



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Evaluación de las Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de  
Hormigones que Incorporan Sílice.**

**TITULACIÓN DE INGENIERO CIVIL**

**JOSÉ A. MERCHÁN F.**

**ING. BERNARDO FEIJOO G.**

**CUENCA - ECUADOR**

**2026**

## **Dedicatoria**

### **A Dios**

Por brindarme la vida, la fortaleza y la sabiduría necesarias para alcanzar esta meta.

### **A mis padres y hermano**

A mi padre Bolívar, a mi madre Susana y a mi hermano Juan Martín, por su amor, apoyo incondicional y esfuerzo constante. Gracias por guiarme, motivarme y estar siempre a mi lado en cada etapa de este camino.

### **A mis abuelos**

A Tato, Ceci, Titi y Memo (+), por su cariño, sus enseñanzas y por ser siempre un pilar fundamental en mi vida.

**José Andrés Merchán**

## **Agradecimientos**

A mi familia, gracias por el cariño y apoyo brindado en todo momento.

De manera especial quiero agradecer al ingeniero Bolívar Merchán, al ingeniero Bernardo Feijoo y al ingeniero en minas Patricio Feijoo por el conocimiento compartido y su apoyo incondicional en el desarrollo de esta tesis.

Así mismo, al laboratorista ingeniero William por su colaboración y aporte durante el proceso experimental.

**José Andrés Merchán**

## Resumen

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la influencia de la incorporación de sílice de tamaño reducido en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, evaluando su comportamiento a diferentes edades de curado.

Para ello, se diseñaron mezclas de hormigón tomando como referencia una mezcla patrón sin adición de sílice, a partir de la cual se elaboraron dosificaciones con distintos porcentajes de incorporación. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y porosidad efectiva a los 7, 14 y 28 días, con el fin de evaluar la evolución del material en el tiempo.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la incorporación de sílice no mejora la resistencia a la compresión en edades tempranas; sin embargo, a los 14 y 28 días se observa un incremento significativo, especialmente en la dosificación del 1%, debido al desarrollo de la reacción puzolánica y la formación adicional de gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H).

En cuanto a la resistencia a la tracción, se observó una mejora en edades tempranas, aunque este comportamiento no se mantiene en el tiempo, evidenciándose valores superiores en la mezcla patrón a los 28 días.

Por otro lado, la porosidad efectiva presentó una reducción significativa en todas las mezclas con sílice, siendo más notable en dosificaciones intermedias cercanas al 3%, lo que indica una mejora en la densificación de la matriz y, por ende, en la durabilidad del material.

Se concluye que la incorporación de sílice de tamaño reducido mejora el desempeño del hormigón en edades medias y tardías, especialmente en términos de resistencia a la compresión y durabilidad. No obstante, se determinó que no existe una única dosificación óptima para todas las propiedades, siendo necesario establecer un equilibrio en el diseño de mezclas en función de los requerimientos específicos de cada aplicación.

**Palabras clave:** hormigón, sílice de tamaño reducido, resistencia a la compresión, durabilidad, porosidad, reacción puzolánica.

## Abstract

This study aimed to analyze the influence of incorporating reduced-size silica on the mechanical and durability properties of concrete, evaluating its behavior at different curing ages.

Concrete mixtures were designed using a control mix without silica as a reference, from which additional mixtures with varying silica contents were developed. Compressive strength, tensile strength, and effective porosity tests were conducted at 7, 14, and 28 days to assess the evolution of the material over time.

The results showed that silica incorporation does not improve compressive strength at early ages; however, at 14 and 28 days, a significant increase was observed, particularly in the 1% dosage, due to the development of the pozzolanic reaction and the formation of additional calcium silicate hydrate (C-S-H) gel.

Regarding tensile strength, an improvement was observed at early ages, although this trend did not persist over time, with the control mix showing higher values at 28 days.

On the other hand, effective porosity showed a significant reduction in all mixtures containing silica, with the most notable improvement observed at intermediate dosages around 3%, indicating enhanced matrix densification and durability.

It is concluded that the incorporation of reduced-size silica improves concrete performance at medium and later ages, particularly in terms of compressive strength and durability. However, no single optimal dosage was identified for all properties, highlighting the need to balance mechanical and durability requirements in mix design.

**Keywords:** concrete, reduced-size silica, compressive strength, durability, porosity, pozzolanic reaction.

# Índice de contenidos

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de contenidos	vi
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	x
1. Introducción	11
1. Planteamiento del problema y fundamentos teóricos	3
1.1 Problemática:	3
1.2 Justificación:	4
1.3 Marco Teórico:	5
1.3.1 Materiales cementicios y comportamiento del hormigón	5
1.3.2 Sílice de tamaño reducido en materiales cementicios	6
1.3.3 Influencia de la sílice de tamaño reducido en la resistencia y durabilidad	7
1.3.4 Normativa aplicable y antecedentes de investigación	8
1.3.5 Enfoque del presente estudio	8
1.4 Objetivos:	9
1.4.1 Objetivo general	9
1.4.2 Objetivos específicos	9
1.5 Metodología:	9
2. Capítulo I: Revisión bibliográfica y fundamentos teóricos	12
2.1 Propiedades y comportamiento del cemento y del hormigón	12
2.2 Materiales de tamaño reducido aplicados a los materiales de construcción	14
2.3 Efectos de la sílice de tamaño reducido en la matriz cementicia	14

3.	Capítulo II: Metodología experimental	16
3.1	Introducción	16
3.2	Selección y caracterización de materiales	16
3.2.1	Cemento	16
3.2.2	Agregados	17
3.2.3	Agua de mezclado	20
3.2.4	Sílice de tamaño reducido	20
3.3	Dosificación y preparación de las mezclas de hormigón	21
3.4	Elaboración y curado de las probetas	24
3.5	Procedimientos de ensayo	25
3.5.1	Ensayo de porosidad	25
3.5.2	Ensayo de resistencia a la compresión	25
3.5.3	Ensayo de resistencia a la tracción indirecta	26
3.6	Equipos de laboratorio	26
3.7	Normas técnicas aplicadas	26
3.8	Consideraciones finales de la metodología	26
4.	Capítulo III: Análisis y Discusión de Resultados	27
4.1	Resultados a los 7 días	27
4.1.1	Resistencia a la compresión	27
4.1.2	Resistencia a la tracción	28
4.1.3	Porosidad efectiva	29
4.2	Resultados a los 14 días	30
4.2.1	Resistencia a la compresión	30
4.2.2	Resistencia a la tracción	32
4.2.3	Porosidad efectiva	33
4.3	Resultados a los 28 días	34
4.3.1	Resistencia a la compresión	34

4.3.2	Resistencia a la tracción _____	36
4.3.3	Porosidad efectiva _____	38
4.4	Comparativa _____	39
5.4.1	Comparación global de la resistencia a la compresión _____	39
5.4.2	Comparación global de la resistencia a la tracción _____	41
5.4.3	Comparación global de la porosidad efectiva _____	43
5.	Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones _____	44
5.1	Principales Hallazgos _____	44
5.1.1	Comportamiento de la resistencia a la compresión _____	44
5.1.2	Comportamiento de la resistencia a la tracción _____	46
5.1.3	Comportamiento de la porosidad efectiva _____	47
5.1.4	Determinación de la mejor dosificación _____	48
5.2	Viabilidad técnica y limitaciones del estudio _____	49
5.2.1	Viabilidad técnica de la incorporación de sílice _____	49
5.2.2	Limitaciones relacionadas con el alcance experimental _____	50
5.2.3	Limitaciones en las condiciones de ensayo _____	51
5.2.4	Limitaciones en la evaluación de durabilidad _____	51
5.3	Recomendaciones para futuras investigaciones _____	52
5.3.1	Evaluación del comportamiento a edades mayores de curado _____	52
5.3.2	Ampliación del rango y precisión de las dosificaciones de sílice _____	52
5.3.3	Incorporación de ensayos avanzados de durabilidad _____	53
5.3.4	Análisis de la trabajabilidad y optimización mediante aditivos _____	54
5.3.5	Validación en condiciones reales y estudios a escala estructural _____	54
5.3.6	Estudios microestructurales y correlación con propiedades macroscópicas	
	55	
	Bibliografía _____	56
	Anexos _____	57

## Índice de figuras

Figure 1: Curva de Distribución Granulométrica Agregado Grueso.....	18
Figure 2: Curva de Distribución Granulométrica Agregado Fino.....	19
Figure 3: Gráfica Resistencia a Compresión a los 7 días .....	28
Figure 4: Gráfica Resistencia a Tracción a los 7 días.....	29
Figure 5: Gráfica Porosidad Efectiva a los 7 días .....	30
Figure 6: Gráfica Resistencia a Compresión a los 14 días .....	31
Figure 7: Gráfica Resistencia a Tracción a los 14 días.....	32
Figure 8: Gráfica Porosidad Efectiva a los 14 días .....	34
Figure 9: Gráfica Resistencia a Compresión a los 28 días .....	36
Figure 10: Gráfica Resistencia a Tracción a los 28 días.....	37
Figure 11: Gráfica Porosidad Efectiva a los 28 días .....	39
Figure 12: Gráfica Resistencia a Compresión .....	41
Figure 13: Gráfica Resistencia a Tracción .....	42
Figure 14: Gráfica Porosidad Efectiva .....	44
Figure 15: Granulometria .....	57
Figure 16: Peso Volumetrico.....	58
Figure 17: Probetas Cilíndricas para romper a los 7 días .....	58
Figure 18: Probetas Cilíndricas para romper a los 14 días .....	59
Figure 19: Probetas Cilíndricas para romper a los 28 días .....	60
Figure 20: Elaboracion de las Probetas Cúbicas .....	61
Figure 21: Ensayo Compresión .....	62
Figure 22: Ensayo Porosidad.....	63

## Índice de tablas

Table 1: Objetivos y Actividades .....	9
Table 2: Porcentajes, Edades de Ruptura y Ensayos a realizar. ....	11
Table 3: Granulometría Agregado Grueso .....	17
Table 4: Limite Superior e Inferior Agregado Fino .....	18
Table 5: Granulometría Agregado Fino .....	18
Table 6: Propiedades de los Agregados.....	19
Table 7: Dosificación por metro cúbico de hormigón.....	23
Table 8: Dosificación par cilindro de hormigón.....	24
Table 9: Resultados Resistencia a Compresión a los 7 días .....	27
Table 10: Resultados Resistencia a Tracción a los 7 días .....	29
Table 11: Reultados Porosidad Efectiva a los 7 días.....	30
Table 12: Resultados Resistencia a Compresión a los 14 días .....	31
Table 13: Resultados Resistencia a Tracción a los 14 días .....	32
Table 14: Gráfica Porosidad Efectiva a los 14 días.....	33
Table 15: Resultados Resistencia a Compresión a los 28 días .....	35
Table 16: Resultados Resistencia a Tracción a los 28 días .....	37
Table 17: Resultados Porosidad Efectiva a los 28 días .....	39

# **Evaluación de las Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Hormigones que Incorporan Sílice**

## **1. Introducción**

El hormigón constituye uno de los materiales de construcción más utilizados en la ingeniería civil a nivel mundial, debido a su versatilidad, disponibilidad de materias primas, facilidad de fabricación y adecuada resistencia mecánica (Neville, 2011). Su empleo resulta fundamental en el desarrollo de viviendas, edificaciones de uso público y privado, puentes, pavimentos y obras de infraestructura en general, desempeñando un papel clave en el crecimiento económico y social de los países (Mehta & Monteiro, 2014). La capacidad del hormigón para adaptarse a diferentes condiciones estructurales y ambientales lo ha consolidado como un material indispensable en la práctica profesional de la ingeniería civil.

A pesar de sus múltiples ventajas, el hormigón convencional presenta limitaciones inherentes a su naturaleza material, las cuales afectan su comportamiento mecánico y su durabilidad a largo plazo. Entre estas limitaciones se encuentran la presencia de una red porosa capilar, la formación de micro fisuras durante el proceso de hidratación y endurecimiento, así como su baja resistencia a la tracción (Neville, 2011). Estas características facilitan la penetración de agentes agresivos del medio ambiente, tales como cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y humedad, lo que puede desencadenar procesos de deterioro como la carbonatación, el ataque químico y la corrosión del acero de refuerzo (Mehta & Monteiro, 2014).

La degradación progresiva del hormigón no solo reduce la vida útil de las estructuras, sino que también incrementa significativamente los costos asociados al mantenimiento, rehabilitación y refuerzo de las mismas (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). En muchos casos, las edificaciones requieren intervenciones prematuras que no fueron previstas en su etapa de diseño, lo que evidencia una brecha entre la vida útil estimada y la vida útil real de las estructuras. Esta problemática adquiere especial

relevancia en regiones con condiciones ambientales agresivas, donde el deterioro del hormigón puede acelerarse considerablemente.

Frente a este escenario, la mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón se ha convertido en una prioridad dentro de la investigación y el desarrollo de nuevos materiales de construcción. En las últimas décadas, se han explorado diversas estrategias para optimizar la microestructura del material, entre las que se destacan la modificación de la matriz cementicia mediante el uso de adiciones minerales (Mehta & Monteiro, 2014). Estas alternativas buscan reducir la porosidad, mejorar la cohesión interna y limitar la penetración de agentes agresivos, contribuyendo así a un mejor desempeño estructural.

En este contexto, la incorporación de sílice de tamaño reducido como sustituto parcial del cemento Portland surge como una alternativa tecnológica con alto potencial. Debido a su elevada área superficial y a su capacidad para interactuar de manera eficiente con los productos de hidratación del cemento, la sílice de tamaño reducido permite densificar la microestructura del hormigón, favorecer la formación del gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y reducir la cantidad de fases menos estables (Li, Xiao, & Yuan, 2004). Estas modificaciones se traducen en incrementos de la resistencia mecánica, una disminución de la porosidad y una mejora significativa de la durabilidad del material.

