la actividad volcánica ha sido preponderante en épocas pasadas.

Meier W.M. (1968) propuso una clasificación estructural de las Zeolitas en base a estudios cristalográficos. Dicha organización contempla la existencia de 8 unidades secundarias de construcción (SBU en adelante). La tipificación de Zeolitas está categorizada en base a las unidades mencionadas y la relación Si/Al. En la **Tabla 1.3** se muestra de una manera simplificada los ejemplos de Zeolitas más habituales (citado en Fernández, 2021, p. 16).



**Tabla 1.3***Tabla simplificada de clasificación de Meier*

<b>Grupo</b>	<b>Tipo de Zeolita</b>	<b>Forma estructural</b>	<b>Rango de Si/Al</b>
Analcimas	Analcita	Trapezoidal	1.00-3.00
Heulanditas	Clinoptilolita	Cúbica poliédrica	2.92-5.04
Chabasitas	Chabazita	Rombos	1.43-4.18
Natrolitas	Edingtonita	-	1.00-2.00
Chabasitas	Erionita	Manojo de agujas	3.05-3.99
Faujasitas	Faujasita	-	1.00-3.00
Modernitas	Ferrierita	Agujas	3.79-6.14
Heulanditas	Heulandita	Poliédrica	2.85-4.31
Laumontitas	Laumontita	-	1.95-2.25
Modernitas	Modernita	Agujas	4.19-5.79
Natrolitas	Natrolita	-	1.50
Filipsitas	Filipsita	Prismas	1.45-2.87
Analcimas	Wairakita	Trapezoidal	2.00

*Nota.* El Si/Al representa la relación entre silicio y aluminio, además, si esta proporción es de 1, quiere decir que se encuentran en partes iguales los compuestos químicos en mención.

Morante (2004) concluyó que, en Ecuador, los tipos de Zeolitas predominantes en el territorio son Clinoptilolita y Heulandita, las cuales comúnmente coexisten en proporciones variables. En la actualidad, el país posee varias empresas privadas dedicadas a la explotación y comercialización de Zeolita natural tipo Clinoptilolita (citado en Valenzuela, 2017, p. 34). La Zeolita tipo Clinoptilolita se usa para la elaboración y mejora de ciertos cementos puzolánicos que

poseen contenidos importantes de sílice y alúmina, que exhiben valores positivos en relación a la pérdida por calcinación (Fernández, 2021).

### ***1.5.5 Características de las Clinoptilolitas***

Las Clinoptilolitas, pertenecientes a un grupo de Zeolitas naturales se caracterizan por poseer una estructura cristalina la cual resiste a elevadas temperaturas de colapso estructural (1300 °C), que reflejan una solidez particular frente a la deshidratación, así mismo, su alta relación Si/Al le confiere estabilidad en presencia de disoluciones ácidas. Las Zeolitas naturales del tipo Clinoptilolita pueden ser eficaces como reemplazantes parciales del cemento. En cantidades menores de sustitución se pueden obtener propiedades equiparables a las del cemento portland, aportando beneficios económicos y ecológicos (Sedlmajer et al., 2015, p. 525).

### ***1.5.6 Propiedades físicas***

Interpretar las características físicas de las Zeolitas es primordial para valorar su comportamiento. Para comprender las atribuciones físicas de una Zeolita, se debe analizar desde dos puntos de vista diferentes: (a) enfocando sus propiedades naturales; (b) enfocando su rendimiento en aplicaciones específicas.

En la **Tabla 1.4** se expone las cualidades más representativas en base a la perspectiva que se adopte, y sus valores respectivos.

**Tabla 1.4***Cualidades físicas más resaltables*

<b>Características físicas</b>	
<b>En base a propiedades naturales</b>	<b>En base a rendimiento en aplicaciones</b>
Morfología	Brillantez
Estabilidad térmica	Área superficial
Gravedad específica	Tamaño de partícula
Densidad	Dureza
Diámetro de poro	Resistencia al desgaste
Color	

**Fuente:** Elaboración propia**Tabla 1.5***Valores típicos representativos en Zeolitas*

<b>Propiedades físicas de la Zeolita</b>	
Dureza	3-4
Estabilidad térmica	Alta
Color	Blanca o verde
Densidad	2 a 2.3 g/cm
Diámetro del poro	2 a 12 angstroms
Diámetro de cavidades	6 a 12 angstroms

**Fuente:** Adaptado de (Mora, 2023)

### **1.5.7 Propiedades químicas**

Los usos cotidianos de las Zeolitas naturales se fundamentan en una, o más de sus atribuciones químicas, que habitualmente incluyen el intercambio iónico, porosidad, adsorción y deshidratación e hidratación entre otras. Dichas características están determinadas por la configuración cristalina de cada tipo de Zeolita y su composición de cationes.

- **Porosidad:** Las Zeolitas están formadas por cavidades y canales de dimensiones uniformes, su estructura microporosa les permite tener una superficie interna grande en comparación a su superficie externa. Cuando la separación entre dos superficies es lo suficientemente corta, los potenciales de adsorción se combinan, en consecuencia, una molécula ubicada en el interior del poro experimenta una atracción por toda la superficie del mismo, incrementando la fuerza de atracción. Es decir, a medida que disminuye el tamaño del poro más profundo se hace el pozo de potencial (Curi , 2006).
- **Adsorción:** Las Zeolitas exhiben una superficie con átomos que no presentan fuerza cohesiva en comparación con su estructura interna, lo que resulta en una interacción insignificante a distancias grandes. A medida que se aproxima a la superficie, la energía del sistema decrece. La disminución de la distancia entre la superficie y la molécula libre provoca fuerzas de repulsión significativas. Existe una distancia mínima donde la energía del sistema alcanza su mínimo.  
  
La eficacia de adsorción de las Zeolitas se debe a su amplia superficie interna. La reducción del tamaño del poro incrementa notablemente el potencial de adsorción debido al solapamiento de los potenciales de las paredes del poro, resultando en una mejor interacción con las moléculas adsorbidas (García, 2002).
- **Intercambio iónico:** Consiste en la sustitución isomórfica de átomos de Si en la estructura cristalina, en donde, para el caso de la Zeolita, los átomos de Al tetravalentes reemplazan a los de Si, originando de esta manera una carga negativa que se equipara fuera de la estructura mediante cationes (Curi, 2006).

- **Deshidratación e hidratación:** Procedimientos químicos que implican la adición o eliminación de agua, lo que produce modificaciones cuando interactúan directamente con la Zeolita. Estas actividades desencadenan reacciones exotérmicas que provocan e inducen cambios en materiales que están combinados con la Zeolita, produciendo a un aumento o disminución del su peso.

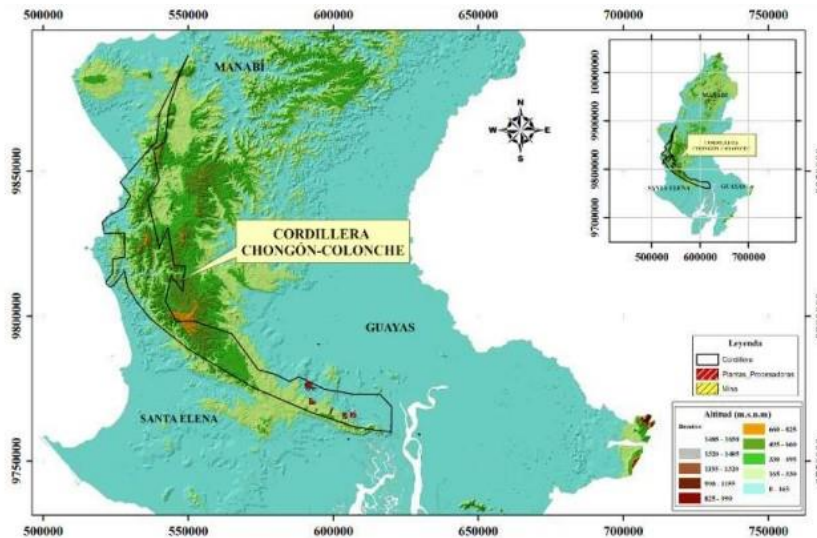
### ***1.5.8 Zeolita natural en Ecuador***

El territorio continental ecuatoriano está segmentado en tres regiones naturales como Costa, Sierra y Oriente. En la **Figura 1.4** se exhiben los depósitos más significativos de Zeolita que se encuentran en la costa, principalmente en la cordillera Chongón-Colonche, ubicada al oeste de Guayaquil, delimitada al norte por la cuenca de Manabí y al sur por la de Progreso respectivamente. Estas minas están integradas por rocas sedimentarias con gran manifestación de Zeolitas de tipo Heulandita y Clinoptilolita.

En la figura se muestra las formaciones más importantes de la cordillera costera como Piñón, Cayo y Guayaquil entre las más importantes. Por otra parte, en la región interandina se encuentra la formación Mangan, la cual se ubica al sur del Ecuador, limitada en el norte por Ingapirca y Cuenca en el sur. Posee sedimentos continentales con capas volcánicas intercaladas, en donde su mineralogía consta de minerales zeolíticos del tipo Modernita y trazas de Clinoptilolita (Morante et al., 2005, p. 2).

**Figura 1.4**

*Localización Zeolita en Ecuador*



**Fuente:** (Mora, 2023)

### **1.5.9 Zeolita en ingeniería**

Los remplazos de Zeolita natural por cemento en hormigón y morteros se los ha realizado en base a porcentajes entre el 10% y 30% analizando sus propiedades químicas, físicas y mecánicas para luego ser comparadas con una mezcla referencial (sin adición de Zeolita natural) y destacar el porcentaje adecuado que presente mejoras en la resistencia a la compresión y propiedades de durabilidad entre otros, ajustándose a los requerimientos de las normativas vigentes en cada país o normativas internacionales.

Dentro de estudios comparativos, con el objetivo de mejorar propiedades y características de hormigones se emplearon cilindros con sustitución de hormigón por Zeolita en diferentes porcentajes y hormigón tradicional, en donde los resultados expusieron que el 10% de sustitución con Zeolita lograba superar de manera positiva los resultados obtenidos por porcentajes de sustitución diferentes (Yanchaguano, 2021).

Por otro lado, la Zeolita en su evaluación de comportamiento como ingrediente fraccionario de sustitución demostró cumplir con las normas vigentes ASTM C270 Y ASTM C780. Teniendo como resultado una mayor resistencia que los morteros típicos con una sustitución del 15% de cemento por Zeolita, específicamente una mejora del 11% en dicha propiedad mecánica. El comportamiento resultante, se lo adquirió por la composición química abundante en óxidos metálicos de Calcio y relación Si/Al de la puzolana (Ventura, 2019).

Raggiotti et al. (2015) en su investigación caracterizó física y químicamente la mezcla con Zeolita para determinar su actividad y aplicación como puzolana en diseño de mezclas con porcentajes de sustitución de cemento entre el 5% y 20%. Donde concluyó que el mejor rendimiento se logró con un reemplazo parcial de cemento en 20% por Zeolita, los resultados obtenidos en prueba de resistencia fueron similares con el hormigón estándar, además, el uso del 20% de sustitución influye en un menor uso de cemento, aportando a la conservación del medio ambiente

De la misma manera, Andrada et al. (2012) manifiesta que, en base a procedimientos realizados en laboratorios, los valores de resistencia dentro de propiedades mecánicas como la compresión obtenidos de los morteros con sustitución parcial del 20% fueron similares a los morteros patrón, además, se evidenció que los morteros con porcentaje de sustitución parcial poseen un mejor tiempo de utilización en estado fresco sin requerir una cantidad mayor de agua que los morteros convencionales y su conductividad térmica se reduce debido a las propiedades de la Zeolita.

#### ***1.5.10 Aplicaciones adicionales***

El empleo de este mineral en nuestro país se da principalmente en el área:

- **Agrícola:** Banano, arroz, caña de azúcar y flores lo utilizan como fertilizante y lo denominan “fertilizante inteligente”, ya que libera lentamente los nutrientes y cuando las plantas lo requieren.
- **Acuícola:** Camarones, se coloca en las piscinas para eliminar amonio del agua, lo cual disminuye la necesidad de recambio o incorporación de agua fresca.
- **Agropecuaria:** Cama y nutrición de pollos y ganado.

Además de estas aplicaciones se promueve su uso en cemento y concreto como aditivo anticorrosivo para cementos, aditivo sellador para prevenir lixiviación de aguas contaminadas y como aditivo aligerante y aislador.

## **1.6 Cemento**

El cemento es un conglomerante formado principalmente por materias primas como caliza y arcilla, en donde por medio de la calcinación de estas calizas arcillosas se pueden generar cementos con propiedades hidráulicas, la cual es la capacidad para combinarse con agua, fraguado y endurecido. Además, presenta la capacidad de juntar agregados para formar un material compacto. La norma NTE INEN 152 (ASTM C150) establece las características y requisitos físicos y químicos que debe cumplir el cemento portland (American Society for Testing and Materials, 2023).