Diversos estudios internacionales han demostrado que la incorporación controlada de sílice de tamaño reducido puede generar mejoras sustanciales en la resistencia a la compresión y a la tracción del hormigón, así como una reducción en la permeabilidad y en la susceptibilidad al ataque de agentes químicos (Li et al., 2004; Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). No obstante, a nivel nacional, la aplicación de este tipo de materiales aún es limitada, existiendo una escasez de estudios experimentales que evalúen su comportamiento bajo condiciones locales y que permitan su implementación en el ámbito profesional.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la factibilidad técnica de la incorporación de sílice de tamaño reducido en mezclas de hormigón, evaluando su influencia en las propiedades mecánicas y en la durabilidad del material. El estudio se desarrolla bajo un enfoque experimental y comparativo, mediante la elaboración de

mezclas con y sin adición de sílice, y la realización de ensayos de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y porosidad. El alcance de la investigación busca generar información técnica confiable que contribuya al desarrollo de hormigones más durables, eficientes y sostenibles, fortaleciendo el vínculo entre la investigación académica y la práctica profesional de la ingeniería civil.

## **1. Planteamiento del problema y fundamentos teóricos**

### **1.1 Problemática:**

El cemento es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial, desempeñando un papel fundamental en el desarrollo de viviendas, edificios, puentes y obras de infraestructura (Mehta & Monteiro, 2014). Sin embargo, el comportamiento del cemento y del hormigón convencional presenta limitaciones que afectan directamente su desempeño estructural y su durabilidad, entre ellas la aparición de micro fisuras, una elevada porosidad y la pérdida progresiva de resistencia como consecuencia de la acción de agentes externos (Neville, 2011). Estas características están directamente relacionadas con la naturaleza heterogénea del material y con los procesos físico-químicos que se desarrollan durante la hidratación del cemento.

Estas deficiencias favorecen un deterioro acelerado de las estructuras, reduciendo de manera significativa su vida útil y generando la necesidad de mantenimientos frecuentes (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). En muchos casos, la falta de intervenciones oportunas puede comprometer la seguridad de los usuarios, lo que evidencia una brecha entre la vida útil real de las estructuras y la vida útil considerada en las etapas de diseño, especialmente en ambientes con alta agresividad química o exposición constante a la humedad (Mehta & Monteiro, 2014).

Desde el punto de vista técnico, la composición del cemento convencional limita la formación de una microestructura completamente compacta, lo que facilita la penetración de agentes agresivos como agua, sulfatos, cloruros y dióxido de carbono (Neville, 2011). Esta condición incrementa la permeabilidad del material y acelera mecanismos de deterioro como la carbonatación, el ataque químico y la corrosión del

acero de refuerzo, afectando negativamente el desempeño del hormigón a largo plazo (Mehta & Monteiro, 2014).

Frente a esta problemática, resulta necesario investigar alternativas que permitan mejorar la microestructura del cemento y del hormigón, optimizando tanto sus propiedades mecánicas como su durabilidad. Entre las opciones disponibles, la incorporación de sílice de tamaño reducido como adición mineral se presenta como una alternativa prometedora, debido a su capacidad para densificar la matriz cementicia, reducir la porosidad capilar y mejorar el comportamiento global del material (Li et al., 2004). La alta área superficial de estas partículas favorece reacciones puzolánicas más eficientes y una mayor formación de gel C-S-H, lo que contribuye a una microestructura más densa y estable (Li et al., 2004).

No obstante, a pesar de los avances reportados a nivel internacional, en el contexto nacional existe una limitada cantidad de estudios experimentales que evalúen el comportamiento del hormigón modificado con sílice de tamaño reducido bajo condiciones locales (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Esta falta de información técnica dificulta la adopción de estos materiales en la práctica profesional y evidencia la necesidad de generar parámetros experimentales que respalden su aplicación en el sector de la construcción ecuatoriano.

## **1.2 Justificación:**

La realización del presente trabajo se justifica desde los ámbitos técnico, social, ambiental y académico. Desde el punto de vista técnico, la investigación permitirá evaluar de manera experimental la influencia de la incorporación de sílice de tamaño reducido en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, comparando su desempeño frente al hormigón convencional. Diversos estudios han demostrado que la modificación de la matriz cementicia mediante adiciones minerales puede generar mejoras significativas en resistencia y durabilidad (Mehta & Monteiro, 2014; Li et al., 2004). En este sentido, los resultados obtenidos contribuirán a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de adiciones y su viabilidad como alternativa de mejora del material.

En el ámbito social, el estudio adquiere relevancia al enfocarse en la mejora de la durabilidad y seguridad de las estructuras, lo que repercute directamente en la protección de los usuarios y en la reducción de riesgos asociados a edificaciones deterioradas o con vida útil reducida (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). El desarrollo de materiales más resistentes y durables favorece construcciones más confiables y disminuye la necesidad de intervenciones prematuras, especialmente en contextos donde las condiciones ambientales aceleran los procesos de deterioro.

Desde una perspectiva ambiental, la optimización del desempeño del hormigón mediante la incorporación de sílice puede contribuir a la extensión de la vida útil de las estructuras, lo que se traduce en un uso más eficiente de los recursos y en una disminución indirecta del impacto ambiental asociado a la producción de cemento y a la rehabilitación de infraestructuras (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011). Considerando que la industria del cemento es una de las principales fuentes de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial, la mejora del rendimiento del material constituye una estrategia relevante dentro del enfoque de sostenibilidad en la construcción (Mehta & Monteiro, 2014).

Finalmente, desde el punto de vista académico, este trabajo busca aportar información técnica y experimental que sirva como referencia para futuras investigaciones y aplicaciones profesionales en el país. La generación de datos locales permitirá reducir la brecha existente entre la investigación científica y la práctica constructiva, promoviendo la implementación de materiales innovadores que impulsen el desarrollo de la ingeniería civil y contribuyan a mejorar la calidad de vida de la sociedad.

### **1.3 Marco Teórico:**

#### **1.3.1 Materiales cementicios y comportamiento del hormigón**

El desarrollo de materiales de construcción con mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad constituye una de las prioridades actuales de la ingeniería civil, especialmente ante la necesidad de extender la vida útil de las estructuras y reducir los costos de mantenimiento (Mehta & Monteiro, 2014). El hormigón, como material

compuesto, está conformado por una matriz cementicia que envuelve a los agregados, y su comportamiento depende principalmente de los procesos físico-químicos asociados a la hidratación del cemento Portland (Neville, 2011).

Durante la hidratación del cemento Portland se forman productos como el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y el hidróxido de calcio, siendo el C-S-H la fase responsable del desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón (Mehta & Monteiro, 2014). La continuidad y densidad de esta microestructura influyen directamente en la resistencia, la permeabilidad y la durabilidad del material, ya que determinan el tamaño y la conectividad de la red porosa (Neville, 2011).

La resistencia a compresión del hormigón está estrechamente relacionada con la relación agua/cemento. De acuerdo con la Ley de Abrams, un aumento en esta relación genera un incremento en la porosidad capilar, lo que reduce la resistencia mecánica y favorece la penetración de agentes agresivos (Neville, 2011). Asimismo, los mecanismos de transporte de fluidos y sustancias nocivas a través del hormigón pueden describirse mediante modelos de difusión y permeabilidad, como la ley de Fick y la ley de Darcy, los cuales explican la migración de cloruros, sulfatos y dióxido de carbono a través de la red porosa (Mehta & Monteiro, 2014; Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).

### **1.3.2 Sílice de tamaño reducido en materiales cementicios**

La incorporación de sílice de tamaño reducido en materiales cementicios ha despertado un creciente interés debido a su elevada área superficial específica y a su alta reactividad puzolánica (Li et al., 2004). A diferencia de las adiciones minerales convencionales, las partículas de sílice de tamaño reducido pueden interactuar de manera más eficiente con los productos de hidratación del cemento, modificando la microestructura del hormigón desde sus primeras etapas (Sanchez & Sobolev, 2010).

Uno de los principales efectos de la sílice de tamaño reducido es su capacidad para actuar como material de relleno, ocupando espacios entre los granos de cemento y reduciendo el volumen de poros capilares. Este efecto contribuye a la formación de

una matriz cementicia más densa y homogénea, lo que repercute directamente en una menor permeabilidad del material (Li et al., 2004).

Adicionalmente, la sílice de tamaño reducido actúa como sitio de nucleación durante la hidratación del cemento, favoreciendo la formación temprana de gel C-S-H y acelerando las reacciones puzolánicas (Sanchez & Sobolev, 2010). Este mecanismo acelera el desarrollo de la resistencia mecánica y mejora la calidad de la zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados, considerada una de las regiones más vulnerables del hormigón convencional (Mehta & Monteiro, 2014).

### **1.3.3 Influencia de la sílice de tamaño reducido en la resistencia y durabilidad**

La incorporación de sílice de tamaño reducido modifica de manera significativa el comportamiento mecánico y la durabilidad del hormigón. Desde el punto de vista mecánico, diversos estudios han demostrado que dosis controladas de sílice, generalmente entre el 1 % y el 3 % en peso de cemento, pueden incrementar la resistencia a compresión entre un 15 % y un 25 %, dependiendo de la dosificación, la calidad de la dispersión y las condiciones de curado (Li et al., 2004; Sanchez & Sobolev, 2010). Estos incrementos se atribuyen principalmente al efecto de relleno, a la aceleración de las reacciones de hidratación y a la formación adicional de gel C-S-H, lo que conduce a una microestructura más densa y homogénea.

En términos de durabilidad, la reducción de la porosidad capilar y la mejora de la microestructura disminuyen la permeabilidad del hormigón, limitando la penetración de agentes agresivos como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono (Mehta & Monteiro, 2014). Como consecuencia, se incrementa la resistencia frente a procesos de carbonatación, ataque químico y corrosión del acero de refuerzo, factores determinantes en la vida útil de las estructuras (Pacheco-Torgal & Jalali, 2011).

#### **1.3.4 Normativa aplicable y antecedentes de investigación**

Para la evaluación experimental de las propiedades mecánicas del hormigón, se emplean ensayos normalizados como el ensayo de resistencia a compresión conforme a la norma ASTM C39 (ASTM, 2022). Asimismo, la normativa internacional establece criterios para la selección y clasificación de los materiales, siendo relevantes el ACI 318 para el diseño estructural (ACI, 2019), la ASTM C150 para el cemento Portland (ASTM, 2022a) y la ASTM C494 para aditivos químicos (ASTM, 2022b). Estas normas proporcionan lineamientos técnicos que garantizan la calidad, uniformidad y seguridad en el diseño y producción del hormigón estructural.

En el contexto ecuatoriano, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015) establece parámetros generales de calidad para los materiales de construcción y criterios de diseño estructural; sin embargo, no contempla de manera específica el uso de materiales de tamaño reducido como adiciones en mezclas cementicias. Esta ausencia normativa resalta la importancia de investigaciones experimentales que generen información técnica que pueda servir como base para futuras actualizaciones y regulaciones específicas.

A nivel internacional, diversas investigaciones han evidenciado mejoras significativas en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón modificado con sílice de tamaño reducido, validando su potencial aplicación en regiones con climas agresivos o alta exposición a agentes contaminantes (Li et al., 2004; Sanchez & Sobolev, 2010). Estos estudios respaldan la viabilidad técnica de incorporar este tipo de adiciones en mezclas destinadas a mejorar el desempeño estructural a largo plazo.

#### **1.3.5 Enfoque del presente estudio**

En el presente estudio se evaluará la inclusión controlada de sílice de tamaño reducido en mezclas de cemento Portland, mediante la realización de ensayos normalizados que permitan comparar su desempeño con mezclas convencionales, tales como el ensayo de resistencia a compresión conforme a la ASTM C39 (ASTM, 2022). El análisis se orienta a determinar cómo esta adición mineral puede optimizar la resistencia y la durabilidad del hormigón bajo condiciones locales, considerando que investigaciones

previas han evidenciado mejoras significativas en estos parámetros mediante el uso de sílice de tamaño reducido (Li et al., 2004; Sanchez & Sobolev, 2010). De esta manera, el estudio busca aportar conocimiento técnico y experimental a la comunidad académica y profesional de la ingeniería civil en Ecuador, contribuyendo a la generación de información local que respalde futuras aplicaciones prácticas.

## 1.4 Objetivos:

### 1.4.1 Objetivo general

Analizar la factibilidad técnica de la incorporación de sílice como sustituto de un porcentaje del cemento para la elaboración de hormigones, con el propósito de evaluar sus propiedades mecánicas y su durabilidad

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información sobre el uso de sílice en tamaño reducido en la construcción y proponer un proceso previo para el tratamiento de la materia prima.
- Comparar propiedades mecánicas de hormigones que contienen sílice como adición del cemento con un hormigón tradicional.
- Comparar la durabilidad de hormigones que contienen sílice de tamaño reducido como adición del cemento con un hormigón tradicional.

## 1.5 Metodología:

*Table 1: Objetivos y Actividades*

Objetivos	Actividades
<b>Objetivo general:</b> Analizar la factibilidad técnica de la incorporación de sílice como sustituto parcial del cemento para evaluar sus propiedades mecánicas y su durabilidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revisión bibliográfica.</li> <li>• Elaboración de mezclas experimentales con y sin sílice.</li> <li>• Ensayos mecánicos y de durabilidad.</li> <li>• Análisis y comparación de resultados.</li> </ul>

Recopilar información sobre el uso de sílice y proponer un proceso previo de tratamiento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Investigación documental sobre el sílice y sus métodos de obtención.</li> <li>• Definición del tratamiento previo del material.</li> </ul>
Comparar propiedades mecánicas de hormigones con sílice de tamaño reducido y hormigones tradicionales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elaboración de probetas y realización de ensayos de resistencia.</li> <li>• Análisis comparativo de resultados.</li> </ul>
Comparar la durabilidad de hormigones con sílice de tamaño reducido y hormigones tradicionales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ensayos de durabilidad (absorción, permeabilidad, ataque químico).</li> <li>• Evaluación comparativa de resultados.</li> </ul>

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo I*

La presente investigación se desarrollará bajo un enfoque experimental, analítico y comparativo, con el propósito de analizar la factibilidad técnica de la incorporación de sílice de tamaño reducido como sustituto parcial del cemento Portland en la elaboración de hormigones. El estudio se orienta a evaluar la influencia de esta adición mineral sobre las propiedades mecánicas y la porosidad del material, en comparación con un hormigón convencional.

En una primera etapa, se realizará una revisión bibliográfica sistemática de investigaciones nacionales e internacionales relacionadas con el uso de sílice de tamaño reducido en materiales cementicios, siguiendo criterios metodológicos comúnmente empleados en investigaciones técnicas (Sanchez & Sobolev, 2010). Esta revisión permitirá establecer los fundamentos teóricos del estudio, identificar rangos de dosificación comúnmente utilizados y definir criterios técnicos para el diseño experimental. Asimismo, se analizarán antecedentes normativos y metodologías empleadas en investigaciones similares.

Con base en la información recopilada, se definirá un proceso de tratamiento previo de la sílice, orientado a garantizar su adecuada dispersión dentro de la matriz cementicia y evitar la formación de aglomeraciones, considerando que la correcta dispersión influye directamente en el desempeño mecánico del material (Li et al., 2004). Este tratamiento se establecerá tomando en cuenta las condiciones reales de laboratorio y los recursos disponibles.

Posteriormente, se desarrollará la fase experimental, en la cual se elaborarán mezclas de hormigón con distintos porcentajes de sustitución parcial de cemento por sílice de tamaño reducido, además de una mezcla patrón sin adición, que servirá como referencia para el análisis comparativo. Las dosificaciones se definirán manteniendo constantes variables como la relación agua/cemento, tipo de agregado y condiciones de mezclado, con el fin de aislar el efecto de la sílice sobre el comportamiento del material (Neville, 2011).

Para cada dosificación se fabricarán probetas cilíndricas, las cuales serán sometidas a un proceso de curado controlado y ensayadas a las edades establecidas. Las propiedades mecánicas del hormigón se determinarán mediante ensayos de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta, aplicados conforme a los procedimientos establecidos en las normas ASTM C39 y ASTM C496 (ASTM, 2022; ASTM, 2022a), así como las disposiciones técnicas correspondientes del sistema INEN. De manera complementaria, se evaluará la porosidad del material, como indicador de su durabilidad y desempeño a largo plazo (Mehta & Monteiro, 2014).

Los ensayos se realizarán utilizando los equipos disponibles en el laboratorio, tales como mezcladora de laboratorio, moldes cilíndricos, máquina universal de ensayos y balanza digital, garantizando la correcta ejecución de cada procedimiento y la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Finalmente, se llevará a cabo un análisis comparativo y estadístico básico de los resultados, con el objetivo de identificar tendencias, variaciones y posibles mejoras atribuibles a la incorporación de sílice de tamaño reducido. A partir de este análisis, se establecerán conclusiones sobre la viabilidad técnica de su aplicación en hormigones estructurales, considerando su potencial uso en el contexto de la construcción en Ecuador.

*Table 2: Porcentajes, Edades de Ruptura y Ensayos a realizar.*

<b>Porcentaje de Sílice</b>	<b>Edades de Ruptura</b>	<b>Ensayos</b>
1%	7 días	Resistencia a la Compresión
3%	14 días	Porosidad
5%	28 días	Resistencia a la Tracción

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo*

## **2. Capítulo I: Revisión bibliográfica y fundamentos teóricos**

El presente capítulo tiene como finalidad establecer los fundamentos teóricos y conceptuales que sustentan la investigación. En él se analizan las propiedades y el comportamiento del cemento y del hormigón, así como los principales mecanismos que influyen en su resistencia y durabilidad, aspectos ampliamente desarrollados en la literatura técnica especializada (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014). Además, se revisa el uso de materiales de tamaño reducido aplicados a los materiales de construcción, con énfasis en los efectos de la sílice de tamaño reducido en la matriz cementicia y su influencia en la microestructura del hormigón (Li et al., 2004; Sanchez & Sobolev, 2010).

Esta revisión bibliográfica permite comprender la base científica del estudio y justifica la metodología experimental propuesta en los capítulos posteriores, estableciendo un vínculo entre los antecedentes teóricos y el diseño experimental planteado.

### **2.1 Propiedades y comportamiento del cemento y del hormigón**

El estudio del comportamiento del cemento y del hormigón constituye uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de estructuras más resistentes y duraderas. El hormigón, como material ampliamente utilizado en la ingeniería civil, depende en gran medida de los procesos físico-químicos que ocurren durante la hidratación del cemento Portland, los cuales determinan tanto su desempeño mecánico como su durabilidad frente a diversos agentes de deterioro (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

El cemento Portland está compuesto principalmente por cuatro fases minerales del clinker: silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ). Cada una de estas fases interviene de manera

específica en el proceso de hidratación. El silicato tricálcico proporciona resistencia temprana debido a su rápida reacción con el agua, mientras que el silicato dicálcico contribuye al desarrollo de resistencia en edades más avanzadas. Los aluminatos reaccionan rápidamente y requieren la adición de yeso para controlar el fraguado, mientras que el ferroaluminato tetracálcico participa de forma secundaria en la resistencia final y facilita el proceso de fabricación del clinker (Taylor, 1997; Mehta & Monteiro, 2014).

Durante la hidratación del cemento se generan dos productos principales: el silicato de calcio hidratado (C-S-H) y el hidróxido de calcio o portlandita. El C-S-H constituye la fase más importante desde el punto de vista estructural, ya que conforma una red cohesiva responsable de la resistencia mecánica del hormigón. La portlandita, aunque mantiene el ambiente alcalino necesario para la protección del acero de refuerzo, es una fase menos estable y de menor aporte mecánico, por lo que su presencia excesiva puede afectar la durabilidad del material (Taylor, 1997; Neville, 2011).

La resistencia del hormigón está estrechamente relacionada con la relación agua/cemento. Relaciones elevadas generan un mayor volumen de poros capilares, reduciendo la densidad y facilitando la permeabilidad, mientras que relaciones bajas producen mezclas más compactas, siempre que se mantenga una adecuada trabajabilidad. La Ley de Abrams establece la relación inversa entre la relación agua/cemento y la resistencia final del hormigón, aunque factores como el tipo de cemento, la granulometría de los agregados, el curado y el grado de compactación también influyen significativamente en el desempeño final (Abrams, 1918; Neville, 2011).

El sistema poroso del hormigón es determinante en su durabilidad. Los poros capilares permiten la penetración de agentes agresivos como cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y agua, favoreciendo mecanismos de deterioro como la carbonatación, el ataque por sulfatos y la corrosión del acero. Además, la zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados suele presentar mayor porosidad y concentración de portlandita, convirtiéndose en el punto más vulnerable a la formación de microfisuras (Mehta & Monteiro, 2014; Neville, 2011).

## **2.2 Materiales de tamaño reducido aplicados a los materiales de construcción**

En los últimos años, la incorporación de materiales de tamaño de partícula reducido ha cobrado importancia en el ámbito de los materiales de construcción, debido a su capacidad para modificar la microestructura del hormigón y mejorar su comportamiento mecánico y su durabilidad. La reducción del tamaño de partícula incrementa de manera significativa el área superficial específica, aumentando la reactividad y la interacción con los productos de hidratación del cemento (Sanchez & Sobolev, 2010; Li et al., 2004).

Estos materiales actúan tanto desde el punto de vista físico como químico. Físicamente, pueden ocupar espacios entre los granos de cemento y los poros capilares, reduciendo la porosidad y densificando la matriz mediante un efecto de relleno (filler effect). Químicamente, su elevada reactividad favorece la formación de productos cementantes adicionales, contribuyendo a una microestructura más compacta y homogénea, especialmente a través de reacciones puzolánicas que consumen hidróxido de calcio y generan más C-S-H (Mehta & Monteiro, 2014; Sanchez & Sobolev, 2010).

La aplicación de materiales de tamaño reducido permite superar algunas limitaciones del hormigón convencional, especialmente aquellas relacionadas con la permeabilidad y la durabilidad. Sin embargo, su empleo requiere un control riguroso de la dosificación y de los métodos de incorporación, ya que una dispersión inadecuada puede generar aglomeraciones que afecten negativamente el desempeño del material, reduciendo los beneficios esperados (Li et al., 2004).

## **2.3 Efectos de la sílice de tamaño reducido en la matriz cementicia**

La sílice de tamaño reducido se ha consolidado como una de las adiciones minerales más eficaces para mejorar el desempeño del hormigón. Su elevada área superficial específica y su alta reactividad química le permiten interactuar de forma eficiente con la matriz cementicia, generando modificaciones significativas en la microestructura y en las propiedades del material (Sanchez & Sobolev, 2010; Li et al., 2004).

Uno de los principales mecanismos de acción de la sílice de tamaño reducido es su efecto de relleno. Debido a su pequeño tamaño de partícula, la sílice puede ocupar espacios entre los granos de cemento y dentro de los poros capilares, reduciendo la porosidad total y la conectividad de la red porosa. Este efecto contribuye directamente a una mayor densidad del hormigón y a una disminución de la permeabilidad (Mehta & Monteiro, 2014; Sanchez & Sobolev, 2010).

Adicionalmente, la sílice de tamaño reducido actúa como centro de nucleación durante las primeras etapas de la hidratación del cemento. Su presencia acelera la formación del gel C-S-H, favoreciendo una ganancia más rápida de resistencia y una distribución más uniforme de los productos de hidratación. Este mecanismo resulta especialmente relevante en edades tempranas, donde se observan mejoras significativas en la resistencia mecánica (Li et al., 2004).

Desde el punto de vista químico, la sílice participa activamente en la reacción puzolánica, reaccionando con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento para formar C-S-H adicional. Este proceso reduce la cantidad de portlandita, considerada una fase menos resistente y susceptible a procesos de deterioro, y aumenta la proporción de productos cementantes estables, mejorando la durabilidad del material (Taylor, 1997; Mehta & Monteiro, 2014).

La modificación de la microestructura tiene un impacto directo en la zona de transición interfacial entre la pasta de cemento y los agregados. La sílice de tamaño reducido puede penetrar en esta región, reduciendo la porosidad y mejorando la adherencia entre los componentes, lo que contribuye a un comportamiento mecánico más uniforme y a una mayor resistencia a la formación de microfisuras (Sanchez & Sobolev, 2010).

Las mejoras microestructurales se reflejan en incrementos notables en las propiedades mecánicas del hormigón. Diversos estudios reportan aumentos en la resistencia a compresión del orden del 15 % al 30 %, así como mejoras en la resistencia a tracción, cuando se emplean dosificaciones controladas de sílice de tamaño reducido (Li et al., 2004; Sanchez & Sobolev, 2010). Asimismo, la reducción de la permeabilidad limita la penetración de agentes agresivos, extendiendo la vida útil de las estructuras, especialmente en ambientes severos (Mehta & Monteiro, 2014).

No obstante, la aplicación de sílice de tamaño reducido presenta ciertos desafíos. Su elevada área superficial puede provocar aglomeraciones y aumentar la demanda de agua si no se controla adecuadamente su dosificación y dispersión. Por ello, los mejores resultados suelen obtenerse con contenidos comprendidos entre el 1 % y el 3 % en peso de cemento, rango que permite maximizar los beneficios técnicos sin comprometer la trabajabilidad ni la viabilidad económica (Sanchez & Sobolev, 2010).

En conjunto, la incorporación de sílice de tamaño reducido representa una alternativa eficaz para optimizar el hormigón moderno, permitiendo superar varias de las limitaciones del material convencional y contribuyendo al desarrollo de estructuras más resistentes, duraderas y sostenibles, especialmente en contextos donde la durabilidad y el desempeño a largo plazo son factores críticos.

## **3. Capítulo II: Metodología experimental**

### **3.1 Introducción**

El presente capítulo describe la metodología experimental propuesta para evaluar la influencia de la sílice de tamaño reducido en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Dado que los ensayos experimentales aún no han sido ejecutados, esta sección establece de manera detallada los criterios, procedimientos, materiales, equipos y normas técnicas que regirán la fase experimental, permitiendo avanzar en el desarrollo de la investigación y garantizando la reproducibilidad de los resultados.

### **3.2 Selección y caracterización de materiales**

#### **3.2.1 Cemento**

Se utilizará cemento Portland de uso general, conforme a las normas técnicas vigentes, seleccionado por su amplia aplicación en la construcción y su comportamiento bien documentado. Previamente a la elaboración de las mezclas, el cemento será

caracterizado a partir de información proporcionada por el fabricante, considerando propiedades como resistencia mecánica, finura y tiempo de fraguado.

### 3.2.2 Agregados

Los agregados finos y gruesos empleados en la investigación corresponderán a materiales naturales, limpios y libres de impurezas orgánicas. Su selección se realizará de acuerdo con las recomendaciones normativas, considerando granulometría adecuada, forma, textura superficial y absorción. Estas características influyen directamente en la trabajabilidad y el desempeño mecánico del hormigón endurecido.