## **1.7 Fabricación del cemento Portland**

El cemento Portland se conoce como una mezcla sometida a una molienda hasta llegar a una finura conveniente del Clinker, además de una pequeña cantidad de yeso, que se agregará para regular su tiempo de fraguado durante el proceso de hidratación al momento de mezclarse con agua. El Clinker es el producto de silicatos y aluminatos de calcio que se obtienen al calcinar, hasta la fusión parcial, mezclas íntimas, preparadas artificialmente y dosificadas a partir de calizas y



arcillas, este material se presenta de forma de aglomerados, como la escoria o piedra caliza. (Acevedo et al., 1985)

Respecto a las materias primas, se tiene la piedra caliza, roca sedimentaria constituida por carbonato de calcio e impurezas arcillosas. Cuando esta cantidad de impurezas llega a cierto límite, se le denomina a esa piedra como “marga”. Para los efectos de la producción del cemento, estas piedras magras se clasifican según su porcentaje de carbonato de calcio, y a su vez producen la descomposición de silicatos y magnesio como impurezas, es por eso, que es difícil encontrar aglomeraciones de margas que presenten la composición adecuada para la fabricación de cemento Portland.

Una vez efectuada la dosificación de las calizas y margas, estas son trituradas y mezcladas. Este nuevo material podrá ser pastoso o pulverizado según el procedimiento y posteriormente se somete a altas temperaturas, transformándose en la escoria conocida como Clinker, por consiguiente, se muele con yeso, u otros aditivos, obteniendo el polvo de color gris del cemento.

Para esta fabricación se emplean tres procedimientos, tales como la fabricación por vía húmeda, vía semiseca, y por vía seca.

## **1.8 Constituyentes del cemento Portland**

Acevedo et al. (1985) esclarece que, el cemento Portland se obtiene de manera general a partir de la reacción y cocción de los óxidos  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ . Por otra parte, se constituyen otros óxidos considerados como accidentales como el de magnesio, sodio y potasio ( $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  en adelante). Una vez que estos óxidos reaccionan se obtiene una serie de silicatos y aluminatos cálcicos, de los cuales en la **Tabla 1.6** se exponen los fundamentales:

**Tabla 1.6***Silicatos y aluminatos fundamentales*

<b>Compuesto</b>	<b>Composición</b>	<b>Símbolo</b>
Silicato tricálcico	$\text{SiO}_2 * 3\text{CaO}$	SC3
Silicato bicálcico	$\text{SiO}_2 * 2\text{CaO}$	SC2
Aluminato tricálcico	$\text{Al}_2\text{O}_3 * 3\text{CaO}$	AC3
Ferrito aluminatotetracálcico	$\text{Fe}_2\text{O}_3 * \text{Al}_2\text{O}_3 * 4\text{CaO}$	FAC4

**Fuente:** Adaptado de Acevedo (1985)

Además, contienen yeso, que sirve como regulador del fraguado. La saturación de elementos como el CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O y K<sub>2</sub>O puede causar efectos dañinos para el cemento, es por eso que presentan límites para la obtención de resultados adecuados como se expone en la **Tabla 1.7**. Las características químicas pueden indicar distintas calidades de cemento.

**Tabla 1.7***Límites comunes en la composición del cemento*

<b>Compuesto</b>	<b>Porcentaje admitido (%)</b>
CaO	45-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-6
MgO	0.1-5.5
Na <sub>2</sub> O y K <sub>2</sub> O	0.5-5.5
SO <sub>3</sub>	1-3

**Fuente:** Adaptado de Acevedo (1985)

Para seleccionar el cemento adecuado para un proyecto en específico, es imprescindible comprender las propiedades otorgadas por los diversos compuestos químicos del cemento. Esto permite elegir el tipo más adecuado según la composición de los cementos disponibles. Entre las características más resaltables de los compuestos principales del cemento portland se consideran:

- **Silicato Tricálcico (SC3):** Presenta una gran velocidad de hidratación, un fuerte calor de hidratación, confiere al cemento resistencias y aunque su estabilidad química es aceptable, debido a que se desprende al hidratarse gran cantidad de  $\text{CaOH}_2$ , que contribuye a determinados tipos de corrosión del hormigón.
- **Silicato Bicálcico (SC2):** Presenta una pequeña velocidad de hidratación, su calor de hidratación es mucho más débil que del SC3, confiere al cemento buenas resistencias mecánicas a plazos largos y tiene una buena estabilidad química.
- **Aluminio tricálcico (AC3):** Su velocidad de hidratación es grande, el calor de hidratación elevado, le confiere al cemento alguna resistencia mecánica dentro de las primeras veinte y cuatro horas y su estabilidad química es escasa frente a las aguas selenitosas y que contienen cloruros.
- **Ferrito Aluminato Tetracálcico (FAC4):** Tiene una gran velocidad de hidratación, el calor de hidratación es bajo, le confiere al cemento propiedades mecánicas nulas, y su estabilidad química frente a aguas selenitosas de mar.

**Tabla 1.8**

*Composición convencional de compuestos químicos de cementos Portland*

<b>Tipo</b>	<b>SC3</b>	<b>SC2</b>	<b>AC3</b>	<b>FAC4</b>	
Uso General	50	24	11	8	%
Moderado calor de hidratación	42	33	5	13	%
Endurecimiento rápido	60	12	9	8	%
Pequeño calor de hidratación	26	50	5	12	%
Resistentes a sulfatos	40	40	4	9	%

**Fuente:** Adaptado de Acevedo (1985)

## **1.9 Propiedades del cemento**

### **1.9.1 Finura de molido**

La finura del cemento es una medida cuantitativa utilizada para evaluar la distribución del tamaño de partículas. Se la obtiene mediante el tamizado del cemento a través de una serie de tamices para determinar el porcentaje de peso retenido en cada tamiz. La finura de molido tiene un gran impacto sobre las propiedades del cemento, ya que, a menor módulo de finura, da como resultado un aumento de las resistencias mecánicas, la velocidad de reacción del agua y el cemento será mayor porque aumenta la superficie donde se realizan estas reacciones, disminuye la posibilidad que quede materia del cemento que no reaccionen entre otros (Acevedo et al., 1985, p.160).

### **1.9.2 Calor de hidratación**

La reacción del cemento con el agua se caracteriza por ser exotérmica, es decir, que al efectuarse provoca un desprendimiento de calor. Este calor desprendido se le conoce como calor

de hidratación. El nivel de este calor de hidratación depende fundamentalmente de su composición química, de tal manera que aumenta con el incremento de AC3 y disminuye con el incremento de FAC<sub>4</sub> y SC<sub>2</sub>. Esta propiedad se relaciona con el módulo de finura, ya que a mayor módulo de finura mayor calor de hidratación (Acevedo et al., 1985, p.163).

### ***1.9.3 Resistencias mecánicas***

La resistencia mecánica es capaz de desarrollar un cemento en su función de aglomerar áridos, una vez que esté fraguado y endurecido, es el parámetro que fundamentalmente se utiliza para determinar la calidad de ese aglomerante. En general se realizan sobre morteros confeccionados con el cemento escogido, arena normal con un 97% de sílice y una granulometría específica (Acevedo et al., 1985, p.165).

### ***1.9.4 Peso específico***

El peso específico generalmente se encuentra entre 3.1 a 3.2  $g/cm^3$ . Esta propiedad es importante para realizar la dosificación de los hormigones, por otra parte, es importante considerar que el peso específico puede variar en base a la constitución y tipo de cemento, por lo que, es preciso verificar las especificaciones del fabricante. (Acevedo et al., 1985, p.168).

### ***1.9.5 Estabilidad de volumen***

Las pastas del cemento pueden sufrir deformación de su volumen durante el proceso de fraguado y endurecimiento, las cuales son retracción o expansión. La retracción consiste en una contracción que experimenta la pasta e influye sobre la contracción total de los morteros y hormigones, esta propiedad puede darse por una pérdida de agua en el amasado o la influencia del cemento. Para el caso de la expansión, las pastas, morteros y hormigones aumentan su volumen debido a la presencia de humedad debido a la hidratación que existe en sus componentes (Acevedo et al., 1985, p.168).

## 1.10 Tipos de cemento

En la norma NTE INEN 2380-2011 (ASTM C 1157) se establecen los criterios que deben satisfacer los cementos hidráulicos empleados tanto en aplicaciones generales como en aplicaciones especiales, sea su procedencia nacional o importada. Igualmente, en esta especificación los cementos se clasifican según requisitos específicos para usos generales, alta resistencia inicial, desarrollo de resistencia lenta, resistencia a sulfatos y calor de hidratación.

Asimismo, no se impone limitaciones en cuanto a la composición del cemento, no obstante, se incluyen requisitos opcionales para propiedades como baja reactividad álcali-sílice con agregados reactivos. A continuación, se brinda las características principales de los diferentes tipos de cemento. La selección del tipo de cemento adecuado dependerá de las condiciones específicas del proyecto y los requisitos de rendimiento.

- **Tipo GU:** Adecuado para una amplia variedad de aplicaciones de construcción estándar que no requieren propiedades especiales. Tiene cualidades físicas y químicas equilibradas para garantizar un rendimiento confiable en diversos entornos y condiciones.
- **Tipo HE:** Diseñado para alcanzar una resistencia inicial más rápida que el cemento tradicional. Muy útil en proyectos donde se requiere un desencofrado rápido para acelerar los tiempos de construcción o para garantizar estabilidad en estructuras mediante una resistencia temprana.
- **Tipo MS:** Formulados para resistir la exposición moderada en ambientes con contenido de sulfatos que pueden deteriorar la integridad del concreto. Adecuados para áreas donde las condiciones del suelo pueden ser nocivas para el concreto.

- **Tipo HS:** Similar al tipo MS, pero presenta una resistencia superior a sulfatos. Posee una formulación con adiciones específicas que brindan una resistencia excepcional a los sulfatos.
- **Tipo MH:** Ideal en obras de gran magnitud, en donde el incremento de temperatura debe ser mínima para evitar dilataciones y presenta un calor de hidratación moderado.
- **Tipo LH:** Similar al tipo MH, pero se presenta un menor calor de hidratación durante el fraguado y aumenta el control sobre el agrietamiento térmico.

### **1.11 Hidratación**

La hidratación hace referencia a un proceso en donde el cemento entra en contacto con el agua para formarse como componente endurecedor. Esta fase es esencial para la formación y resistencia de las estructuras de concreto.

### **1.12 Agregados**

Los agregados son un material granular que se usa para formar concreto o morteros hidráulicos, y puede utilizarse ya sea de manera natural o triturados, dependiendo de las características que se le quiera dar a las mezclas.

#### ***1.12.1 Finos***

Los agregados finos son materiales que cumplen ciertas características respecto a su granulometría, normalmente, engloba las arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula de hasta 10 mm, quiere decir, que sean retenidos en el tamiz 3/8” y N° 200. Son partículas de forma redonda o angulares, con textura suave y rugosa, donde habitualmente produce un mayor impacto en las proporciones de la mezcla. La función que producen estos agregados es la de crear

un esqueleto rígido y estable en donde exista una menor cantidad de vacíos y así poder mejorar las propiedades de la mezcla (Ávila, 2015).

### **1.13 Agua**

El agua es un factor importante para la dosificación tanto de morteros como hormigones, y dependiendo de su cantidad puede producir distintas propiedades en las mezclas, estas sustancias en el agua se clasifican en sustancias que alteran el fraguado del cemento; tales como sales y materias orgánicas; sustancias que afectan la resistencia final del hormigón; sustancias que causan eflorescencia, algunas sales como las que se encuentran en el agua de mar; y sustancias que afectan la durabilidad del hormigón o del acero.

Además, existen ciertas condiciones que el agua debe cumplir para ser utilizada en las mezclas, por ejemplo, el agua potable se considera como clasificada para el hormigón, su temperatura es importante cuando es superior a 30°C, acelerando el endurecimiento del hormigón considerablemente, y cuando es menor de 10°C, llegando a paralizar la reacción del cemento con el agua, el agua de mar puede ser utilizada para la fabricación de hormigones sin acero, y no se debe usar cuando no se permita la aparición de eflorescencia ni tampoco como aglomerante el cemento aluminoso, entre otros (Acevedo et al., 1985, p.221).

### **1.14 Cemento portland puzolánico**

El cemento puzolánico se obtiene agregando puzolana durante la molienda del Clinker o al momento que se mezcla entre los materiales. Acevedo et al., (1985) afirma que las puzolanas a pesar que no poseen capacidad de aglutinación por sí solas, tienen elementos que pueden reaccionar con la cal cuando están molidas y están expuestas a la humedad. Esta propiedad de fijación de la cal es lo que determina su ventaja al mezclarse con el cemento Portland.



Las adiciones de las puzolanas varían desde un 5% a 35%, clasificándose como cemento puzolánico cuando la adición es entre el 20 y 35%, con valores menores se le denomina “Cemento portland con un aditivo puzolánico”. Cuando se combinan con estos aditivos, las ventajas que brindan son una mayor trabajabilidad en los hormigones, disminución de la generación de calor, disminución de la segregación y la permeabilidad de los hormigones, debido a la fijación de la cal se presenta una mayor resistencia química a los ataques de los suelos y aguas agresivas.

Así mismo, dentro de las desventajas, requiere mayor cantidad de agua, presenta mayor retracción de aire y en lo referente a las resistencias mecánicas la mezcla Portland-puzolana muestra una velocidad de endurecimiento menor que la del Portland puro y por consiguiente las resistencias mecánicas a cortos períodos serán menores que aquellos; a medida que pasa el tiempo y bajo el agua o en ambiente de alto grado de humedad relativa, la diferencia disminuye y después desaparece pudiendo llegar a sobrepasar ligeramente a la de cemento Portland (Acevedo et al., 1985, p.172).