Se realizó el análisis granulométrico (Anexo1) conforme a la norma ASTM C136, obteniéndose los siguientes resultados:

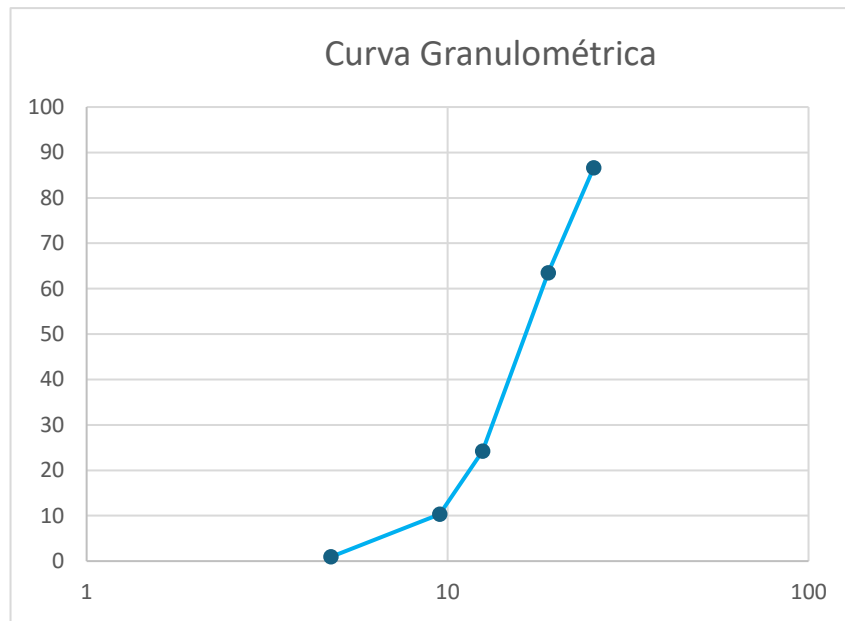
Para el agregado grueso (grava natural), se determinó un tamaño máximo (TM) de 1/2" y un tamaño máximo nominal (TMN) de 1 1/2". El material presentó perfil redondeado y un módulo de finura (MF) de 7.26. La distribución granulométrica mostró que el mayor porcentaje retenido se presentó en el tamiz de 1/2" (39.323%), seguido del tamiz 3/4" (23.127%), evidenciando una gradación adecuada para su uso en hormigón estructural.

Table 3: Granulometría Agregado Grueso

Malla	Abertura(mm)	Retenido	%Retenido	%Retenido Acumulado	%Pasa
1 1/2	37.5	74.6	1.492	1.492	98.508
1	25.4	594.17	11.8834	13.3754	86.6246
3/4	19	1156.38	23.1276	36.503	63.497
1/2	12.50	1966.19	39.3238	75.8268	24.1732
3/8	9.50	693.06	13.8612	89.688	10.312
4	4.75	469.04	9.3808	99.0688	0.9312
Fondo	0	46.56	0.9312	100	0
Total=		5000	100		

Fuente: Elaboración propia. Capítulo II

Figure 1: Curva de Distribución Granulométrica Agregado Grueso



Fuente: Elaboración propia. Capítulo II

Para el agregado fino (arena natural), el módulo de finura obtenido fue de 2.71, valor que se encuentra dentro del rango típico para arenas utilizadas en hormigón. El análisis granulométrico indicó una distribución progresiva del material, con mayor porcentaje retenido en el tamiz No. 50 (31.800%) y No. 30 (27.400%), cumpliendo con los límites establecidos por la norma ASTM C136.

Table 4: Limite Superior e Inferior Agregado Fino

Tamiz	Apertura(mm)	%Lím. Inferior	%Lím. Superior
3/8	9.5	100	100
4	4.75	95	100
8	2.36	80	100
16	1.18	50	85
30	0.6	25	60
50	0.3	5	30
100	0.15	0	10

Fuente: Elaboración propia. Capítulo II

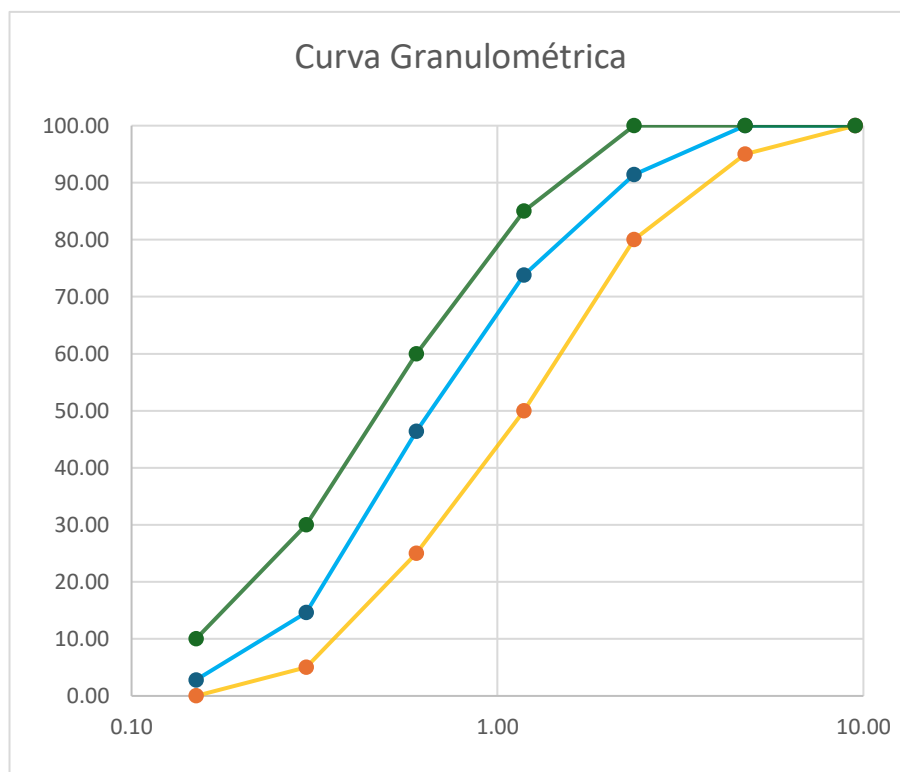
Table 5: Granulometría Agregado Fino

Malla	Abertura(mm)	Retenido	%Retenido	%Retenido Acumulado	%Pasa
3/8	9.50	0	0.0000	0.00	100.00
4	4.75	0	0.0000	0.00	100.00
8	2.36	43	8.6000	8.60	91.40

16	1.18	88	17.6000	26.20	73.80
30	0.6	137	27.4000	53.60	46.40
50	0.3	159	31.8000	85.40	14.60
100	0.15	59	11.8000	97.20	2.80
200	0.075	12	2.4000	99.60	0.40
Fondo		2	0.4000	100	0.00
Total=		500	100		

Fuente: Elaboración propia. Capítulo II

Figure 2: Curva de Distribución Granulométrica Agregado Fino



Fuente: Elaboración propia. Capítulo II

Las curvas granulométricas obtenidas evidencian que ambos agregados se encuentran dentro de los límites normativos, garantizando una adecuada trabajabilidad en estado fresco y un buen desempeño mecánico en estado endurecido.

Table 6: Propiedades de los Agregados

Propiedad	Grava Natural	Arena Natural
-----------	---------------	---------------

Norma aplicada	ASTM C136	ASTM C136
Tamaño Máximo (TM)	1/2"	—
Tamaño Máximo Nominal (TMN)	1 1/2"	Tamiz No. 4
Módulo de Finura (MF)	7.27	2.71
Perfil	Redondeada	—

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo II*

Además del análisis granulométrico, se realizaron ensayos para determinar el peso específico y el peso volumétrico (Anexo 2) de los agregados fino y grueso. Estos ensayos permiten conocer las propiedades físicas de los materiales y son fundamentales para el proceso de dosificación del hormigón, ya que proporcionan información necesaria para calcular correctamente las proporciones de cada componente en la mezcla. A partir de estos resultados se obtuvo una caracterización más precisa de los agregados utilizados, lo que permitió establecer de manera adecuada las cantidades de materiales requeridas en el diseño de la mezcla.

### **3.2.3 Agua de mezclado**

El agua utilizada para la elaboración de las mezclas será potable, cumpliendo con los requisitos normativos para su uso en hormigón, de modo que no interfiera negativamente en los procesos de hidratación del cemento ni en el desarrollo de las propiedades mecánicas.

### **3.2.4 Sílice de tamaño reducido**

La sílice de tamaño reducido será incorporada como material adicional al cemento, en diferentes porcentajes de reemplazo parcial. Este material se selecciona por su elevada finura y su potencial efecto sobre la microestructura de la matriz cementicia, principalmente en términos de densificación, reducción de porosidad y mejora del comportamiento mecánico del hormigón.

Con el fin de garantizar una granulometría suficientemente fina que permita una adecuada dispersión dentro de la pasta de cemento, el material fue previamente

sometido a un proceso de tamizado, asegurando que la sílice utilizada pase completamente por el tamiz N.º 200 (0,075 mm). La obtención de partículas de tamaño reducido incrementa significativamente el área superficial específica del material, favoreciendo su interacción con los productos de hidratación del cemento y permitiendo que actúe tanto como relleno microestructural como agente que contribuye a mejorar la compactación interna de la matriz cementicia. Este control del tamaño de partícula resulta fundamental para potenciar los efectos beneficiosos de la sílice en el comportamiento del hormigón.

### **3.3 Dosificación y preparación de las mezclas de hormigón**

La dosificación de las mezclas se definió tomando como referencia un hormigón patrón sin adición de sílice de tamaño reducido, el cual permitió establecer una comparación directa con las mezclas modificadas. A partir de esta mezcla base, se elaboraron diferentes dosificaciones incorporando porcentajes variables de sílice de tamaño reducido.

El proceso de preparación de las mezclas se realizó en una mezcladora de laboratorio, siguiendo una secuencia controlada de incorporación de materiales: agregados, cemento, sílice de tamaño reducido y agua. El mezclado se efectúa hasta obtener una masa homogénea, garantizando una adecuada distribución de todos los componentes.

Para determinar la dosificación del hormigón base se empleó el método ACI 211.1, el cual establece un procedimiento sistemático para el diseño de mezclas de hormigón normal en función de la resistencia requerida, la trabajabilidad y las características de los materiales disponibles. Este método permite determinar las proporciones adecuadas de agua, cemento, agregado fino y agregado grueso mediante el uso del método de volúmenes absolutos.

Previo al diseño de la mezcla, fue necesario realizar la caracterización de los agregados, con el fin de obtener parámetros fundamentales para el cálculo de la dosificación. En primer lugar, se realizó el ensayo granulométrico de los agregados fino y grueso, el cual permitió determinar la distribución del tamaño de partículas presentes en los materiales. Este ensayo es fundamental para verificar que los agregados cumplan con los rangos establecidos por la normativa y para garantizar una

adecuada gradación que favorezca la compacidad del hormigón y reduzca el contenido de vacíos.

Adicionalmente, se determinaron los pesos específicos de los agregados, propiedad que representa la relación entre la masa del material y su volumen absoluto. Este parámetro es necesario para aplicar el método de volúmenes absolutos del ACI 211.1, ya que permite transformar los volúmenes de cada componente en las masas correspondientes utilizadas en la dosificación.

De igual manera, se realizaron ensayos para obtener los pesos volumétricos de los agregados, tanto sueltos como compactados. El peso volumétrico compactado del agregado grueso es utilizado en el método ACI para estimar el volumen de agregado grueso dentro de la mezcla, considerando el tamaño máximo nominal del agregado y las características granulométricas del agregado fino.

Una vez obtenidas estas propiedades físicas de los materiales, se procedió a realizar el diseño de la mezcla de hormigón mediante el método ACI 211.1. Se seleccionó el asentamiento de diseño, adoptándose un valor de 7.5 cm, correspondiente a una mezcla de consistencia baja o muy seca, de acuerdo con las recomendaciones del ACI para hormigones estructurales.

En primer lugar se seleccionó el tamaño máximo nominal del agregado grueso, el cual se estableció en 1 1/2 pulgada, cumpliendo con las recomendaciones del ACI 211.1 en relación con las dimensiones de los elementos estructurales y el espaciamiento del refuerzo.

A partir de este parámetro se determinó el contenido de agua de mezclado, adoptándose un valor de 188 kg/m<sup>3</sup>, de acuerdo con las recomendaciones del método ACI para el asentamiento seleccionado y el tamaño máximo del agregado.

La resistencia de diseño del hormigón se estableció en 210 kg/cm<sup>2</sup>, valor correspondiente al hormigón patrón utilizado en la investigación. En función de esta resistencia se seleccionó una relación agua-cemento de 0.58, conforme a las recomendaciones del método ACI para alcanzar la resistencia especificada bajo condiciones normales de producción y curado.

Con base en la relación agua-cemento seleccionada y el contenido de agua previamente determinado, se calculó el contenido de cemento, obteniéndose un valor de 324.14 kg/m<sup>3</sup>.

Posteriormente se determinó el volumen de agregado grueso, obteniéndose un valor de 0.4324 m<sup>3</sup> por metro cúbico de hormigón, lo cual corresponde a una masa de 1000 kg de agregado grueso, ya realizado el ajuste por humedad del agregado, con el fin de obtener las cantidades reales que deben incorporarse en la mezcla.

Mediante el método de volúmenes absolutos, se calculó el volumen correspondiente al agregado fino, obteniéndose un valor aproximado de 0.275 m<sup>3</sup>, equivalente a 821.5220 kg de arena en condición seca, ya realizado el ajuste por humedad del agregado, con el fin de obtener las cantidades reales que deben incorporarse en la mezcla.

Asimismo, se determinó el aporte de agua proveniente de la humedad de los agregados, el cual corresponde a 9.1754 kg para el agregado grueso y -29.7883 kg para el agregado fino, obteniéndose un ajuste total de -20.6129 kg de agua.

Considerando este ajuste, la cantidad final de agua efectiva en la mezcla corresponde a 167.3870 kg/m<sup>3</sup>.

De esta manera, las proporciones finales del hormigón patrón por metro cúbico fueron las siguientes:

*Table 7: Dosificación por metro cúbico de hormigón*

Agua	167.38 70 kg
Cemento	324.1400 kg
Agregado grueso:	1000.0000 kg
Agregado fino:	821.5220 kg

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo II*

Estas proporciones constituyen la base para la preparación del hormigón utilizado en la investigación.