#### ***1.14.1 Enfoque con Zeolita***

Costafreda (2011) plantea que, la Zeolita desempeña un papel importante en los cementos, sobre todo en la resistencia, en la generación de calor en la hidratación, y en las reacciones álcalis-sílice, esto permite crear cementos del tipo portland con adiciones que resisten la exposición a sulfatos y agua de mar. Algunas investigaciones demuestran que utilizar la Zeolita en morteros y hormigones muestran un elevado índice de edad puede llegar a superar al valor de resistencia del cemento referencial.

## 1.15 Morteros

### 1.15.1 Usos de morteros

Los morteros son esenciales en la construcción, desempeñando una variedad de funciones clave debido a sus propiedades y características. Aquí se destacan algunos usos comunes de los morteros en la construcción, junto con sus características primordiales:

**Unión de elementos estructurales:** Los morteros se utilizan para unir ladrillos, bloques de hormigón u otros materiales de albañilería, proporcionando cohesión y estabilidad a las estructuras.

**Adhesión de revestimientos:** Se emplean para fijar revestimientos, como baldosas cerámicas o piedra natural, en superficies verticales y horizontales, asegurando una adhesión firme y duradera.

**Nivelación y enlucido:** Los morteros se utilizan para nivelar y enlucir superficies irregulares, proporcionando una base uniforme y lisa para la instalación de acabados de piso, paredes o techos.

**Reparación y restauración:** Son fundamentales para reparar y restaurar estructuras dañadas, rellenando grietas, agujeros o áreas deterioradas para restablecer la integridad estructural y la estética.

**Protección contra la intemperie:** Algunos morteros están formulados para proporcionar protección contra la humedad, la corrosión y otros factores ambientales, contribuyendo a la durabilidad y longevidad de las estructuras.

Las características primordiales de los morteros incluyen:

- **Trabajabilidad:** La capacidad de los morteros para ser manipulados, extendidos y compactados fácilmente durante la aplicación.
- **Adherencia:** La habilidad del mortero para adherirse de manera efectiva a diversos sustratos, garantizando una unión duradera entre los materiales.
- **Resistencia mecánica:** La capacidad del mortero para soportar cargas y tensiones, asegurando la estabilidad y seguridad de las estructuras construidas.
- **Durabilidad:** La resistencia del mortero a los efectos del clima, la abrasión, la corrosión y otros factores ambientales, asegurando su vida útil a largo plazo.
- **Tiempo de fraguado y curado:** La rapidez con la que el mortero endurece y alcanza su resistencia final, así como el tiempo necesario para su curado completo.

**Tabla 1.9**

*Usos recurrentes en base a dosificación*

<b>Dosificación</b>	<b>Usos</b>
<b>Mortero</b>	
1:1	Mortero con alto contenido de cemento, muy resistentes empleados para muros de contención o cimientos
1:2	Para impermeabilizaciones de tanques subterráneos
1:3	Impermeabilizaciones de magnitudes menores. Pisos
1:4	Adhesión para ladrillos en paredes y baldosines

**Fuente:** Adaptado de López de Gutiérrez (2003)

Las mezclas de mortero en relaciones de 1:1 a 1:4 exhiben una resistencia alta y requieren arena limpia para su preparación.

### ***1.15.2 Clasificación de morteros según uso***

- Morteros que soportan cargas a compresión, y poseen alta resistencia, son utilizados en mampostería estructural.
- Morteros de adhesión, permiten que elementos de construcción se mantengan unidos y en la posición esperada.
- Morteros con superficies lisas y consistentes, empleados para revestimientos.
- Morteros empleados para completar y unir las juntas entre elementos de construcción

### ***1.15.3 Características de los morteros en su fase plástica***

- **Manejabilidad:** Hace referencia a que tan sencillo es manipular la mezcla y la consistencia de esta, se encuentra estrechamente relacionada a la proporción arena y cemento.
- **Retención de agua:** Es un factor muy importante, porque, de este depende la rapidez de endurecimiento y la resistencia, por otro lado, si no conserva el agua no permite la hidratación del cemento (Mora, 2023)
- **Velocidad de endurecimiento:** Depende de los elementos que constituyen la mezcla y condiciones ambientales (Gutiérrez De López, 2003).

### ***1.15.4 Características de los morteros en su fase endurecida***

Gutiérrez de Lopez (2003) expone que, las propiedades de morteros en estado endurecido son de suma importancia, puesto que, dependiendo de ello, se los usa en diferentes ámbitos constructivos. Entre las propiedades más resaltables tenemos.

- **Retracción:** aumenta o disminuye dependiendo del contenido de cemento y la textura de los granos de arena, debe ser rugosa para evitar grietas.
- **Durabilidad:** se refiere a que tan fuerte puede ser el mortero ante la presencia de agentes externos como: temperaturas bajas, deterioro por abrasión y agentes corrosivos.
- **Resistencia:** El mortero que presente mayor resistencia será aquel que contenga mayor cantidad de cemento por volumen. (Gutiérrez De López, 2003).

## CAPÍTULO II

### 2 METODOLOGÍA

Para realizar una adecuada evaluación de las propiedades mecánicas del cemento adicionado con Zeolita en morteros con diferentes tamaños de partícula y porcentajes de sustitución es imprescindible:

Inicialmente, se procede con la obtención de la Zeolita mediante una industria que provee minerales dentro del cantón Cuenca, dicho material es el que requerimos para realizar el reemplazo parcial de cemento por Zeolita en los morteros, en donde se mantendrán los demás componentes constantes dentro de la combinación; es decir, los porcentajes de sustitución parcial de cemento por Zeolita serán las variantes en la mezcla. Conociendo los factores que pueden influir en las propiedades de los materiales, dentro de la investigación se optó por procesar los componentes de la misma manera para evitar alteraciones en los resultados.

Posteriormente, se lleva a cabo los respectivos análisis de la Zeolita: composición morfológica, adsorción, humedad. La composición química se la obtendrá de la ficha técnica brindada por el comercial. Además, la elección del tipo de cemento se la hizo mediante una indagación acerca del material cementante más común en los proyectos y construcciones ecuatorianas, con el soporte de recursos virtuales. Cabe recalcar que la información de apoyo será obtenida netamente de bibliotecas virtuales certificadas y repositorios universitarios.

En cuanto a los agregados finos, se utilizará un material brindado por minas ubicadas en el río Paute. La arena proveniente del río Paute es la que mejores resultados brinda en cuanto a las propiedades mecánicas, esto se puede evidenciar debido a que dicho componente posee las condiciones más favorables en los análisis granulométricos y dentro de la geometría de partículas

se presentan formas angulares, que favorecen positivamente en la resistencia a compresión (Álvarez & Cañizares, 2023, p. 11).

Los áridos finos serán procesados bajo análisis granulométricos mediante tamices normados. Por otra parte, con el fin de lograr los objetivos impuestos anteriormente, los tamaños de partícula de Zeolita seleccionados para la investigación serán aquellos pasantes del tamiz 200 y 325. En base a un estudio exhaustivo, se indagó en fuentes confiables que los porcentajes óptimos de reemplazo parcial rondan del 10% al 20%. En nuestra investigación se implementó el uso del 10, 15 y 20%.

Una vez examinados cada uno de los elementos, se da paso al diseño de la dosificación para morteros, la cual vendrá dada por normas INEN, que tienen sus bases en las disposiciones brindadas por la ASTM para que, luego de un proceso de curado se realicen los ensayos respectivos dentro del laboratorio de compresión y porosidad. Las probetas puestas a prueba en el ensayo de compresión se las realizará a los 3, 7 y 28 días. De igual manera, para la prueba de porosidad se respetarán los tiempos establecidos. La evaluación de las propiedades de las muestras se las realizará dentro de las instalaciones de los laboratorios que pertenecen a la Universidad del Azuay, específicamente, a la facultad de Ciencia y Tecnología.

Cuando se realicen las pruebas se implementará los resultados a una base de datos en donde se almacenará la información para posteriormente efectuar un análisis e interpretación de datos y brindar recomendaciones entorno al proyecto realizado.

## CAPÍTULO III

### 3 DESARROLLO

#### 3.1 Consecución de la puzolana Zeolita

La Zeolita fue adquirida de la empresa “Ecuaminerales”, una compañía especializada en el procesamiento y comercialización de materiales derivados de elementos no metálicos para la industria en general. Además de su enfoque en tratamiento y venta, la entidad se caracteriza de las demás por ofrecer soluciones sostenibles y productos de alta calidad.

##### 3.1.1 *Composición morfológica*

Para conocer la composición morfológica de la Zeolita se procedió a realizar un estudio detallado por medio de un análisis microscópico con el fin de conocer su constitución. Este análisis se llevó a cabo con el fin de identificar el elemento predominante en base al color que las partículas presentan.

Específicamente se seleccionaron las partículas de mayor tamaño, ya que ofrecen información más significativa sobre la composición general de la muestra. Este enfoque técnico proporcionó información relevante sobre la naturaleza de la muestra respecto a sus propiedades.

##### 3.1.2 *Densidad*

La densidad es una propiedad que relaciona la masa y el volumen, esto nos permite conocer la compacidad y concentración de la muestra. Esta propiedad en las Zeolitas puede depender de su composición química, su estructura cristalina o su preparación y tratamiento. Por lo general, suele encontrarse entre valores de 1.9 a 2.4 gramos por centímetro cúbico. Para su cálculo, se tomó una muestra con tamaños de partícula considerables y se siguió el siguiente proceso:



- 1) La muestra debe estar seca, además, la balanza fue encerada con el peso del papel permitiéndose conocer solo el peso del material, mismo que es 1.52 gramos.

**Figura 3.1**

*Pesaje de la Zeolita para ensayo absorción*

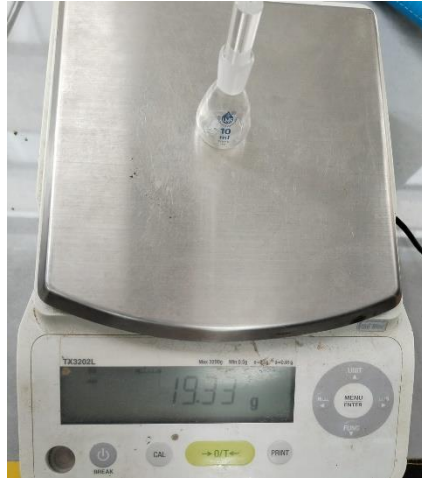


**Fuente:** Elaboración propia

- 2) Se realiza el pesaje del picnómetro, su peso vacío es de 19.33 gramos. Y su peso con agua es de 29.68 gramos.

### Figura 3.2

*Peso vacío del picnómetro*



**Fuente:** Elaboración propia

### Figura 3.3

*Peso de picnómetro con agua*

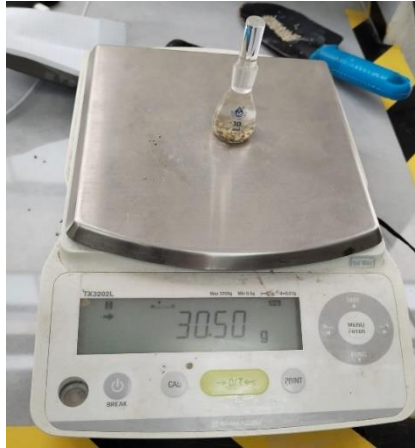


**Fuente:** Elaboración propia

- 3) Se pesa el picnómetro con agua incluido la muestra de Zeolita en ella. El peso fue de 30.50 gramos.

### Figura 3.4

*Peso del picnómetro con agua más Zeolita*



**Fuente:** Elaboración propia

- 4) Una vez obtenidos los valores pertinentes, se reemplazan en la fórmula para obtener los valores que requerimos.

**Ecuación 3.1:** Ecuación de densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

**Ecuación 3.2:** Ecuación de volumen

$$v = \frac{m1 + m2 - m3}{\rho \text{ agua}}$$

Donde:

m1: masa muestra de Zeolita

m2: masa de picnómetro con agua

m3: masa de picnómetro con agua y Zeolita

### 3.1.3 Adsorción

La adsorción de la Zeolita hace referencia a los componentes químicos que se adhieren a los poros por medio de fuerzas intermoleculares, esto debido a su estructura cristalina

tridimensional. Para poder conocer la cantidad de adsorción de la Zeolita, se tomó una muestra de distintos tamaños de partícula.

- 1) Se toma el peso del molde vacío, en este caso es de 131.04 gramos

### **Figura 3.5**

*Pesaje del molde vacío*



**Fuente:** Elaboración propia

- 2) Se toma el peso del molde con la muestra de la Zeolita, siendo de 260.97 gramos.

### **Figura 3.6**

*Pesaje del molde más la muestra de Zeolita*



**Fuente:** Elaboración propia.

- 3) Se toma el peso del molde de la muestra con agua dando un peso de 534.72 gramos.

### Figura 3.7

*Pesaje del molde con Zeolita incluyendo agua.*



**Fuente:** Elaboración propia

- 4) Se ingresa el molde a un horno por 12 horas a 100°C y pesarse nuevamente a muestra

### Figura 3.8

*Muestra de Zeolita y agua pasadas las 12 horas en el horno a 100°C*



**Fuente:** Elaboración propia

- 5) Con los datos obtenidos se procede al cálculo del porcentaje de adsorción.

### 3.1.4 Composición química

La composición química usual de la Zeolita como aditivo mineral en base a la norma ASTM C618 viene dada en la tabla:

**Tabla 3.1**

*Composición química convencional de Zeolita*

Composición química	N
Dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) + óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) + óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ )	78,11
Trióxido de azufre ( $SO_3$ )	0,005
Contenido de humedad	14,57
Pérdida por calcinación,	1,47

Fuente: (Seraj, 2014)

### 3.1.5 Clasificación de partículas

Para categorizar el tamaño de partículas deseado, se emplea los tamices 200 y 325 en el agitador mecánico (apertura de malla de 0.074mm y 0.045mm).

### Figura 3.9

*Categorización de la Zeolita por tamaño de partícula*



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2 Cemento

El cemento hidráulico Atenas del tipo GU es adecuado para cualquier proyecto de construcción; se distingue por su calidad, resistencia y compromiso con la sostenibilidad en su obtención. Cumple y supera los requisitos establecidos por la normativa NTE INEN 2380. El cemento fue obtenido en una sucursal autorizada para la venta de materiales de construcción EL HIERRO.

### Figura 3.10

#### Cemento hidráulico Atenas



**Fuente:** (Cemento Atenas, 2024).

La normativa NTE INEN 2380 no establece restricciones particulares en la composición química; sin embargo, se realiza un análisis de los constituyentes individuales conforme a lo estipulado en la norma NTE INEN 160.

### Tabla 3.2

#### Composición cemento Atenas tipo GU

Óxido	Método	Unidad	Resultado
SiO <sub>2</sub>			22.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			5.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			2.21
CaO	NTE	%	48.11
MgO	160		1
SO <sub>3</sub>			2.99
Pérdida por calcinación			7.64

**Nota:** Obtenido de (Cemento Atenas, 2023).



**Tabla 3.3***Requisitos físicos del cemento Atenas*

<b>Parámetro</b>	<b>Método</b>	<b>Unidad</b>	<b>INEN 2380</b>	<b>Resultado %</b>
Finura	NTE 196	cm <sup>2</sup> /g	A	4364.4
Retenido, máx	NTE 957	%	A	3.9
Cambio de longitud autoclave, máx	NTE 200	%	0.9	-0.05
Fraguado inicial, min	NTE 158	minutos	45	251
Fraguado final, máx	NTE 195	%	420	303
Contenido de aire en mortero, máx	NTE 2529	%	A	7.5
Expansión en barra de mortero, máx	NTE 156	g/cm <sup>2</sup>	0.02	0.011
Densidad			A	2.9

**Nota:** Obtenido de (Cemento Atenas, 2023).

### **3.3 Árido fino**

Se utiliza un árido fino triturado con un peso específico seco de 1580 kg/m<sup>3</sup> y un peso específico saturado de 2100 kg/m<sup>3</sup> con porcentaje de humedad es del 2.6% y porcentaje de absorción de 0.5%.

#### **3.3.1 Análisis Granulométrico árido fino**

Con el propósito de determinar la distribución de tamaños de partículas se realizó un análisis granulométrico, el cual proporciona información importante sobre la composición y las características físicas del material a examinar. Para realizar el ensayo granulométrico del árido fino se obtuvo una muestra del agregado pétreo para posteriormente llevar a cabo un proceso de tamizado con la integración de una serie de tamices normalizados, clasificados en forma descendente. Dicho proceso nos facilitó obtener la variación de partículas según su tamaño.

Dentro de los resultados obtenidos que abarcan variables como los porcentajes retenidos en los tamices y los tamaños de malla, fueron utilizados con el fin de representar una comparación de partículas retenidas mediante un gráfico analítico. En dicho esquema, los porcentajes retenidos serán ilustrados en el eje de las abscisas “x”, mientras que, el tamaño de malla en el eje de las ordenadas “y”. Todo el procedimiento se lo llevó a cabo mediante el seguimiento de las normas INEN 696 e INEN 872 (ASTM C136 y ASTM C33 en adelante)(American Society for Testing and Materials, 2019)

### **Procedimiento:**

- 1) Para realizar un adecuado análisis granulométrico, es esencial realizar un proceso de secado de la muestra con ayuda de hornos, en donde la temperatura deberá ser  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante un período de 24 horas.

### **Figura 3.11**

*Proceso secado de árido fino*



**Fuente:** Elaboración propia

- 2) Se pesa una muestra del agregado pétreo de 1000 gr como peso inicial del árido antes de los procesos siguientes.

### Figura 3.12

*Pesaje inicial de la muestra*



**Fuente:** Elaboración propia

- 3) La muestra se coloca en los tamices que fueron organizados en orden descendente según establece la norma para los procesos siguientes

### Figura 3.13

*Clasificación de los tamices*



**Fuente:** Elaboración propia

- 4) Se dispone la serie de mallas en el agitador de tamices mecánico con un tiempo de 5 minutos

**Figura 3.14**

*Colocación de tamices en el agitador mecánico*



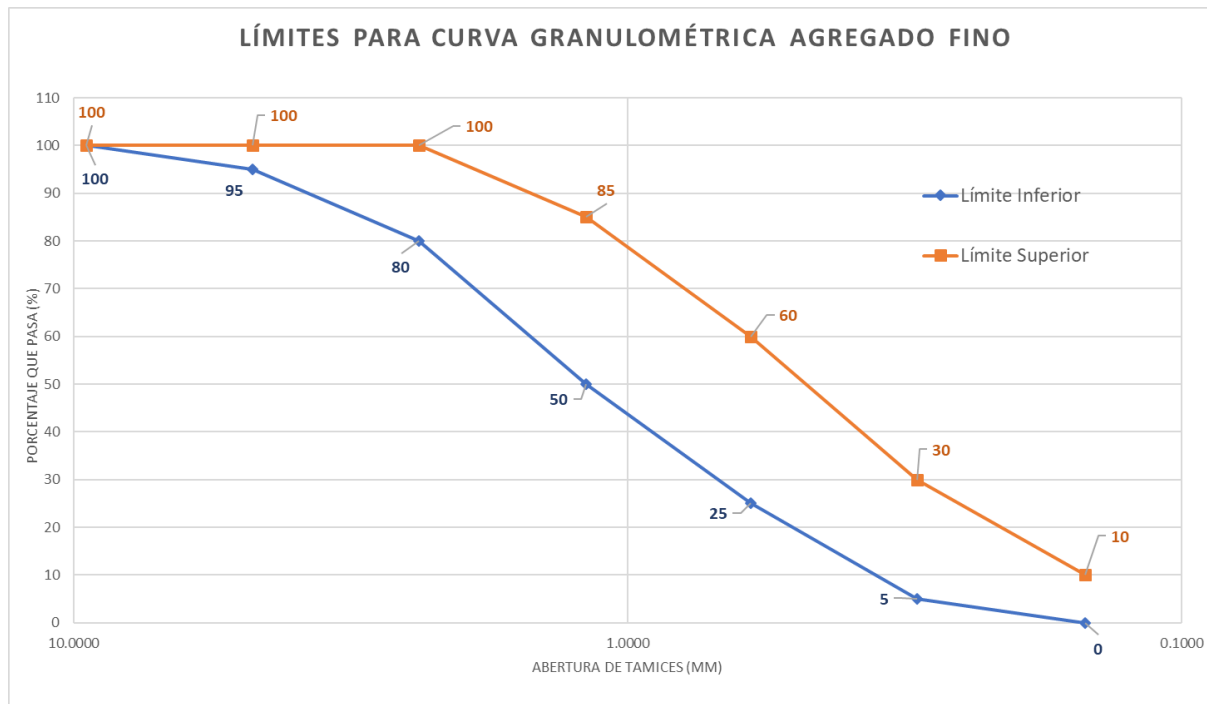
**Fuente:** Elaboración propia

**3.3.2 Curva granulométrica árido fino**

*En la Figura 3.15 se expone los límites para la distribución de tamaños de partícula de la arena que se empleará posteriormente en la elaboración de las mezclas de mortero.*

**Figura 3.15**

*Límites curva granulométrica norma INEN 872 (ASTM C33)*



**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4 Morteros

Se empleó los criterios establecidos en la norma INEN 488 (basada en la ASTM C109) para la consecución de los morteros, la misma expone una relación de cemento y arena en partes de 1:2.75. Dependiendo del tipo de cemento que se utilice, se presentan proporciones específicas de agua-cemento (American Society for Testing and Materials, 2020).

#### 3.4.1 Dosificación de los morteros patrones

La dosificación empleada para los morteros patrones en base a la normativa ya mencionada se puede apreciar en la **Tabla 3.4**.

En base a revisión bibliográfica se seleccionó una relación agua-cemento de 0.5, la cual es una relación cercana a la usada en obra, con el objetivo de lograr un equilibrio adecuado entre la resistencia y trabajabilidad.

**Tabla 3.4**

*Dosificación morteros patrones*

<b>Dosificación de morteros Patrones</b>	
Número de especímenes	6
Relación agua/ cemento	0.5
Cemento (gramos)	500
Arena (gramos)	1375
Agua (ml)	250

**Nota:** Elaboración propia.

### 3.4.2 *Dosificación de los morteros de cemento-Zeolita*

La dosificación para los morteros con inclusión de Zeolita se realiza de la misma manera que con los morteros patrones, en donde sólo varía los distintos porcentajes de adición parcial de Zeolita por cemento.

**Tabla 3.5**

*Dosificación en base a los porcentajes de sustitución*

	<b>Porcentajes de sustitución</b>		
	10%	15%	20%
Número de especímenes	6	6	6
Cemento (gramos)	450	425	400
Zeolita (gramos)	50	75	100
Arena (gramos)	1375	1375	1375
Agua (ml)	250	250	250

**Nota:** Elaboración propia

### 3.5 Elaboración de los morteros

Dentro del proceso de elaboración de morteros se siguió el mismo procedimiento para todos los especímenes, variando únicamente los porcentajes de sustitución del cemento por Zeolita. Como ejemplificación, se describe el proceso para morteros con porcentaje de sustitución.

- 1) Se pesan las cantidades adecuadas de los componentes para la dosificación según la norma ya mencionada para cubos con arista de 50 milímetros.

#### Figura 3.16

*Pesaje del árido fino: 1375 gramos*



**Fuente:** Elaboración Propia

### **Figura 3.17**

*Pesaje de la Zeolita: 50 gramos*



**Fuente:** Elaboración propia

### **Figura 3.18**

*Pesaje del cemento hidráulico: 450gr*



**Fuente:** Elaboración propia

- 2) Los componentes se combinan de manera homogénea para posteriormente mezclarlos con agua, en la **Figura 3.19** se observa el proceso de conjunción de los ingredientes mediante el uso de espátulas de metal.



### **Figura 3.19**

*Proceso de mezcla de los ingredientes*



**Fuente:** Elaboración propia

- 3) Posteriormente, se llevó a cabo la colocación de la mezcla en los moldes cúbicos. Durante este proceso se debe seguir los requisitos de compactación estipulados anteriormente.

### **Figura 3.20**

*Proceso de colocación y compactado de los morteros*



**Fuente:** Elaboración Propia.

- 4) Para que los morteros puedan fraguar apropiadamente es necesario dejarlos 24 horas en los moldes, para posteriormente realizar el desencofrado respectivo. A continuación, se muestran algunos especímenes desencofrados.

### **Figura 3.21**

#### *Desencofrado de Morteros*



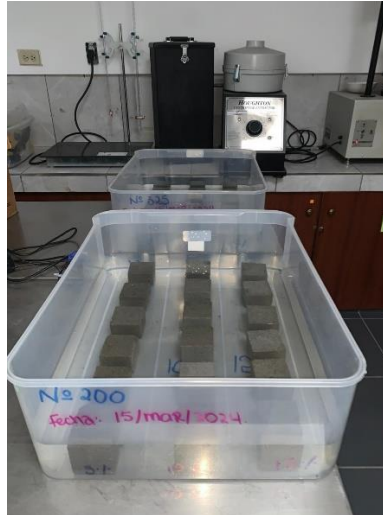
**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.6 Curado de morteros**

Una vez que se desmoldan las muestras, estas deberán ingresar a un proceso de curado mediante la sumersión en agua respetando los tiempos establecidos de 3, 7 y 28 días. El procedimiento se refleja en la Norma española, bajo el título “Durabilidad del hormigón, métodos de ensayo, determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido, método Fagerlund”.

### **Figura 3.22**

*Proceso de curado para morteros*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Se completa la consolidación del mortero en los moldes por un apisonado manual o por un método alternativo calificado. Los métodos alternativos incluyen la utilización de mesa vibradora o dispositivos mecánicos, pero no se limitan a ellos.

#### **Apisonado manual:**

El proceso de moldeado de los especímenes debe iniciarse dentro de un lapso de tiempo no superior a 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla inicial del mortero. Se aplica una capa de aproximadamente 25 mm (1 pulgada), que equivale aproximadamente a la mitad de la profundidad del molde, en todos los compartimentos del cubo. Luego, se compacta el mortero en cada compartimento cúbico mediante 32 golpes distribuidos en aproximadamente 10 segundos, realizando cuatro rondas de apisonado, con cada ronda ejecutada en ángulos rectos respecto a las otras y compuesta por ocho golpes adyacentes sobre la superficie del espécimen (American Society for Testing and Materials, 2020).