Posteriormente, con el fin de elaborar las probetas para los ensayos experimentales, se realizó la conversión de las proporciones correspondientes a 1 m<sup>3</sup> de hormigón al volumen requerido para la fabricación de los cilindros de ensayo. En el presente

estudio se emplearon cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, cuyo volumen aproximado es de 1570.8 cm<sup>3</sup>. Considerando un incremento del 10 % para pérdidas durante el proceso de mezclado, se trabajó con un volumen de 1727.88 cm<sup>3</sup> por cilindro.

Para la elaboración de tres cilindros de ensayo, se determinó un volumen total de mezcla requerido de 0.00172788 m<sup>3</sup>. Con base en este volumen se calcularon las cantidades necesarias de cada material, obteniéndose aproximadamente:

*Table 8: Dosificación por cilindro de hormigón*

Agua	0.289 kg (289.22 g)
Cemento	0.56 kg (560.07 g)
Agregado grueso	1.727 kg
Agregado fino	1.419 kg

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo II*

Estas cantidades fueron utilizadas para la preparación de las mezclas experimentales correspondientes a las probetas de ensayo.

### **3.4 Elaboración y curado de las probetas**

Para la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón se elaborarán probetas cilíndricas normalizadas de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro (Anexo 3), las cuales serán utilizadas en los ensayos de compresión y tracción. Este tipo de espécimen es ampliamente empleado en investigaciones y ensayos de laboratorio debido a que permite obtener resultados confiables y comparables sobre la resistencia del material, garantizando una adecuada distribución de esfuerzos durante la aplicación de las cargas.

Por otra parte, para el análisis de la porosidad del hormigón se elaborarán especímenes en forma de cubos con arista de 5 cm. El uso de probetas cúbicas de menor tamaño facilita la manipulación durante los procedimientos experimentales y permite una mejor evaluación de la absorción y de la presencia de vacíos dentro

de la matriz cementicia. Asimismo, estas dimensiones favorecen un control más preciso de la masa, el volumen y las variaciones asociadas a la presencia de poros, lo cual resulta fundamental para analizar cómo la incorporación de sílice de tamaño reducido influye en la densificación de la microestructura y en la reducción de la porosidad del material.

### **3.5 Procedimientos de ensayo**

Los ensayos considerados en la presente investigación se limitan a los siguientes:

#### **3.5.1 Ensayo de porosidad**

El ensayo de porosidad permitirá evaluar la influencia de la sílice de tamaño reducido en la estructura interna del hormigón endurecido. A partir de este ensayo se obtendrá información relacionada con la cantidad y distribución de vacíos, aspecto fundamental para comprender el comportamiento mecánico y la durabilidad del material.

Para este análisis, las probetas se elaborarán sin la incorporación de agregado grueso (Anexo 4), empleando únicamente cemento, arena y agua, con el objetivo de obtener una matriz más homogénea que permita analizar de manera más directa el efecto de la sílice de tamaño reducido sobre la microestructura del material. La ausencia de agregado grueso reduce la heterogeneidad propia del hormigón convencional y facilita la evaluación de los poros presentes en la pasta y en la zona de contacto con el agregado fino. De esta manera, es posible identificar con mayor claridad la influencia de la sílice en la densificación de la matriz cementicia, la reducción de vacíos capilares y el comportamiento del material frente a la absorción de agua, aspectos estrechamente relacionados con la porosidad y la durabilidad del material.

#### **3.5.2 Ensayo de resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión se determinará utilizando una máquina universal de ensayos hidráulica, adecuada para la aplicación controlada de cargas en probetas cilíndricas de hormigón. Este ensayo permitirá cuantificar la capacidad portante del

material y analizar la variación de la resistencia en función del contenido de sílice de tamaño reducido.

### **3.5.3 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta**

La resistencia a la tracción indirecta se evaluará mediante el método brasileño, empleando igualmente la máquina universal de ensayos hidráulica. Este ensayo es representativo del comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de tracción y complementa la información obtenida a partir del ensayo de compresión.

### **3.6 Equipos de laboratorio**

Para el desarrollo de la fase experimental se contará con los siguientes equipos:

Mezcladora de laboratorio para la preparación de las mezclas de hormigón.

Moldes cilíndricos normalizados.

Moldes cúbicos con arista de 5 cm

Balanza digital para el control de masas de los materiales.

Máquina universal de ensayos hidráulica, apta para ensayos de compresión y tracción indirecta en probetas cilíndricas de hormigón.

### **3.7 Normas técnicas aplicadas**

Los procedimientos experimentales se regirán por normas técnicas nacionales e internacionales aplicables al diseño, elaboración y ensayo de hormigón, garantizando la confiabilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos.

### **3.8 Consideraciones finales de la metodología**

La metodología propuesta permite evaluar de forma sistemática el efecto de la sílice de tamaño reducido en las propiedades del hormigón, asegurando coherencia entre los objetivos de la investigación, los ensayos seleccionados y el equipamiento disponible.

Esta estructura metodológica servirá como base sólida para la posterior ejecución experimental y el análisis de resultados.

## 4. Capítulo III: Análisis y Discusión de Resultados

### 4.1 Resultados a los 7 días

#### 4.1.1 Resistencia a la compresión

A los 7 días de curado, la resistencia a la compresión del hormigón evidencia que la mezcla patrón presenta el mayor valor en comparación con las mezclas modificadas con sílice de tamaño reducido. A medida que aumenta el porcentaje de incorporación de sílice, se observa una tendencia general a la disminución de la resistencia, siendo más notable en las dosificaciones intermedias.

Este comportamiento puede explicarse considerando que, en edades tempranas, la hidratación del cemento Portland es el mecanismo predominante en el desarrollo de la resistencia. En este contexto, la sílice aún no ha reaccionado significativamente, ya que la reacción puzolánica es más lenta y depende de la disponibilidad de hidróxido de calcio generado durante la hidratación. Por esta razón, su contribución a la resistencia en etapas iniciales es limitada (Properties of Concrete).

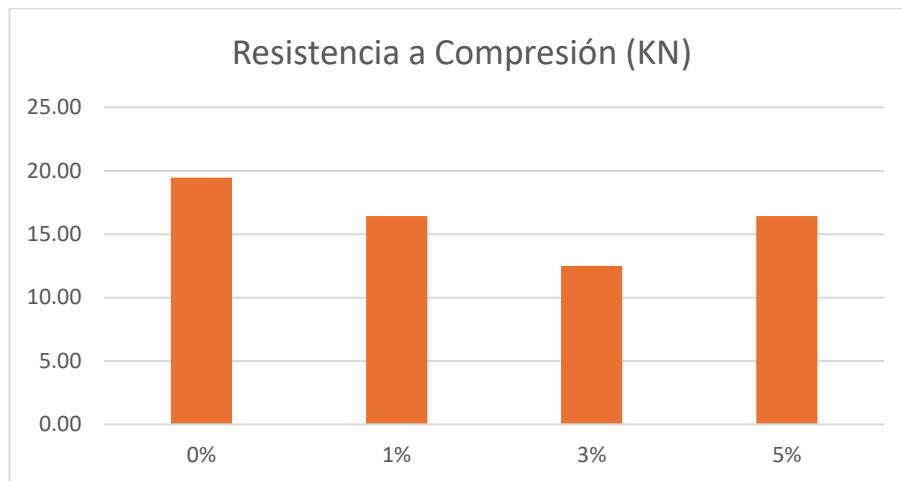
Adicionalmente, la incorporación de sílice puede generar un aumento en la demanda de agua debido a su alta área específica, lo que puede afectar la relación agua/cemento efectiva si no se ajusta adecuadamente la dosificación. Esto puede contribuir a la reducción de la resistencia inicial.

Table 9: Resultados Resistencia a Compresión a los 7 días

Ensayo a los 7 días	% de Sílice	Resistencia a Compresión
		KN
	0%	19.47
	1%	16.43
	3%	12.50
	5%	16.43

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 3: Gráfica Resistencia a Compresión a los 7 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

#### 4.1.2 Resistencia a la tracción

En contraste con la resistencia a la compresión, la resistencia a tracción a los 7 días presenta un comportamiento favorable en las mezclas con sílice. Se observa que las dosificaciones con incorporación de sílice alcanzan valores superiores al hormigón patrón, destacándose especialmente aquellas con menor contenido de adición.

Este incremento puede atribuirse a una mejora en la zona de transición interfacial (ITZ) entre la pasta cementante y los agregados, la cual es considerada una de las regiones más débiles del hormigón (Concrete Technology). La sílice de tamaño reducido actúa como material de relleno, reduciendo la porosidad en esta zona crítica y favoreciendo una mejor transferencia de esfuerzos.

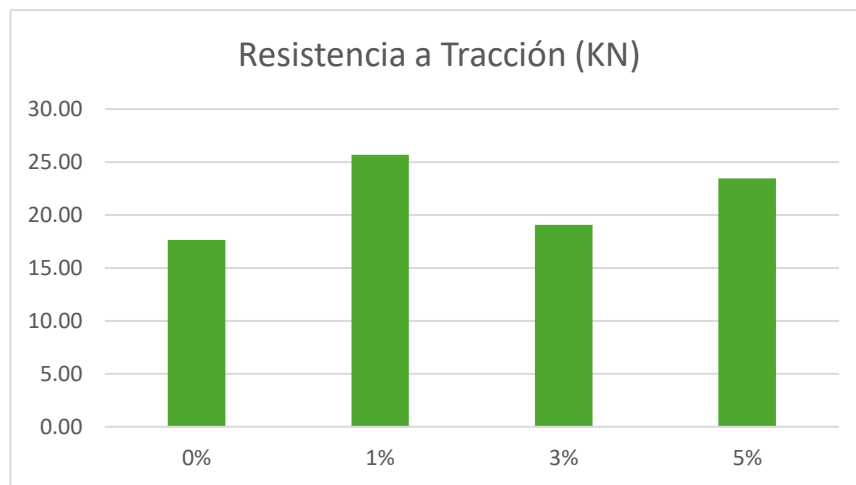
Asimismo, la presencia de partículas finas contribuye a una distribución más homogénea de tensiones dentro de la matriz, lo que retrasa la propagación de microfisuras, mejorando así el comportamiento a tracción en edades tempranas.

Table 10: Resultados Resistencia a Tracción a los 7 días

Ensayo a los 7 días	% de Sílice	Resistencia a Tracción
		KN
	0%	17.64
	1%	25.68
	3%	19.08
	5%	23.46

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 4: Gráfica Resistencia a Tracción a los 7 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

### 4.1.3 Porosidad efectiva

Los resultados de porosidad efectiva a los 7 días muestran una disminución en todas las mezclas con sílice en comparación con la mezcla patrón, evidenciando un efecto positivo desde edades tempranas.

Este comportamiento se debe principalmente al efecto físico de la sílice, conocido como efecto filler, mediante el cual las partículas finas ocupan los espacios vacíos entre los granos de cemento y agregados, reduciendo la porosidad total y mejorando la compacidad de la matriz (Concrete: Microstructure, Properties, and Materials).

Además, aunque la reacción puzolánica aún es incipiente, puede contribuir parcialmente a la formación de productos de hidratación adicionales que comienzan a

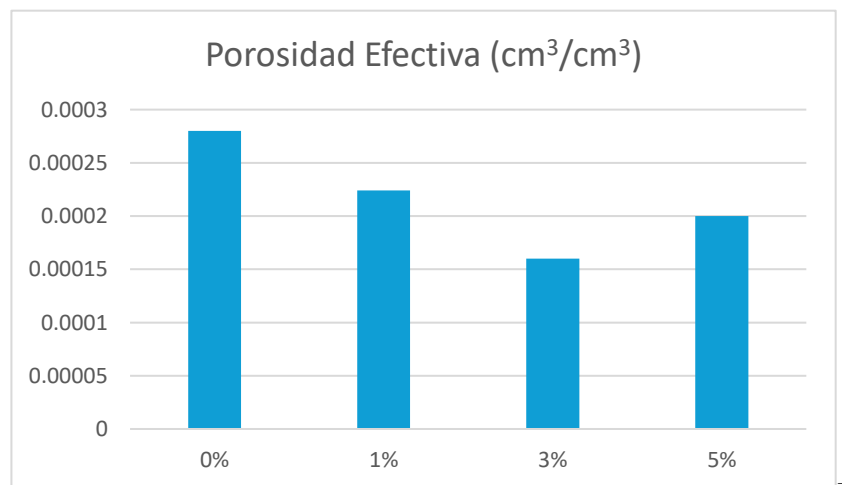
refinar la estructura porosa. La reducción de la porosidad implica una menor permeabilidad del material, lo cual es un indicador directo de mejora en la durabilidad del hormigón.

Table 11: Resultados Porosidad Efectiva a los 7 días

Ensayo a los 7 días	% de Silice	Porosidad Efectiva cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
	0%	0.00028
1%	0.000224	
3%	0.00016	
5%	0.0002	

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 5: Gráfica Porosidad Efectiva a los 7 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

## 4.2 Resultados a los 14 días

### 4.2.1 Resistencia a la compresión

A los 14 días, el comportamiento de la resistencia a la compresión muestra una evolución significativa respecto a los resultados obtenidos a los 7 días. En este caso, las mezclas con incorporación de sílice, particularmente la dosificación del 1%,

presentan un incremento notable en la resistencia en comparación con la mezcla patrón.

Este resultado puede explicarse por el desarrollo progresivo de la reacción puzolánica, en la cual la sílice reacciona con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando gel adicional de silicato de calcio hidratado (C-S-H), el cual es el principal responsable de la resistencia mecánica del hormigón (American Concrete Institute).