La presión aplicada durante el apisonado debe ser suficiente para garantizar el llenado uniforme de los moldes. Las cuatro rondas de apisonado (32 golpes) deben completarse en un cubo antes de proceder al siguiente. Una vez finalizado el apisonado de la primera capa en todos los compartimentos cúbicos, se llenan los compartimentos con el mortero restante y se apisonan siguiendo las mismas especificaciones que para la primera capa.

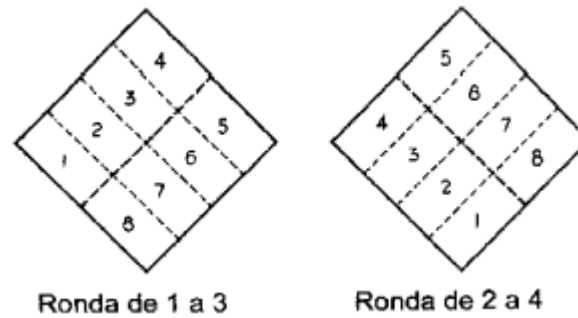
Durante el apisonado de la segunda capa, se introduce el mortero que sobresale sobre la parte superior de los moldes después de cada ronda de apisonado, utilizando guantes y el apisonador para forzarlo hacia dentro. Al completar el apisonado, la parte superior de todos los cubos debe sobresalir ligeramente por encima de las partes superiores de los moldes. Se procede a nivelar el mortero que sobresale mediante el uso de una llana con hoja de acero, pasando una vez a lo largo de la longitud del molde con el borde levemente levantado.

Posteriormente, se emplea la paleta con hoja de acero para lograr un espesor más uniforme del mortero que sobresale por encima de la parte superior del molde, pasando una vez a lo largo de la longitud del molde con el borde levemente levantado.

Finalmente, se corta el mortero para obtener una superficie plana al nivel de la parte superior del molde, utilizando el canto recto de la espátula con un movimiento de aserrado a lo largo de la longitud del molde y manteniéndola casi perpendicular al mismo.

**Tabla 3.6**

*Apisonamientos de los morteros por capas en base a la norma de porosidad*



**Fuente:** Elaboración Propia.

### **3.7 Ensayo de compresión simple**

El ensayo de compresión nos indica cual será la resistencia máxima que van a presentar los morteros, y así poder realizar una comparación respecto a los morteros de cemento, se realizaron 3 especímenes por porcentaje y tamiz, para corroborar resultados, y que sus variaciones en los mismos no sean significativas. Para ensayar los especímenes, se debe sacar del almacenaje húmedo, y dependiendo de las edades que tengan, se tiene una tolerancia admisible para su rotura, respecto al tiempo, como se especifica en la siguiente tabla:

**Tabla 3.7**

*Tolerancia admisible según la edad del ensayo*

<b>Edad de ensayo</b>	<b>Tolerancia admisible</b>
24 h	1/2 h
3 días	1 h
7 días	3 h
28 días	12 h

**Fuente:** Adaptado de American Society for Testing and Materials (2020)

Antes de realizar los ensayos se deben seguir algunos pasos previos, para que los mismos sean más precisos.

- 1) Los especímenes deben estar cubiertos con un paño hasta el momento del ensayo. Deben secarse hasta alcanzar una superficie seca, y remover cualquier grano de la superficie que vaya a estar en contacto con los bloques de apoyo de la máquina de ensayo, asegurando la planicidad de las caras.

**Figura 3.23**

*Especímenes sin grumos*



**Fuente:** Elaboración Propia.

- 2) Se colocan los cubos en la máquina de compresión bajo el centro de apoyo entre los bloques superior e inferior a una velocidad relativa entre las platinas, normalmente ese rango va de 900 a 1800N/s. Esta velocidad es constante durante la primera mitad de la aplicación de la carga máxima anticipada, sin hacer ningún tipo de ajuste a la velocidad de movimiento, especialmente mientras el cubo está fluyendo antes de la falla.

### **Figura 3.24**

*Cubos en la máquina de compresión*



**Fuente:** Elaboración Propia.

### **3.8 Ensayo de porosidad**

El objetivo de este ensayo es descubrir un método para determinar la absorción del agua por capilaridad, dependiendo de la red de poros que presentan.

- 1) El procedimiento para determinar el nivel de absorción de los especímenes comienza llenando el recipiente de agua a una altura de 5mm con una variación permisible de 1

mm en la cara de la probeta, esta altura se mantendrá constante a lo largo del ensayo, añadiendo agua en caso de ser necesario.

- 2) Una vez colocados los especímenes se pone en marcha el cronómetro y se pesa el espécimen en intervalos de 5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h, etc. Se recomienda que el intervalo no sobrepase las 72 horas.

### 3.9 Ensayo de fluidez en el hormigón

El objetivo del ensayo de fluidez en el hormigón es determinar la capacidad del hormigón fresco para fluir y rellenar espacios de manera uniforme, sin separación ni resistencia al movimiento, permitiendo conocer la trabajabilidad de la mezcla. El fin de este proyecto de investigación es conocer cuáles son los resultados de las propiedades mecánicas con la adición de puzolana, en este caso, de la Zeolita, es por eso que, en base a resultados obtenidos en mezclas de morteros, se optó por utilizar Zeolita pasante 325 al 15%. Para esta mezcla, se tomó una relación 40-60% de árido fino y árido grueso, dando como cantidades.

**Tabla 3.8**

*Dosificación de la mezcla de hormigón*

15% Tamiz 325	
Árido grueso (kilogramos/m <sup>3</sup> )	1115
Árido fino (kilogramos/m <sup>3</sup> )	743
Zeolita (kilogramos)	58.5
Cemento (gramos)	331.5
Agua (Its)	179

**Fuente:** Elaboración Propia.

- 1) Una vez calculada la dosificación, se realiza la mezcla entre los áridos, hasta que sea una mezcla homogénea, la misma debe estar en estado fresco.



- 2) La mezcla se coloca en el cono de Abrams sobre la placa base, debiendo estar nivelado y estable. Se debe colocar sobre las pisaderas para evitar movimiento del molde durante el llenado.
- 3) Se llena el molde en tres capas de igual volumen, y se apisona con 25 golpes de varilla, deben estar distribuidos uniformemente. La capa inferior se llena hasta 7 centímetros de altura. Para la segunda capa, se llena el cono hasta  $\frac{2}{3}$  de su volumen, alrededor de 15 centímetros, y nuevamente, se compacta con 25 golpes, quedando de manera bien distribuida.

**Figura 3.25**

*Compactación por capas*



**Fuente:** Elaboración Propia.

- 4) Cuando se coloca la mezcla y su respectiva compactación, se enrasa la superficie haciendo rotar la varilla por la parte superior del cono, limpiando el hormigón adicional derramado alrededor del molde.

**Figura 3.26**

*Enrasamiento la superficie*



**Fuente:** Elaboración Propia.

- 5) Se levanta el molde con las manos y dejando las pisaderas libres, debe hacerse en un lapso de 5 a 10 segundos.

**Figura 3.27**

*Levantamiento del molde*



**Fuente:** Elaboración Propia.

- 6) Se coloca el pistón horizontalmente sobre el cono y se mide la distancia entre la barra y el centro original de la cara superior del hormigón, esa distancia es conocida como asentamiento.

**Figura 3.28**

*Distancia entre barra y el centro original del hormigón*



**Fuente:** Elaboración Propia.

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

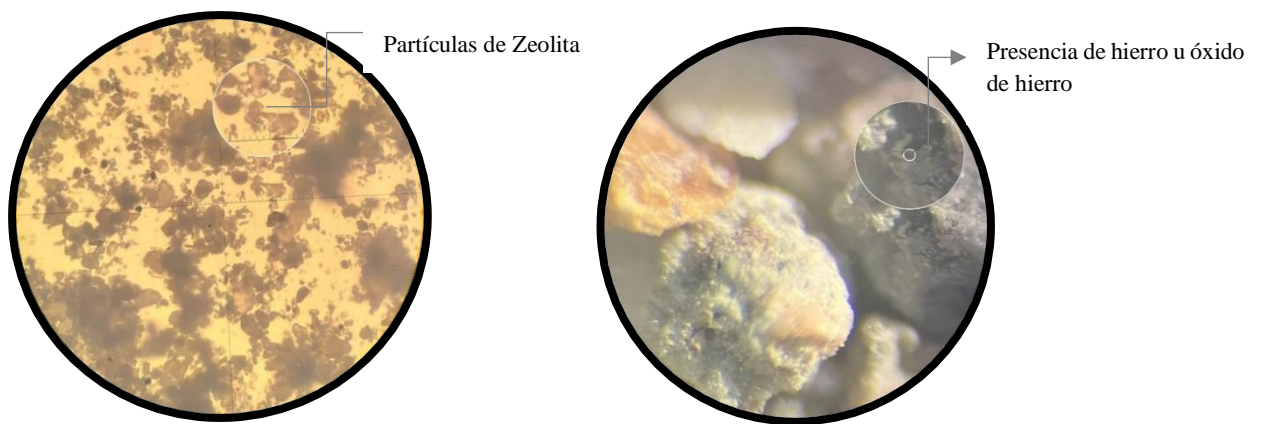
#### 4.1 Zeolita

##### 4.1.1 Composición morfológica

La estructura de la Zeolita es comúnmente cristalina y tridimensional, la forma de sus cristales puede variar según el tipo específico de esta puzolana. Al examinar una muestra bajo el microscopio, como se ilustra en la figura a continuación, se pueden observar una tendencia hacia formas planas y hexagonales, tales como agujas o cristales tabulares.

#### Figura 4.1

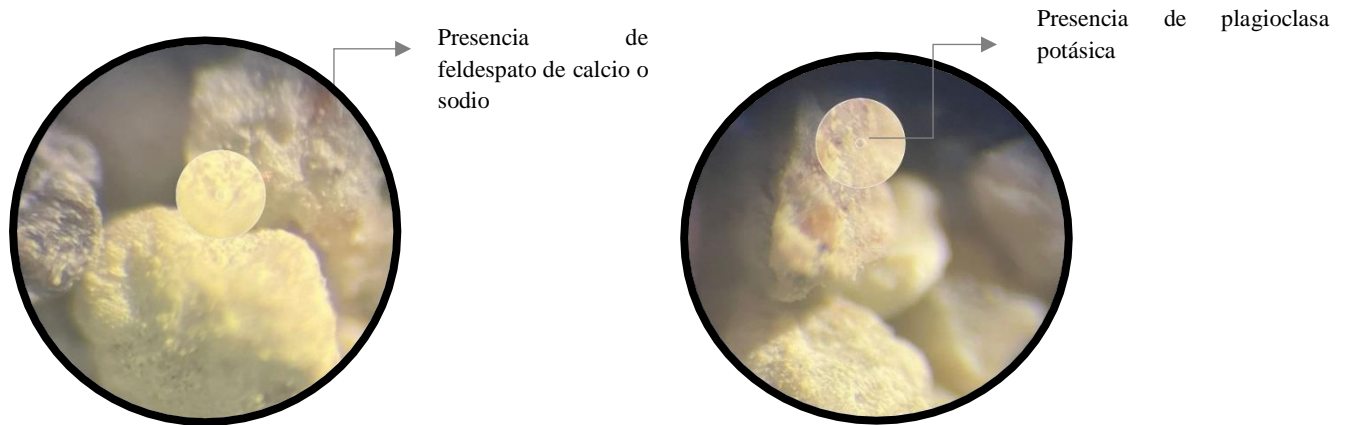
##### *Análisis partículas de Zeolita*



**Fuente:** Elaboración propia.

## Figura 4.2

### Observación de componentes en la Zeolita



**Fuente:** Elaboración propia.

Estas características son esenciales para asignar a la Zeolita de sus propiedades únicas de absorción e intercambio iónico. Además, las características específicas pueden ser atribuidas a los componentes químicos presentes en la Zeolita, los cuales pueden ser observados en función del color de las partículas.

Cuando el color es más claro, en este caso, presencia de feldespato de calcio o sodio, es un indicador de menor presencia de impurezas y mejor capacidad de intercambio iónico. Por otro lado, cuando el color es particularmente oscuro, puede ser mejor utilizada en aplicaciones de filtración donde se requiere mayor adsorción de contaminantes.

#### 4.1.2 Densidad

- 1) Se reemplaza los valores de masas estipulados en el capítulo anterior para hallar el volumen y posteriormente la densidad de la Zeolita.

$$v = \frac{1.52 + 29.68 - 30.50}{1}$$

2) Cuando ya se tienen los valores del volumen y la masa, se calcula la densidad:

$$\rho = \frac{1,92}{1,92 + 29.68 - 30.50} = 2.1714 \frac{g}{cm^3}$$

La densidad de la muestra de Zeolita de Ecuaminerales presenta un valor de  $2.1714 \frac{g}{cm^3}$ , misma que se encuentra en el rango que comúnmente presenta la Zeolita.

### 4.1.3 Adsorción

Resumen de datos obtenidos:

- Peso de la Zeolita pasadas las 12 horas: 386 gramos
- Peso del agua: 273.75 mililitros
- Peso de la muestra de Zeolita: 260.97 gramos
- Peso de la muestra con agua: 534.72 gramos

Cálculo del porcentaje de adsorción de la Zeolita:

Peso de la muestra con agua – Peso muestra seca 12hr = Peso seco

$$534.72 - 386 = 148.72 \text{ gramos}$$

Peso del agua – 148.72 gramos = Peso absorbido

$$273.75 - 148.72 = 125.03 \text{ gramos}$$

$$\frac{(125.03 * 100)}{273.75} = 45.34 \%$$

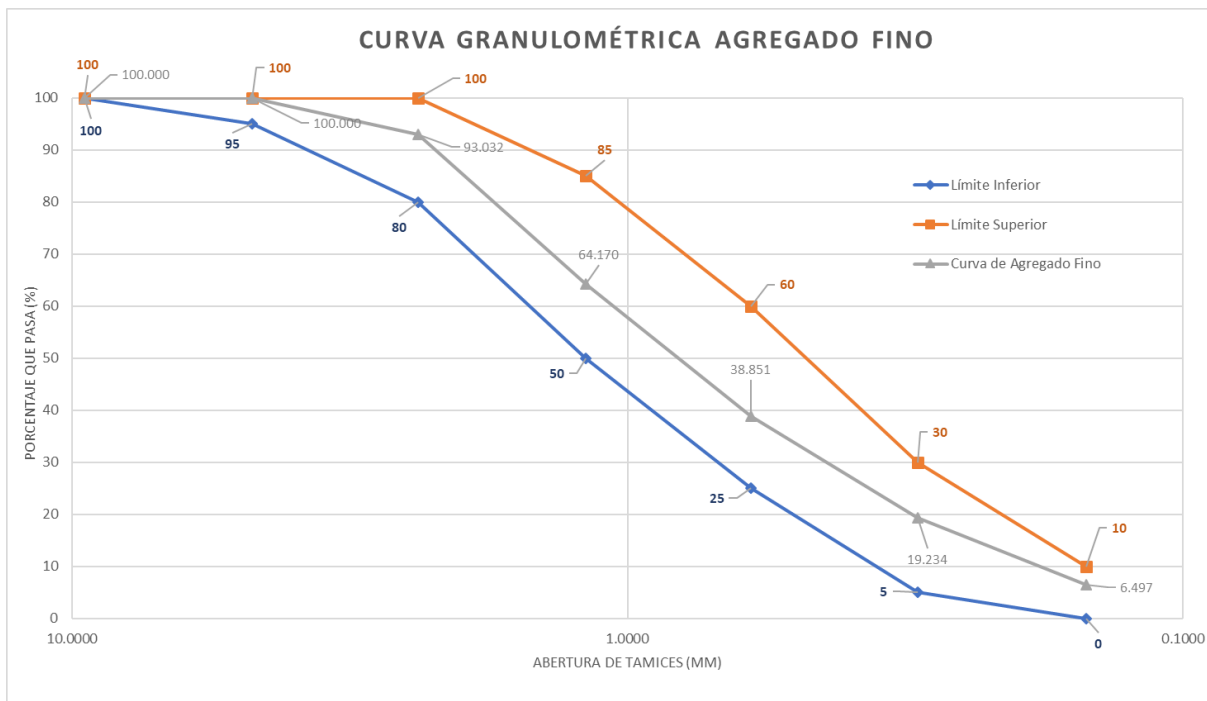
El porcentaje que absorbe la Zeolita respecto al peso inicial de la muestra es de 45.34%.

## 4.2 Análisis granulométrico

En la siguiente figura se exponen la curva granulométrica del árido fino y los límites tanto superior como inferior establecidos por la norma INEN 872 (ASTM C33) que deben acatar las curvas para garantizar la consistencia y calidad de los agregados.

**Figura 4.3**

*Granulometría árido fino en base a norma INEN 872 (ASTM C33)*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Al realizar una comparación de los resultados del análisis granulométrico se cumple con los valores establecidos por la norma INEN 872-2011 al realizar el análisis granulométrico del árido fino, es necesario que ningún tamiz retenga más del 45% del material.

**Tabla 4.1***Análisis Granulométrico del árido fino*

<b>N° Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso malla + muestra (g)</b>	<b>Peso Retenido (g)</b>	<b>Porcentaje Retenido (%)</b>	<b>Porcentaje Retenido Acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje que Pasa (%)</b>
3/8"	9.5000	247.07	0.00	0.00	0.00	100.000
N° 4	4.7500	247.07	0.00	0.00	0.00	100.000
N° 8	2.3800	295.11	48.04	6.97	6.97	93.032
N° 16	1.1900	446.05	198.98	28.86	35.83	64.170
N° 30	0.6000	421.62	174.55	25.32	61.15	38.851
N° 50	0.3000	382.32	135.25	19.62	80.77	19.234
N° 100	0.1490	334.88	87.81	12.74	93.50	6.497
N° 200	0.0475	289.69	42.62	6.18	99.69	0.315
FONDO	0.00	249.24	2.17	0.31	100.00	0.0
		<b>TOTAL</b>	<b>689.42</b>	<b>100.00</b>		

**Fuente:** Elaboración propia

De acuerdo con las afirmaciones de Gutiérrez (2003), un incremento en la fracción de material que atraviesa el tamiz 200 puede tener efectos adversos en el hormigón, ya que obstaculiza la adherencia entre la mezcla de cemento/agua y los agregados, además de aumentar la necesidad de agua. Se realizó un análisis granulométrico con una muestra Inicial de 700gr y se describe los resultados del contenido de material en cada tamiz como se encuentran presentados en la **Tabla 4.1**.

### **4.3 Resistencia a la Compresión**

Para cada período de rotura (3, 7 y 28 días) se realizaron tres especímenes en las mismas condiciones, siendo la única variante el porcentaje de sustitución. Cada probeta se colocó en la prensa para conocer su resistencia a la compresión y se obtuvo una resistencia promedio para cada tipo de dosificación. La nomenclatura asignada para los grupos pasantes del tamiz N°200 será T200 y para los pasantes del tamiz N° 325, T325 respectivamente en adelante.



En la **Tabla 4.2** se muestran los valores de resistencia a la compresión de todos los morteros realizados con T200 Y T325 con sus respectivos reemplazos y mezcla convencional. Para todas las edades analizadas, la resistencia a la compresión, desarrollada por el mortero realizado con T325 en un 15% de sustitución a los 28 días es superior.

**Tabla 4.2**

*Resistencias a compresión de las distintas mezclas*

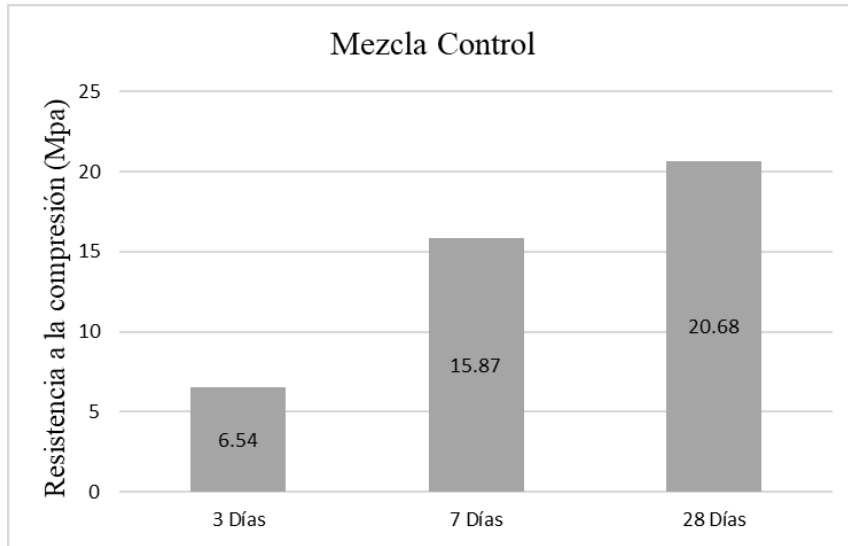
Edad (Días)	Ensayo	Unidad	Mezcla Control	T200			T325		
				10%	15%	20%	10%	15%	20%
3	Compresión	Mpa	6.54	8.11	9.79	7.03	9.56	9.94	7.63
7	Compresión	Mpa	15.87	11.22	12.72	10.8	14.33	17.55	16.59
28	Compresión	Mpa	20.68	14.49	16.6	13.98	20.92	22.46	18.04

**Fuente:** Elaboración propia

En la **Figura 4.4**, se muestra la evolución de la resistencia a compresión de los morteros T200, T325 y control, elaborados a las edades de curado de 3, 7 y 28 días respectivamente, para los cuales se muestra el crecimiento de resistencias de 3 a 28 días.

**Figura 4.4**

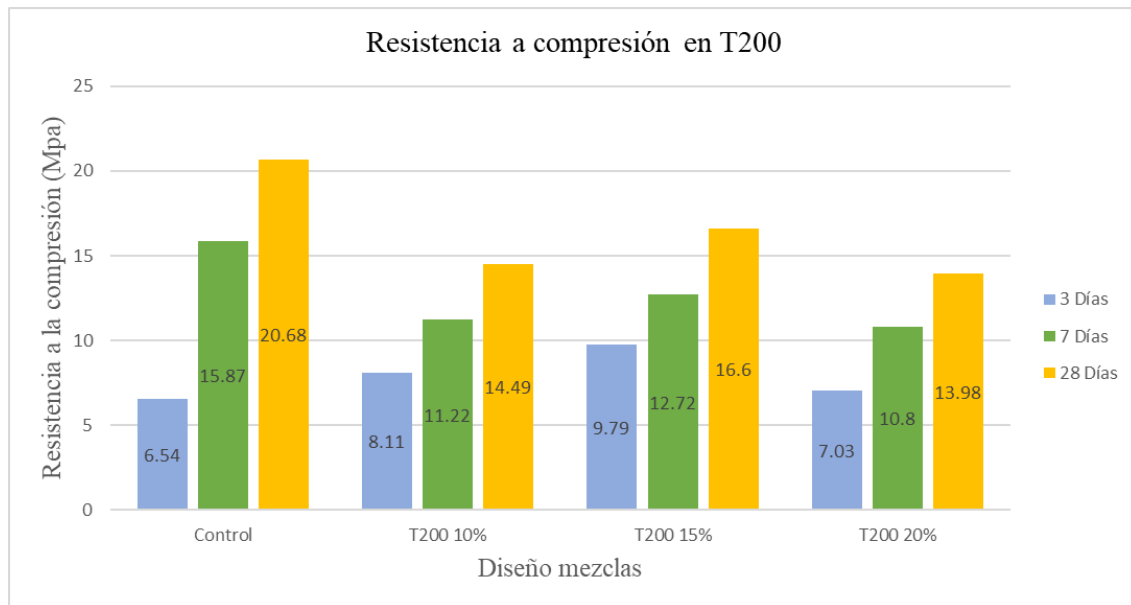
*Resistencia a compresión de mezcla convencional a diferentes edades*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.5**

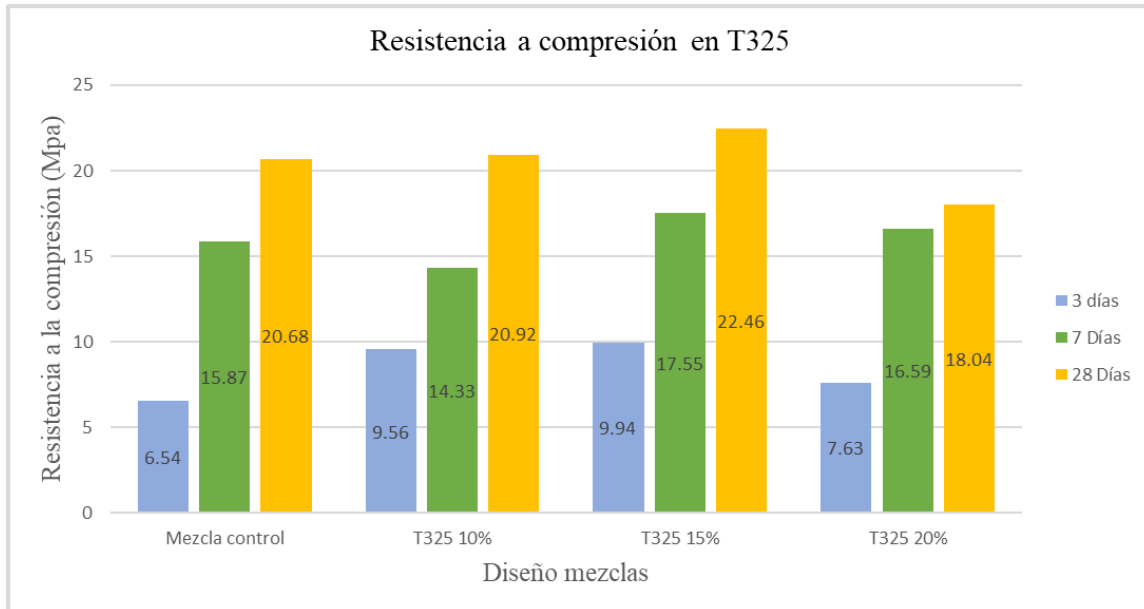
*Resistencia a compresión de mezclas con T200 a diferentes edades*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.6**

*Resistencia a compresión de mezclas con T325 a diferentes edades*



**Fuente:** Elaboración Propia.

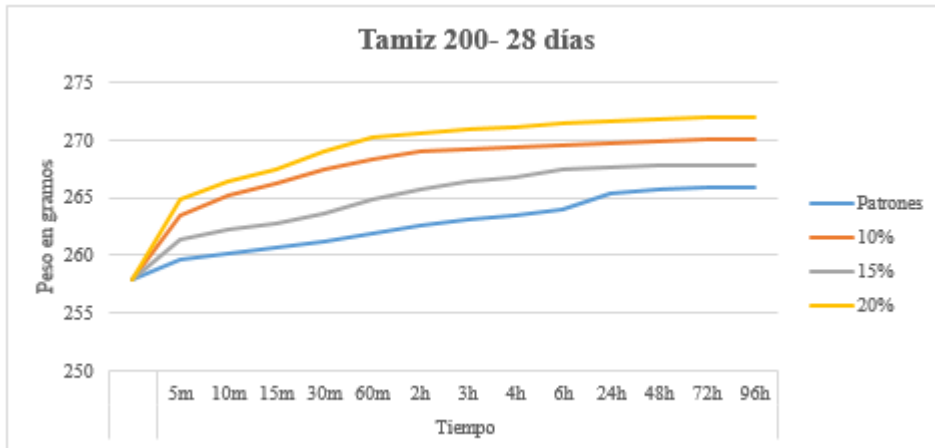
#### **4.4 Porosidad**

El ensayo de porosidad en morteros es una evaluación que se realiza para determinar la cantidad y tamaño de los poros presentes en una muestra de mortero.