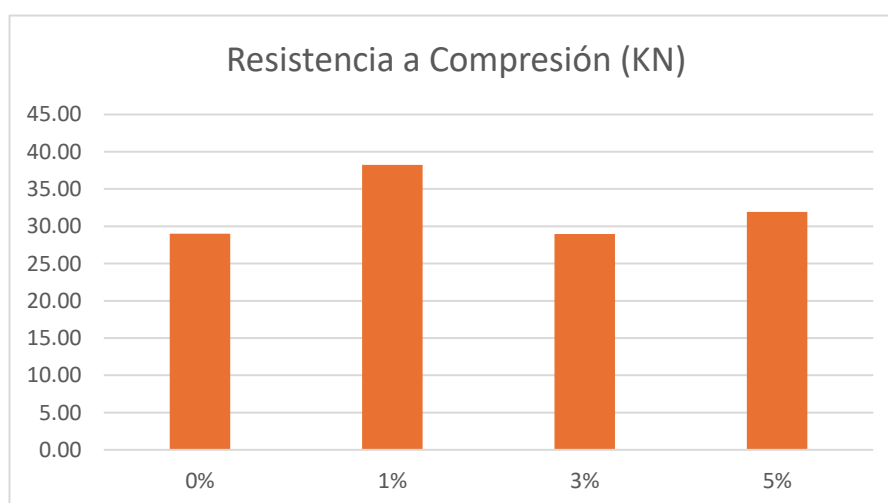
Sin embargo, se observa que al aumentar el porcentaje de sílice más allá de un cierto límite, la ganancia de resistencia no es proporcional, lo que sugiere la existencia de una dosificación óptima. Esto puede deberse a una dilución del contenido de cemento o a una mayor demanda de agua, afectando la relación agua/cemento efectiva.

Table 12: Resultados Resistencia a Compresión a los 14 días

Ensayo a los 14 días	% de Sílice	Resistencia a Compresión KN
	0%	29.00
1%	38.24	
3%	28.94	
5%	31.94	

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 6: Gráfica Resistencia a Compresión a los 14 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

#### 4.2.2 Resistencia a la tracción

La resistencia a tracción a los 14 días presenta un comportamiento menos uniforme en comparación con la compresión. Los resultados muestran variaciones entre las distintas dosificaciones, sin una tendencia claramente definida, destacándose que la mezcla patrón alcanza el valor más alto.

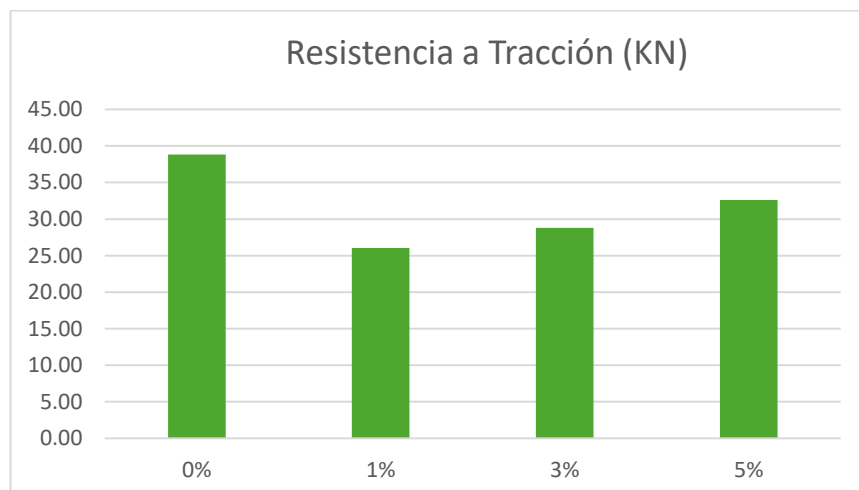
Este comportamiento puede estar asociado a la naturaleza heterogénea del hormigón y a la sensibilidad de este ensayo frente a la presencia de microfisuras internas. Aunque la sílice contribuye a la densificación de la matriz, también puede generar cambios en la rigidez del material, lo que influye en la forma en que se distribuyen y concentran los esfuerzos de tracción.

Por lo tanto, la influencia de la sílice sobre la resistencia a tracción no es tan directa como en el caso de la compresión, y puede depender de múltiples factores asociados a la microestructura del material.

Table 13: Resultados Resistencia a Tracción a los 14 días

Ensayo a los 14 días	% de Sílice	Resistencia a Tracción
		KN
	0%	38.83
	1%	26.02
	3%	28.80
	5%	32.60

Figure 7: Gráfica Resistencia a Tracción a los 14 días



*Fuente: Elaboración propia. Capítulo III*

### 4.2.3 Porosidad efectiva

En cuanto a la porosidad efectiva a los 14 días, se mantiene la tendencia observada a los 7 días, con valores significativamente menores en las mezclas con sílice en comparación con el hormigón convencional.

En esta etapa, además del efecto filler, la reacción puzolánica tiene una mayor participación, generando productos adicionales de hidratación que rellenan los poros capilares y reducen su tamaño y conectividad (American Concrete Institute).

La mayor reducción de la porosidad se observa en dosificaciones intermedias, lo que indica que existe un rango óptimo en el cual la sílice logra maximizar la densificación de la matriz sin afectar negativamente otras propiedades.

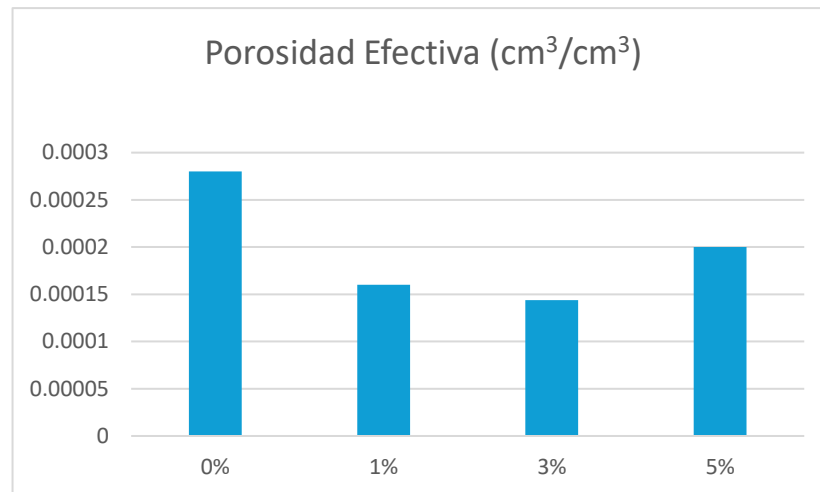
Esta disminución de la porosidad está directamente relacionada con una menor absorción de agua y una mayor resistencia frente a agentes agresivos, lo que se traduce en una mejora significativa de la durabilidad del hormigón.

*Table 14: Gráfica Porosidad Efectiva a los 14 días*

Ensayo a los 14 días	% de Silice	Porosidad Efectiva
		cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
	0%	0.000264
	1%	0.00016
	3%	0.000144
	5%	0.000184

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo III*

Figure 8: Gráfica Porosidad Efectiva a los 14 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

### 4.3 Resultados a los 28 días

#### 4.3.1 Resistencia a la compresión

A los 28 días de curado, la resistencia a la compresión del hormigón permite evaluar de manera más representativa el desempeño mecánico del material, ya que en esta etapa se ha desarrollado la mayor parte de las reacciones de hidratación del cemento y, en el caso de las mezclas modificadas, la reacción puzolánica de la sílice de tamaño reducido.

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla con 1% de sílice alcanza el mayor valor de resistencia, superando tanto a la mezcla patrón como a las demás dosificaciones evaluadas. Este incremento evidencia que, a esta edad, la sílice ha reaccionado de manera significativa con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, generando gel adicional de silicato de calcio hidratado (C-S-H), el cual es el principal responsable del desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón (American Concrete Institute, 2019).

Por otro lado, la mezcla con 3% de sílice presenta una disminución considerable en la resistencia en comparación con el valor máximo alcanzado, lo que indica que un

aumento en el contenido de sílice no necesariamente implica una mejora en las propiedades mecánicas. Este comportamiento puede explicarse por un efecto de dilución del cemento, ya que al incrementar la cantidad de material fino sin ajustar adecuadamente la dosificación, se reduce la proporción efectiva de cemento disponible para la hidratación.

Asimismo, la mezcla con 5% de sílice muestra una recuperación en la resistencia respecto a la dosificación intermedia, aunque sin alcanzar el valor máximo observado. Este comportamiento sugiere que, si bien existe un aporte positivo de la sílice, este no es lineal y depende de una adecuada proporción dentro de la mezcla.

Adicionalmente, la presencia de partículas finas contribuye a mejorar la distribución granulométrica del sistema, lo que favorece una mayor compacidad. Sin embargo, si la cantidad de finos es excesiva, puede aumentar la demanda de agua y afectar la relación agua/cemento efectiva, generando efectos negativos en la resistencia.

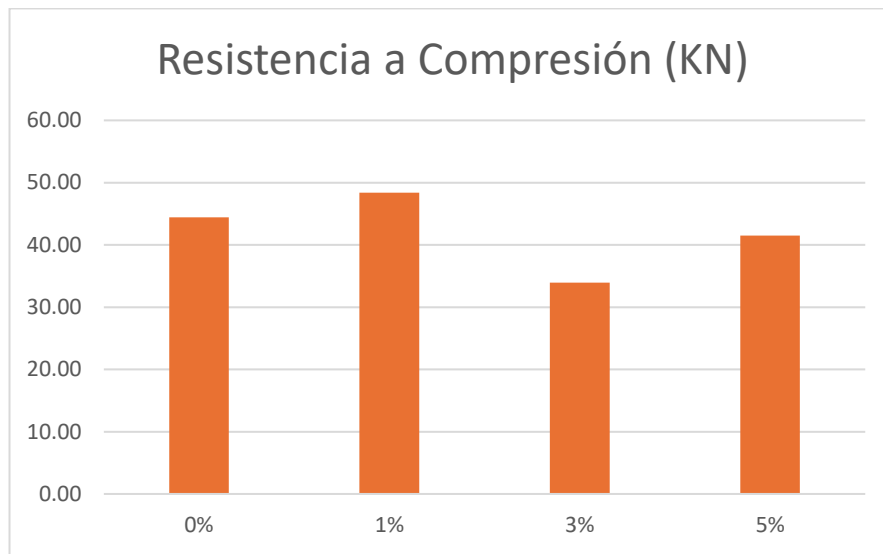
En conjunto, los resultados a los 28 días permiten establecer de manera clara la existencia de una dosificación óptima de sílice, la cual en este estudio se encuentra alrededor del 1%, donde se logra maximizar la resistencia a la compresión sin comprometer la estabilidad de la mezcla.

*Table 15: Resultados Resistencia a Compresión a los 28 días*

Ensayo a los 28 días	% de Sílice	Resistencia a Compresión
		KN
	0%	44.42
	1%	48.40
	3%	33.92
	5%	41.52

*Fuente: Elaboración propia. Capítulo III*

Figure 9: Gráfica Resistencia a Compresión a los 28 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

#### 4.3.2 Resistencia a la tracción

En lo que respecta a la resistencia a tracción a los 28 días, los resultados muestran un comportamiento distinto al observado en la resistencia a la compresión. En este caso, la mezcla patrón presenta el valor más alto, seguida de la dosificación con 1% de sílice, mientras que las mezclas con mayores porcentajes (3% y 5%) presentan una disminución progresiva en esta propiedad.

Este comportamiento indica que la incorporación de sílice no tiene un efecto directamente proporcional en la mejora de la resistencia a tracción, especialmente a edades mayores. A diferencia de la resistencia a la compresión, la tracción está fuertemente influenciada por la presencia de microfisuras y por la capacidad del material para redistribuir tensiones internas.

Aunque la sílice contribuye a densificar la matriz del hormigón, también puede incrementar la rigidez del sistema, lo que reduce su capacidad de deformación antes de la falla. Esto puede favorecer la aparición de concentraciones de esfuerzos y, en consecuencia, una disminución en la resistencia a tracción.

Adicionalmente, la zona de transición interfacial (ITZ), que juega un papel fundamental en el comportamiento a tracción, puede verse modificada por la incorporación de sílice. Si bien esta zona puede volverse más densa, también puede generar cambios en la compatibilidad entre la pasta y los agregados, afectando la transferencia de esfuerzos (Neville, 2011).

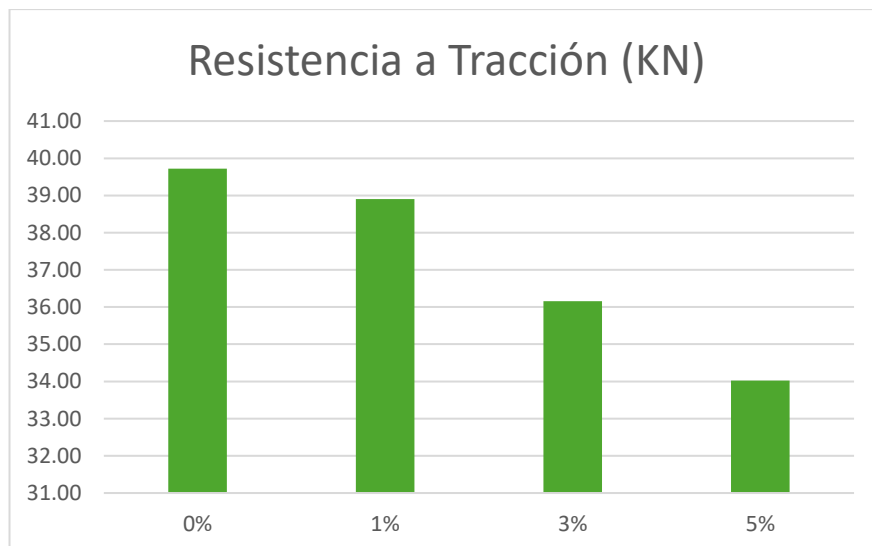
Por lo tanto, se puede concluir que el efecto de la sílice sobre la resistencia a tracción es más complejo y menos predecible que en el caso de la compresión, evidenciando que su uso debe evaluarse principalmente en función de los beneficios en resistencia a compresión y durabilidad.

Table 16: Resultados Resistencia a Tracción a los 28 días

Ensayo a los 28 días	% de Sílice	Resistencia a Tracción
		KN
	0%	39.72
	1%	38.90
	3%	36.16
	5%	34.02

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 10: Gráfica Resistencia a Tracción a los 28 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

### 4.3.3 Porosidad efectiva

La porosidad efectiva a los 28 días presenta uno de los resultados más relevantes del estudio, evidenciando de manera clara el efecto positivo de la incorporación de sílice de tamaño reducido en la durabilidad del hormigón.

Se observa que todas las mezclas con sílice presentan valores inferiores a la mezcla patrón, siendo la dosificación con 3% de sílice la que alcanza el menor nivel de porosidad. Este resultado confirma que la sílice actúa de manera eficiente tanto a nivel físico como químico en la modificación de la microestructura del hormigón.

Desde el punto de vista físico, el efecto filler permite que las partículas finas rellenen los vacíos existentes entre los granos de cemento y agregados, mejorando la compacidad del sistema. Desde el punto de vista químico, la reacción puzolánica genera productos adicionales de hidratación que contribuyen a la reducción del tamaño y la conectividad de los poros capilares (Mehta & Monteiro, 2014).

Asimismo, la reducción de la porosidad implica una disminución en la permeabilidad del material, lo que limita el ingreso de agentes agresivos como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono. Esto se traduce en una mejora significativa en la durabilidad del hormigón, especialmente en condiciones de exposición ambiental adversas.

Cabe destacar que, aunque la dosificación con 5% presenta un ligero incremento respecto al valor mínimo, mantiene valores inferiores al hormigón convencional, lo que indica que, en términos generales, la incorporación de sílice mejora las propiedades de durabilidad.

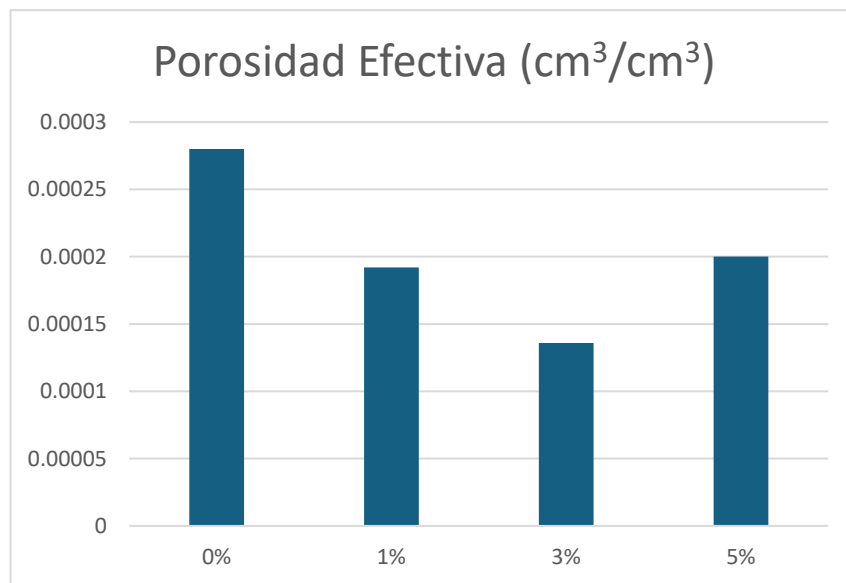
En este sentido, se puede establecer que el porcentaje óptimo de sílice para mejorar la durabilidad se encuentra alrededor del 3%, mientras que para la resistencia a la compresión el valor óptimo es menor, lo que evidencia la necesidad de equilibrar las propiedades mecánicas y de durabilidad en el diseño de mezclas.

Table 17: Resultados Porosidad Efectiva a los 28 días

Ensayo a los 28 días	% de Sílice	Porosidad Efectiva cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
	0%	0.000264
1%	0.000192	
3%	0.000136	
5%	0.00016	

Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

Figure 11: Gráfica Porosidad Efectiva a los 28 días



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

#### 4.4 Comparativa

##### 5.4.1 Comparación global de la resistencia a la compresión

El análisis conjunto de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días permite identificar con claridad la evolución del comportamiento mecánico del hormigón con incorporación de sílice de tamaño reducido, evidenciando una dependencia directa tanto del tiempo de curado como del porcentaje de adición.

A los 7 días (amarillo), se observa que la mezcla patrón presenta los valores más altos de resistencia, mientras que las mezclas con sílice evidencian una disminución progresiva, particularmente en dosificaciones intermedias. Este comportamiento es característico de materiales con adiciones puzolánicas, donde la hidratación del cemento Portland domina el desarrollo inicial de resistencia, mientras que la sílice aún no ha reaccionado de forma significativa. En esta etapa, la presencia de sílice puede incluso generar efectos adversos, como el aumento en la demanda de agua o la dilución del contenido de cemento efectivo, lo que contribuye a la reducción de la resistencia inicial.

A los 14 días (tomate), se evidencia un cambio importante en la tendencia, donde las mezclas con bajo contenido de sílice, especialmente la dosificación del 1%, comienzan a superar a la mezcla patrón. Este comportamiento marca el inicio del aporte significativo de la reacción puzolánica, en la cual la sílice reacciona con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando productos adicionales de hidratación, principalmente gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Este gel contribuye a la densificación de la matriz y al incremento de la resistencia mecánica.

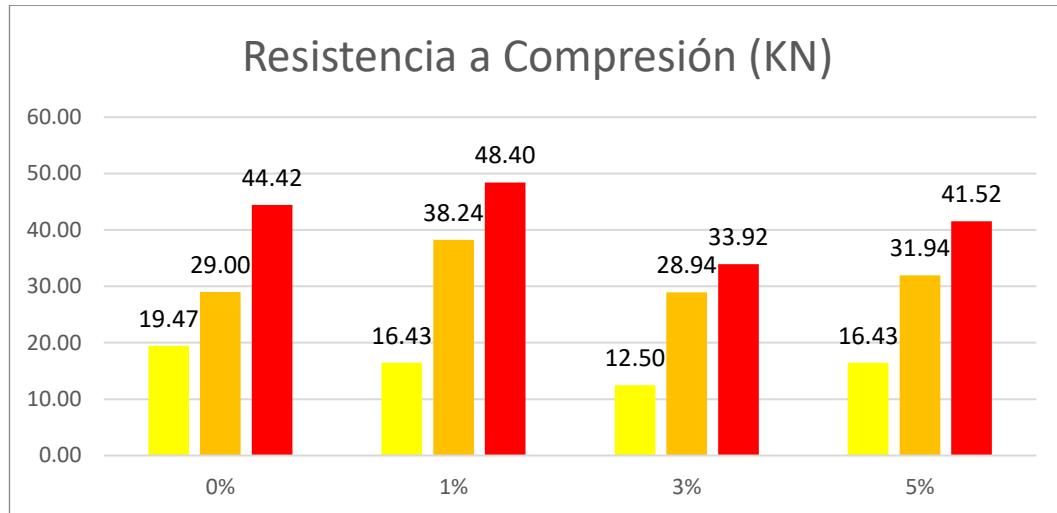
A los 28 días (rojo), esta tendencia se consolida de manera clara. La mezcla con 1% de sílice alcanza el mayor valor de resistencia a la compresión, superando tanto al hormigón convencional como a las demás dosificaciones. Este resultado confirma que, a edades mayores, la sílice no solo compensa la disminución inicial, sino que mejora el desempeño mecánico del material. Sin embargo, se observa que al incrementar el contenido de sílice más allá de este valor, la resistencia no continúa aumentando de manera proporcional. En particular, la dosificación con 3% presenta una disminución considerable, mientras que la de 5% muestra una recuperación parcial.

Este comportamiento no lineal evidencia la existencia de una dosificación óptima, ya que un exceso de sílice puede generar efectos negativos como la dilución del cemento, incremento en la porosidad no reactiva o aumento en la demanda de agua, afectando la relación agua/cemento efectiva.

En términos generales, los resultados permiten concluir que la incorporación de sílice de tamaño reducido tiene un efecto retardado pero positivo sobre la resistencia a la

compresión, siendo más efectivo en edades medias y tardías, y que su beneficio depende críticamente de una adecuada dosificación.

Figure 12: Gráfica Resistencia a Compresión



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

#### 5.4.2 Comparación global de la resistencia a la tracción

A diferencia de la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción presenta un comportamiento más complejo y menos uniforme a lo largo del tiempo, evidenciando una mayor sensibilidad a la microestructura del material y a la presencia de discontinuidades internas.

A los 7 días (amarillo), las mezclas con sílice presentan valores superiores a la mezcla patrón, lo que indica que, en edades tempranas, la incorporación de partículas finas contribuye a mejorar la adherencia entre la pasta cementante y los agregados, así como a reducir la porosidad en la zona de transición interfacial (ITZ). Esto favorece una mejor distribución de los esfuerzos de tracción y retrasa la formación de microfisuras.

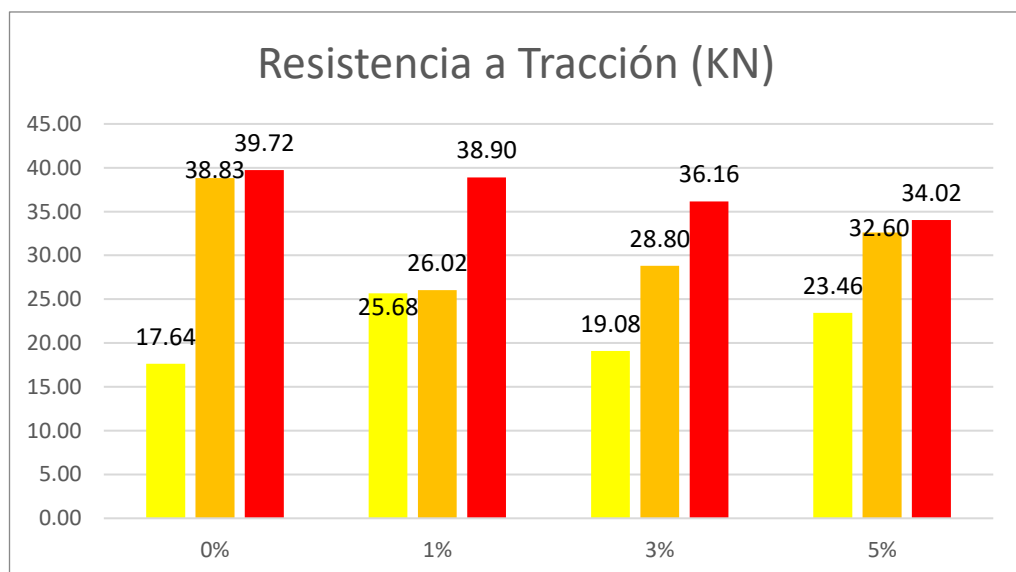
Sin embargo, a los 14 días (tomate), los resultados muestran una mayor dispersión, sin una tendencia claramente definida. Algunas mezclas presentan valores intermedios, mientras que la mezcla patrón alcanza el valor más alto. Este comportamiento sugiere que la resistencia a tracción no depende únicamente de la densificación de la matriz, sino también de factores como la compatibilidad entre los materiales, la distribución de tensiones internas y la evolución de microfisuras.

A los 28 días (rojo), se observa una tendencia más clara, donde la mezcla patrón presenta el mayor valor de resistencia a tracción, seguida por la dosificación con 1% de sílice, mientras que las mezclas con mayores porcentajes muestran una disminución progresiva. Este resultado indica que, aunque la sílice mejora la microestructura, también puede aumentar la rigidez del material, reduciendo su capacidad de deformación antes de la falla.

Además, la resistencia a tracción es particularmente sensible a defectos internos y a la presencia de microfisuras, las cuales pueden generarse debido a tensiones internas o a cambios en la estructura del material. La incorporación de sílice, al modificar la matriz, puede influir en la forma en que estas fisuras se inician y se propagan.

En conjunto, se concluye que el efecto de la sílice sobre la resistencia a tracción es limitado y no presenta una mejora consistente en todas las edades, siendo esta propiedad más difícil de optimizar mediante la incorporación de materiales finos.

Figure 13: Gráfica Resistencia a Tracción



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

### 5.4.3 Comparación global de la porosidad efectiva

La porosidad efectiva presenta el comportamiento más consistente y favorable entre todas las propiedades analizadas, evidenciando de manera clara el impacto positivo de la incorporación de sílice de tamaño reducido en la durabilidad del hormigón.

Desde los 7 días (amarillo), se observa una reducción significativa de la porosidad en todas las mezclas con sílice en comparación con la mezcla patrón. Este resultado indica que el efecto filler actúa de manera inmediata, permitiendo que las partículas finas ocupen los vacíos existentes en la matriz, mejorando la compacidad del material.

A los 14 días (tomate), esta tendencia se mantiene y se acentúa, evidenciando no solo el efecto físico de relleno, sino también el inicio de la reacción puzolánica, que contribuye a la formación de productos adicionales de hidratación que comienzan a refinar la estructura porosa.

A los 28 días (rojo), la reducción de la porosidad es aún más notable, alcanzándose los valores más bajos en las dosificaciones intermedias, particularmente en torno al 3%. Este resultado confirma que la combinación del efecto filler y la reacción puzolánica genera una microestructura más densa, con poros de menor tamaño y menor conectividad.