Los poros pueden influir significativamente en las propiedades del mortero, como la resistencia, la durabilidad y la permeabilidad. Durante el desarrollo del ensayo, se buscaba saber la porosidad efectiva de cada espécimen por medio del coeficiente de absorción, y para su cálculo se basó en la ganancia de pesos de las muestras, como se respaldan en las siguientes figuras:

**Figura 4.7**

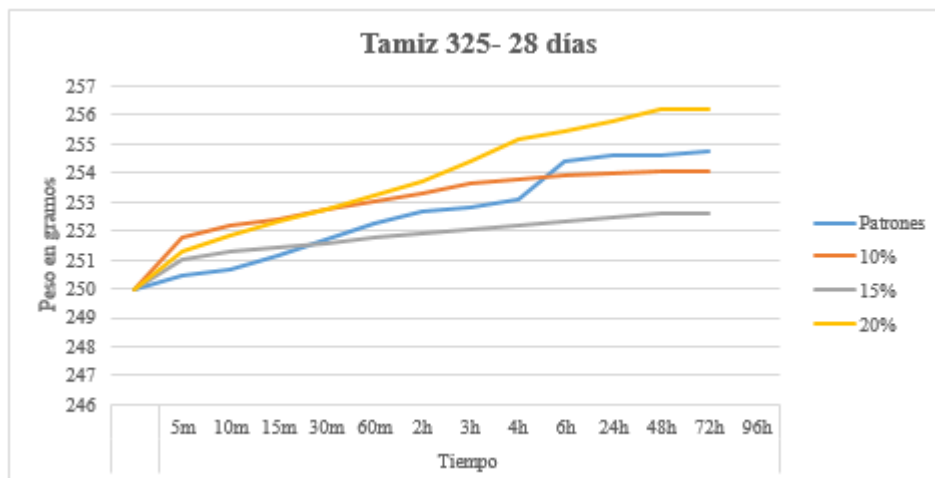
*Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 28 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.8**

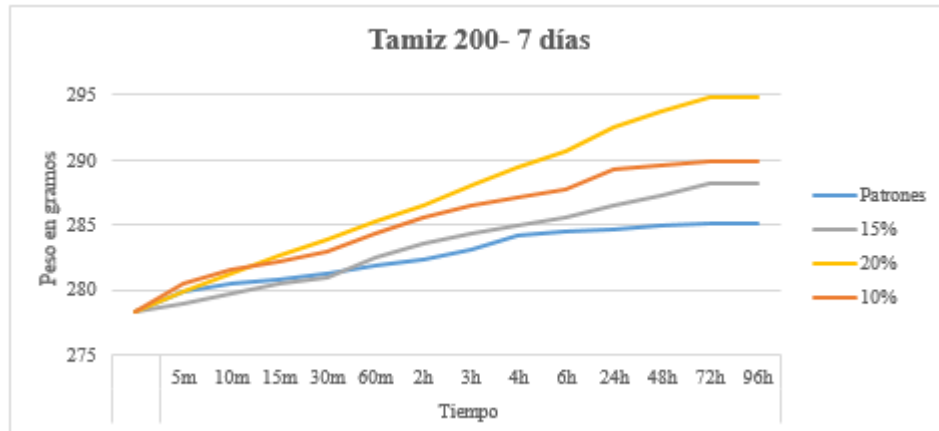
*Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 28 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.9**

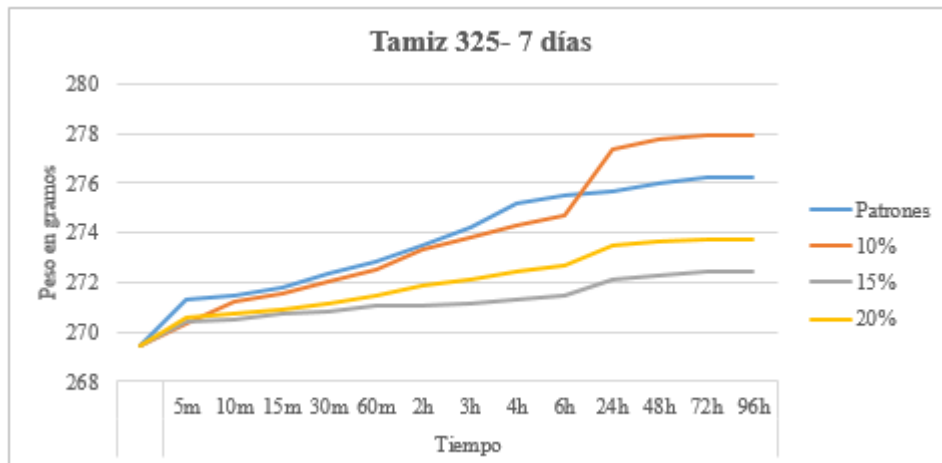
*Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 7 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.10**

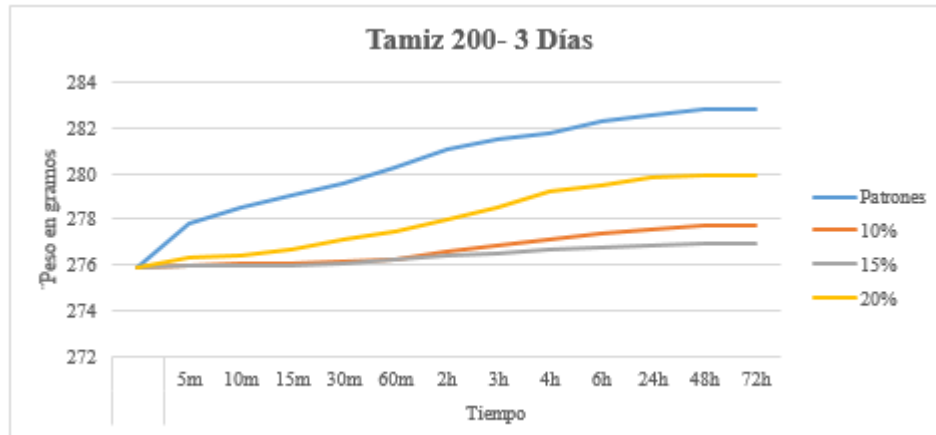
*Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 7 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.11**

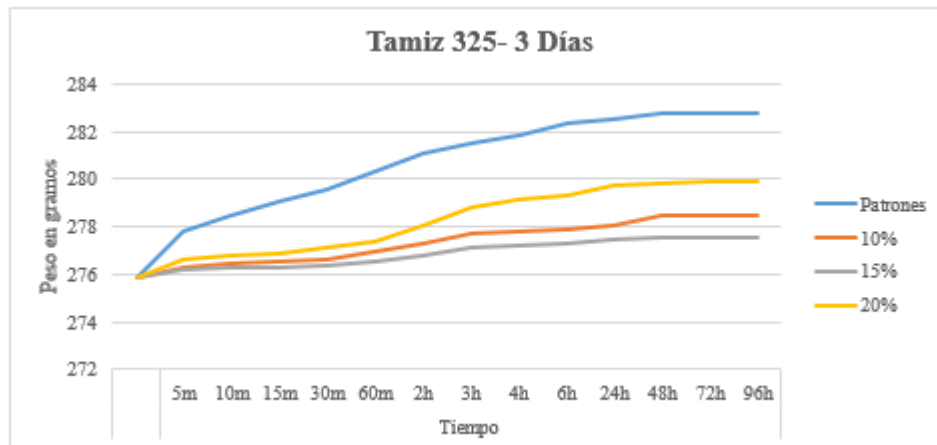
*Ganancia de pesos del Tamiz 200 a 3 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

**Figura 4.12**

*Ganancia de pesos del Tamiz 325 a 3 días*



**Fuente:** Elaboración Propia.

Una vez obtenidos estos datos, se utilizó la norma española UNE 83982 (Asociación Española de Normalización, 2008), la cual detalla las siguientes ecuaciones para el cálculo de dichos coeficientes:

**Ecuación 4.1:** *Cálculo del coeficiente de absorción*

$$K = \frac{\delta a \cdot \varepsilon_e}{10\sqrt{m}}$$

**Ecuación 4.2:** *Cálculo de componentes del coeficiente de absorción  $\varepsilon_e$*

$$\varepsilon_e = \frac{Q_n - Q_0}{A * h * \delta a}$$

**Ecuación 4.3:** *Cálculo del componente de absorción  $m$*

$$m = \frac{tn}{h^2}$$

En donde:

$K$ : es el coeficiente de absorción capilar ( $\text{Kg/m}^2\text{min}^{0.5}$ );

$\delta a$ : es la densidad del agua (se considera el valor de  $1\text{g/cm}^3$ );

$\varepsilon_e$ : es la porosidad efectiva del mortero ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );

$m$ : es la resistencia a la penetración del agua por la absorción capilar ( $\text{min/cm}^2$ );

$Q_n$ : es el peso de la probeta al alcanzar la saturación (g);

$Q_0$ : es el peso de la probeta antes de empezar el ensayo (g);

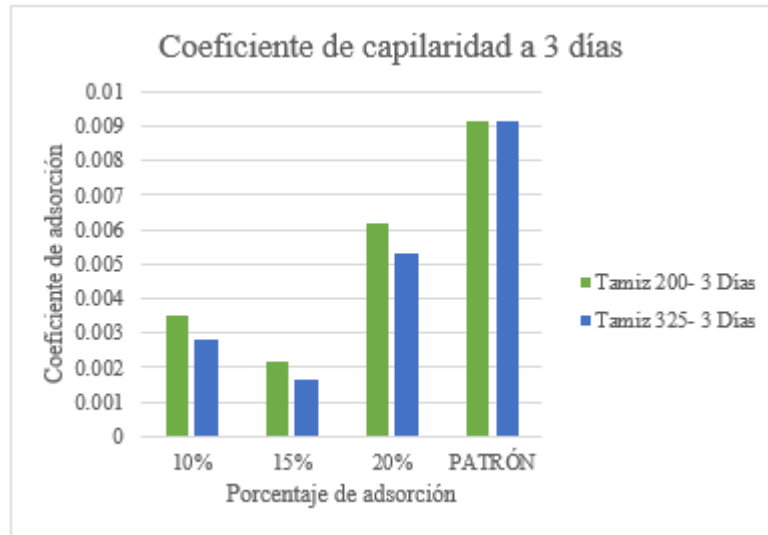
$A$ : es la sección de la probeta ( $\text{cm}^2$ );

$h$ : es el espesor de la probeta (cm);

$tn$ : es el período de tiempo necesario para alcanzar la saturación (min).

**Figura 4.13**

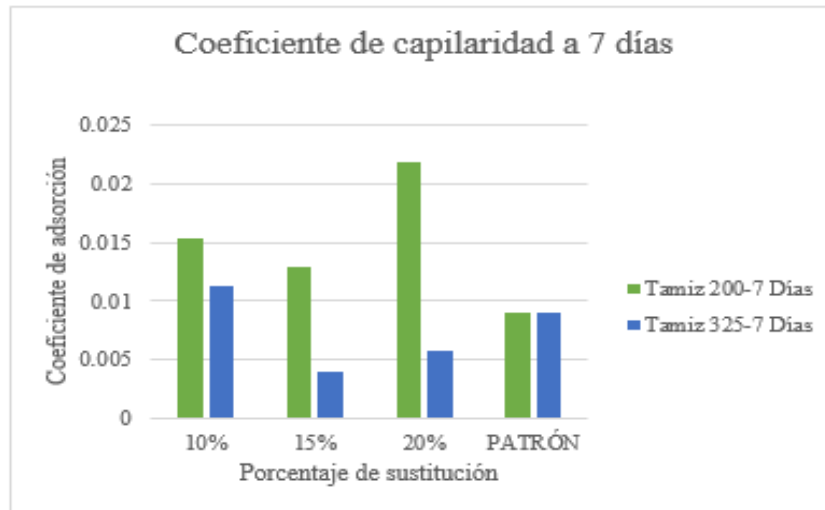
*Coefficiente de capilaridad 3 días*



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 4.14**

*Coefficiente de capilaridad 7 días*

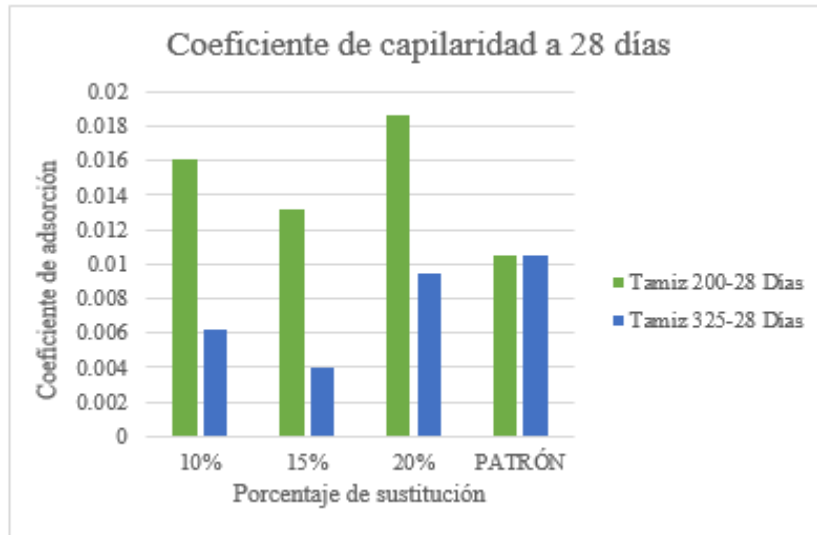


**Fuente:** Elaboración propia.



**Figura 4.15**

*Coefficiente de capilaridad 28 días*



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.5 Fluidez**

Los resultados del ensayo de fluidez brindan información sobre el análisis de la consistencia, uniformidad y calidad del concreto fresco. Una mayor fluidez indica que tiene mejor consistencia, facilitando su uso, manipulación y colocación, además de garantizar cohesión y calidad del concreto, caso contrario, si presenta una fluidez baja puede ser indicador de una mezcla seca y pegajosa. El asentamiento del hormigón es aceptable entre rango de 2 a 16 centímetros, fuera de estos límites los valores medidos no son tomados en cuenta. Para este ensayo, la variación de altura fue de 10 centímetros concluyendo que, con la adición de la puzolana, entra en los límites adecuados para tener las propiedades requeridas del hormigón.

## Figura 4.16

*Medición de la variación*



**Fuente:** Elaboración propia.

### CONCLUSIONES

- Se ha comprobado la eficacia de la Zeolita como elemento de sustitución parcial de cemento portland en las distintas dosificaciones propuestas. El tipo específico de Zeolita empleada en la composición de los morteros favorece el incremento de resistencias mecánicas respecto al tiempo, igualmente, la presencia considerable de óxidos metálicos como  $(SiO_2)$ ,  $(Al_2O_3)$  y  $(Fe_2O_3)$  les confiere un buen comportamiento puzolánico a las mezclas con sustitución por la formación adicional de CSH.
- Se notaron alteraciones físicas en los especímenes fabricados con Zeolita en comparación con los de control, puesto que, presentaban un tono más claro,

específicamente, un amarillento muy tenue en su estado fresco y una vez endurecidos una coloración más oscura, posiblemente debido a la composición química que estas presentan, principalmente de los óxidos vigentes.

- En los especímenes sometidos a un curado de 3 días, los resultados indican que la mayor resistencia se observa en la sustitución del 15% de Zeolita, particularmente en el espécimen con T325 con 9.94 Mpa. Así mismo, en el caso de los especímenes T200, la mayor resistencia a compresión se encuentra en el espécimen con dosificación del 15% de Zeolita con 9.79Mpa.
- Respecto a los especímenes sometidos a un curado de 7 días, los resultados indican que la mayor resistencia se observa en la sustitución del 15% de Zeolita, nuevamente en el espécimen con T325 con 17.55 Mpa. No obstante, en el caso de los especímenes T200, la mayor resistencia a compresión se encuentra en el espécimen con dosificación convencional con 15.87 Mpa.
- Entorno a los especímenes sometidos a un curado de 28 días, los resultados indican que es reincidente el 15% de sustitución de Zeolita, de nuevo en el espécimen con T325 con 22.46 Mpa. Sin embargo, para el caso de los especímenes T200, la mayor resistencia a compresión se encuentra en el espécimen con dosificación sin Zeolita, siendo de 20.68 Mpa.
- El tamaño de partícula presente en las mezclas posee un rol esencial en las propiedades mecánicas de los morteros, considerando que, a menor tamaño de partícula las puzolanas aumentan su capacidad para fijar la cal presente en el cemento mediante compuestos como  $Al_2O_3$ , lo que permite mejorar las resistencias de morteros (Jara & Palacios, 2015, p. 25).

- La composición morfológica de la Zeolita interviene notoriamente en las mezclas con sustitución, dado que, formas de partículas con características angulares y rugosas impulsan la hidratación de los silicatos y potencian la saturación adecuada en las partículas de cemento, propiciando así, una mejor adherencia de los materiales los cuales brindarán una mejor distribución de esfuerzos que son traducidos en una mayor resistencia
- De la misma manera, las variaciones en los niveles de resistencia se relacionan con los valores correspondientes de los coeficientes derivados del ensayo de absorción de agua por capilaridad, como la porosidad efectiva, el coeficiente de absorción y la velocidad de absorción. Se observa que, a medida que la porosidad y la velocidad de absorción disminuyen, la resistencia del mortero tiende a aumentar, como se evidencia particularmente en los especímenes que contienen Zeolita. Estas discrepancias son más notables al comparar los diferentes porcentajes presentados en las tablas para cada espécimen.

## **RECOMENDACIONES**

- Estudiar y determinar las condiciones adecuadas (temperatura máxima, calor de hidratación, curado) para un tratamiento adecuado de Zeolita.
- Estudiar el comportamiento físico y químico de la Zeolita como una adición al cemento ya sea cruda o tratada y a su vez el desempeño de morteros y concretos con esta adición.
- Determinar y estudiar las causas por las cuales aumenta la porosidad de la Zeolita al ser sometida en procesos químicos con el cemento y a su vez evaluar posibles procedimientos que logren contrarrestar dicho aumento en la porosidad.

- Mantener una supervisión precisa del proceso de curado de los morteros ya que es fundamental para prevenir cualquier alteración en los resultados de las pruebas de resistencia de las muestras.
- Para desmoldar cada molde y extraer la muestra, es posible emplear un agente desmoldante que facilite esta tarea sin afectar la composición química de las muestras.
- Al momento de conformar los morteros, se debe considerar la etapa de compactado en los moldes, ya que, un inadecuado procedimiento puede establecer la aparición de burbujas con aire, las cuales resultarían en poros, provocando así, modificaciones en las propiedades estructurales de los morteros.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Acevedo, J., Martínez, E., Díaz, E., & Amat, E. (1985). *Materiales de Construcción* (Ediciones, Ed.; La Habana, Vol. 1).

Afzal, S., Vinod, A., Akhil, S., & Mohan, C. G. (2023). Evaluation of zeolite as supplementary cementing material. *Materials Today: Proceedings*.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.318>

Álvarez, J., & Cañizares, C. (2023). *Influencia de distintos tipos de arena en respuesta a ensayos de resistencia a la compresión del hormigón*. [Universidad del Azuay].

<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/13392>

Álvarez, J. I., Antonio Martin, G. C., & Pedro, G. C. (2015). *Historia de los morteros*.

<https://www.researchgate.net/publication/273110688>

American Society for Testing and Materials. (2018). Especificación Estándar para Agregados de Concreto. *ASTM C33*.

American Society for Testing and Materials. (2019a). Especificación Estándar para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural Cruda o Calcinada para Uso en Concreto. *ASTM C618*.

American Society for Testing and Materials. (2023). Especificación Estándar para Cemento Pórtland. *ASTM C150*.

American Society for Testing and Materials. (2019b). Método de Prueba Estándar para Análisis Granulométrico de Agregados Finos y Gruesos. *ASTM C136*.

American Society for Testing and Materials. (2020). Método de Ensayo Estándar para la Resistencia a la Compresión de Morteros de Cemento Hidráulico (Usando Especímenes de Cubo de 2 pulgadas. *ASTM C109*.

Andrada, R., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A., Raggiotti, B., & Sánchez, S. (2012). Evaluación térmica de morteros elaborados con zeolita como porcentaje de sustitución de aglomerante. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 223–230.

Asociación Española de Normalización. (2008). Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido. *UNE 83982*.

Castillo, E., & Seijas, S. (2019). Minimización de material particulado generado en el proceso de clinkerización mediante el empleo de filtros de mangas. *Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 15(3), 169–181.

- Costafreda, J. (2011). *Tectosilicatos con características especiales: las zeolitas naturales*.  
Fundación Gómez Pardo. <http://www.fundaciongomezpardo.es/>
- Curi, A. (2006). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros.  
*Información tecnológica*, 17(6), 111–118. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Fernández, R., & Ureña, M. (2021). *Estudio comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos del cantón Guayaquil para sustitución parcial del cemento portland IP* [Universidad Técnica de Ambato].  
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31996>
- Gómez, A. (2009). *Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales en cementos* [Universidad politécnica de Valencia]. <https://www.upv.es/upl/U0566483.pdf>
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción* (Universidad Nacional de Colombia., Ed.).
- Huillca, M. (2023). *Efecto de la combinación de zeolita y agregado reciclado de residuos de concreto para la elaboración de adoquín tipo I*. Universidad Nacional de Monquegua.
- Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 194–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2013.05.001>
- Jara, R., & Palacios, R. (2015). *Utilización de la ceniza de bagazo de caña de azúcar (cbca) como sustituto porcentual del cemento en la elaboración de ladrillos de concreto* [Universidad nacional del Santa]. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/2715>

- Maddalena, R., Roberts, J. J., & Hamilton, A. (2018). Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials? A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. *Journal of Cleaner Production*, 186, 933–942.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>
- Maldonado, D. (2021). *Estudio de la zeolita estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción*. [Universidad Técnica de Ambato].  
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31997>
- Mora, A. (2023). *Valoración de la resistencia a la compresión simple de bloques fabricados con mineral Zeolita, como sustituto de material de construcción* [Universidad del Azuay].  
<http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/12978>
- Morante, F., Ramos, V., Guerrero, J., & Montalván, J. (2005). Desarrollo de las investigaciones sobre Zeolitas naturales en el Ecuador. *Congreso Latinoamericano de Geología*, 1–6.  
<https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CLG12-65.pdf>
- Orrala, F., & Gómez, F. (2015). *Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de puzolana obtenida de la calcinación de residuos del cultivo de maíz producido en la provincia de Santa Elena* [Universidad estatal península de Santa Elena].  
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/2272>
- Peñafiel, R. (2021). *Análisis comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos en relación con el cemento puzolánico tipo IP* [Universidad Técnica de Ambato].  
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32166>



- Petroche, D., & Ramírez, Á. (2021). *Desempeño Ambiental del Cemento y del Concreto en el Ecuador: Una puerta a la Construcción Sostenible* [Escuela superior politécnica del litoral]. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52614>
- Raggiotti, B., Locati, J., Murra, F., & Marfil, J. (2015). Zeolite, Study of Aptitude as a Natural Pozzolan Applied to Structural Concrete. *Revista de la Construcción*, 14–20.
- Salcedo, V. (2021). *Estudio de las propiedades físicas de Zeolita natural (aluminosilicato) de tipo Clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland* [Universidad técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32000>
- Sedlmajer, M., Zanch, J., Hroudová, J., & Rovnaníková, P. (2015). Possibilities of Utilization Zeolite in Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 525–528. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.1100629>
- Soffietti, F. (2015). *Análisis de actividad puzolánica de toba zeolítica* [Universidad nacional de Córdoba]. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/2306/ITF%20-%20Franco%20Soffietti%20-%20An%20lisis%20de%20actividad%20puzol%20nica%20en%20toba%20zeol%20nica.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Una%20puzolana%20es%20un%20material,fresco%20como%20en%20estado%20endurecido.>
- Valenzuela, Y. (2017). *Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón al emplear Zeolita natural en reemplazo parcial del cemento* [Universidad técnica de Ambato]. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25828>

Ventura, L. (2019). *Sustitución de 15% y 20% de cemento por polvo de Roca Zeolita en la resistencia de un mortero* [Universidad San Pedro].

<http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/11386>

Vidaud, E. (2013). *De la historia del cemento*. <https://www.imcyc.com/quienes.html#close>

Yanchaguano, D. (2021). *Análisis de aluminosilicatos como material de sustitución parcial del cemento tipo GU en la construcción* [Universidad Técnica de Ambato].

<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32167>