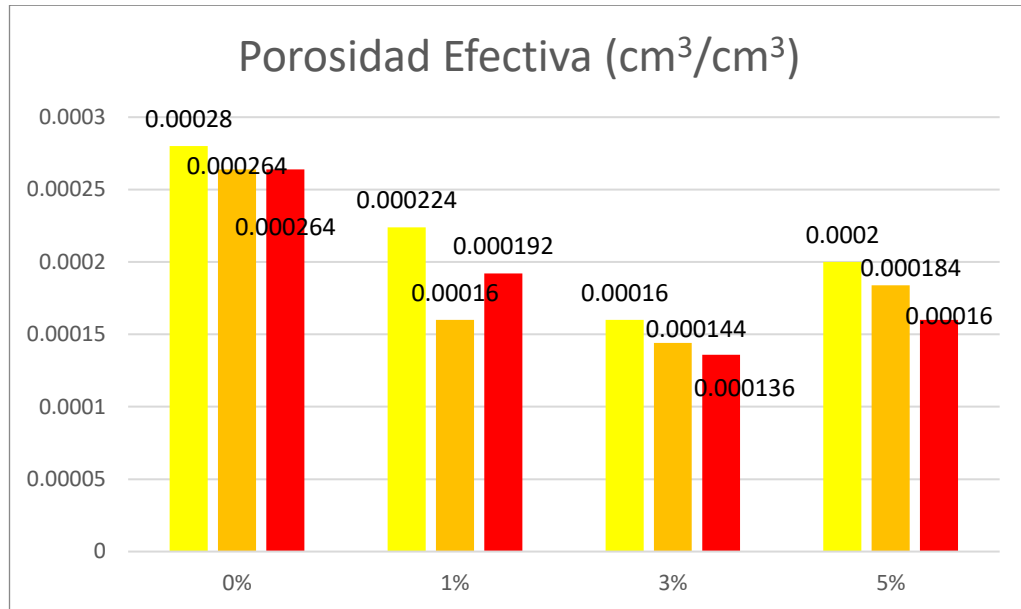
La disminución de la porosidad tiene implicaciones directas sobre la durabilidad del hormigón, ya que reduce la permeabilidad y limita el ingreso de agentes agresivos como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono. Esto contribuye a mejorar el desempeño del material frente a procesos de deterioro como la corrosión de armaduras o la degradación química.

Asimismo, se observa que, aunque la dosificación con 5% presenta un ligero incremento respecto al valor mínimo, sigue siendo inferior a la mezcla patrón, lo que indica que la incorporación de sílice mejora de manera general las propiedades de durabilidad.

En este sentido, se concluye que la dosificación óptima de sílice para mejorar la porosidad efectiva y, por ende, la durabilidad del hormigón, se encuentra alrededor del

3%, siendo esta propiedad la que presenta el comportamiento más estable y predecible frente a la variación del contenido de sílice.

Figure 14: Gráfica Porosidad Efectiva



Fuente: Elaboración propia. Capítulo III

## 5. Capítulo IV: Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Principales Hallazgos

#### 5.1.1 Comportamiento de la resistencia a la compresión

El análisis de la resistencia a la compresión permitió evidenciar una evolución claramente dependiente del tiempo en el comportamiento del hormigón con incorporación de sílice de tamaño reducido, destacándose el papel combinado de su actividad puzolánica y su efecto físico como material de relleno (*filler*). A los 7 días de curado, las mezclas modificadas presentan valores inferiores en comparación con la mezcla patrón, lo cual se explica porque, en esta etapa, el desarrollo de la resistencia está gobernado principalmente por la hidratación del cemento Portland. En este periodo inicial, la sílice aún no ha activado de forma significativa su reacción

puzolánica, y aunque su reducido tamaño de partícula contribuye al relleno de vacíos, este efecto filler no es suficiente para compensar la menor cantidad de cemento efectivo en la mezcla.

Este comportamiento inicial pone de manifiesto que la sílice, pese a mejorar la distribución granulométrica del sistema y reducir parcialmente la porosidad a través del efecto filler, requiere tiempo para desarrollar su potencial reactivo. Incluso, en edades tempranas puede generar una ligera disminución de la resistencia debido a la dilución del contenido de cemento y al incremento en la demanda de agua, lo que repercute en la relación agua/cemento.

Sin embargo, a medida que avanza el tiempo de curado, particularmente a los 14 y 28 días, se observa una mejora progresiva en la resistencia a la compresión de las mezclas con sílice, destacándose especialmente la dosificación con 1%. Este comportamiento confirma la activación de la reacción puzolánica, mediante la cual la sílice reacciona con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), transformándolo en compuestos cementantes adicionales, principalmente gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H). De manera complementaria, el efecto filler contribuye a una mayor compactación de la matriz, mejorando la densidad del empaquetamiento de partículas y reduciendo la porosidad capilar. La combinación de ambos efectos —químico y físico— favorece una microestructura más densa y homogénea, lo que se traduce en un incremento significativo de la resistencia mecánica.

Asimismo, se evidencia que el incremento en el contenido de sílice no genera un aumento proporcional en la resistencia, reflejando un comportamiento no lineal. En dosificaciones superiores, como 3% y 5%, la resistencia tiende a disminuir o estabilizarse, lo que puede atribuirse no solo a la dilución del sistema cementante, sino también a una saturación del efecto filler y a la limitada disponibilidad de hidróxido de calcio para sostener la reacción puzolánica. Además, el exceso de partículas finas puede incrementar la demanda de agua y afectar negativamente la trabajabilidad, reduciendo la eficiencia global del sistema.

En este sentido, se concluye que la sílice de tamaño reducido actúa de manera dual dentro del hormigón: como material puzolánico altamente reactivo y como filler que optimiza la estructura interna. Esta sinergia permite mejorar significativamente la

resistencia a la compresión en edades medias y tardías, siempre que se utilice una dosificación adecuada, identificándose un contenido óptimo cercano al 1%, donde se alcanza un equilibrio entre el efecto físico de relleno y la reacción química puzolánica.

### **5.1.2 Comportamiento de la resistencia a la tracción**

La resistencia a la tracción, si bien es un parámetro complementario en la caracterización del hormigón, presenta un comportamiento más variable en comparación con la resistencia a la compresión, la cual constituye la propiedad mecánica principal en el diseño estructural. En este sentido, los resultados obtenidos en tracción deben interpretarse como indicadores del comportamiento microestructural del material más que como un criterio determinante de desempeño.

A los 7 días, las mezclas con incorporación de sílice muestran valores ligeramente superiores a la mezcla patrón, lo que puede atribuirse a la presencia de partículas finas que mejoran la adherencia entre la pasta cementante y los agregados. Este efecto se asocia a una mejora en la zona de transición interfacial (ITZ), donde la reducción de la porosidad y el efecto filler favorecen una mejor transferencia de esfuerzos en etapas tempranas.

Asimismo, la distribución más uniforme de partículas finas dentro de la matriz puede contribuir a una ligera mejora en la redistribución de tensiones internas, retrasando la iniciación de microfisuras. Sin embargo, estos efectos resultan limitados y no representan una mejora significativa en el comportamiento global del material.

A los 14 y 28 días, los resultados muestran una tendencia menos favorable, donde la mezcla patrón alcanza valores superiores de resistencia a tracción, mientras que las mezclas con sílice, especialmente en mayores dosificaciones, presentan una leve disminución. Este comportamiento puede asociarse a un incremento en la rigidez de la matriz cementante debido a la formación adicional de productos de hidratación, lo que reduce la capacidad de deformación antes de la falla.

No obstante, es importante considerar que la resistencia a tracción del hormigón es intrínsecamente baja y altamente dependiente de la presencia de microfisuras y de la

heterogeneidad del material, por lo que pequeñas variaciones en la microestructura pueden generar dispersiones en los resultados sin implicar cambios sustanciales en el desempeño estructural.

En conjunto, se concluye que la incorporación de sílice de tamaño reducido no tiene un impacto significativo ni consistente sobre la resistencia a la tracción. Por tanto, su uso debe valorarse principalmente en función de sus beneficios en propiedades más relevantes para el comportamiento del hormigón, como la resistencia a la compresión y la mejora de la durabilidad.

### **5.1.3 Comportamiento de la porosidad efectiva**

El análisis de la porosidad efectiva constituye uno de los hallazgos más relevantes del estudio, evidenciando de manera clara y consistente el efecto positivo de la incorporación de sílice de tamaño reducido en la durabilidad del hormigón.

Desde los 7 días de curado, se observa una reducción significativa de la porosidad en todas las mezclas con sílice en comparación con la mezcla patrón. Este comportamiento indica que el efecto físico de la sílice, conocido como efecto filler, actúa desde etapas tempranas, permitiendo que las partículas finas rellenen los vacíos existentes en la matriz, mejorando la compacidad del material.

A los 14 días, esta tendencia se mantiene y se intensifica, lo que indica que, además del efecto físico, comienza a manifestarse la reacción puzolánica, contribuyendo a la formación de productos adicionales de hidratación que refinan la estructura porosa.

A los 28 días, la reducción de la porosidad es aún más evidente, alcanzándose los valores más bajos en las dosificaciones intermedias, particularmente en torno al 3%. Este resultado confirma que la combinación del efecto filler y la reacción puzolánica genera una microestructura más densa, caracterizada por una menor cantidad de poros, así como por una reducción en su tamaño y conectividad.

La disminución de la porosidad tiene implicaciones directas sobre la durabilidad del hormigón, ya que reduce la permeabilidad y limita el ingreso de agentes agresivos, como cloruros, sulfatos y dióxido de carbono. Esto contribuye a mejorar la resistencia

del material frente a procesos de deterioro, como la corrosión de armaduras y la degradación química.

En este sentido, se concluye que la incorporación de sílice de tamaño reducido mejora de manera significativa la durabilidad del hormigón, siendo esta la propiedad que presenta el comportamiento más consistente y favorable en todas las edades analizadas.

#### **5.1.4 Determinación de la mejor dosificación**

A partir del análisis integral de los resultados obtenidos, se determinó que la incorporación de sílice de tamaño reducido no presenta un comportamiento uniforme para todas las propiedades evaluadas, evidenciándose la existencia de diferentes cantidades más favorables en función del criterio de desempeño considerado.

En términos de resistencia a la compresión, se identificó que una dosificación cercana al 1% de sílice representa la mejor cantidad para maximizar esta propiedad, especialmente a edades medias y tardías, donde la reacción puzolánica contribuye de manera significativa al desarrollo de la resistencia.

Por otro lado, en lo que respecta a la durabilidad, evaluada mediante la porosidad efectiva, se determinó que una dosificación alrededor del 3% resulta ser la cantidad más adecuada para reducir la porosidad y mejorar la densificación de la matriz del hormigón.

Este comportamiento evidencia que el diseño de mezclas con incorporación de sílice debe considerar un equilibrio entre propiedades mecánicas y de durabilidad, ya que un aumento excesivo en el contenido de sílice no garantiza mejoras en todas las variables e incluso puede generar efectos adversos en algunas de ellas.

En consecuencia, la selección del porcentaje de sílice debe basarse en los requerimientos específicos de cada aplicación, priorizando las propiedades más relevantes en función de las condiciones de servicio del elemento estructural.

## 5.2 Viabilidad técnica y limitaciones del estudio

### 5.2.1 Viabilidad técnica de la incorporación de sílice

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio, se puede establecer que la incorporación de sílice de tamaño reducido en mezclas de hormigón es técnicamente viable, especialmente cuando el objetivo es mejorar las propiedades de durabilidad y el desempeño mecánico en edades medias y tardías.

El análisis experimental evidenció que la sílice actúa mediante dos mecanismos fundamentales. En primer lugar, el efecto físico conocido como *efecto filler*, mediante el cual las partículas finas rellenan los vacíos existentes entre los granos de cemento y los agregados, contribuyendo a una mejor distribución granulométrica y a una mayor compacidad de la matriz. En segundo lugar, la sílice participa en la reacción puzolánica, reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento para formar productos adicionales de hidratación, principalmente gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), el cual es responsable del incremento en la resistencia y de la mejora de la microestructura del material (Concrete: Microstructure, Properties, and Materials).

Estos mecanismos permiten explicar la reducción de la porosidad efectiva observada en todas las edades analizadas, así como el incremento en la resistencia a la compresión a los 14 y 28 días, especialmente en bajas dosificaciones. La disminución de la porosidad implica una menor permeabilidad del material, lo que se traduce en una mayor resistencia frente a la penetración de agentes agresivos, constituyendo un factor clave en la durabilidad del hormigón (American Concrete Institute).

Desde el punto de vista constructivo, la incorporación de sílice no requiere modificaciones sustanciales en los procesos convencionales de producción del hormigón, lo que facilita su aplicación en obra. Sin embargo, su implementación adecuada exige un control riguroso de la dosificación, ya que el incremento en el contenido de sílice puede afectar la trabajabilidad debido a su alta área específica, incrementando la demanda de agua y modificando la relación agua/cemento efectiva.

Adicionalmente, se evidenció que el comportamiento de la sílice no es lineal respecto a su dosificación. Mientras que un contenido cercano al 1% resulta óptimo para maximizar la resistencia a la compresión, valores mayores no necesariamente generan mejoras adicionales e incluso pueden producir efectos adversos. Esto coincide con lo señalado en la literatura técnica, donde se indica que las adiciones puzolánicas deben ser cuidadosamente dosificadas para evitar efectos de dilución del sistema cementante (Properties of Concrete).

En este sentido, se concluye que la viabilidad técnica de la sílice está condicionada a un adecuado diseño de la mezcla, en el cual se consideren tanto las propiedades mecánicas como los requerimientos de durabilidad del elemento estructural.

### **5.2.2 Limitaciones relacionadas con el alcance experimental**

Una de las principales limitaciones del presente estudio radica en el alcance experimental de los ensayos realizados. Si bien se evaluaron tres edades de curado (7, 14 y 28 días), no se consideraron edades mayores, como 56, 90 o incluso 180 días, en las cuales la reacción puzolánica podría continuar desarrollándose de manera significativa.

Diversos estudios han demostrado que las reacciones puzolánicas presentan una cinética más lenta en comparación con la hidratación del cemento, por lo que sus efectos pueden intensificarse a largo plazo, generando incrementos adicionales en la resistencia y mejoras en la microestructura del material (Concrete Technology). Por lo tanto, la ausencia de resultados a edades mayores limita la evaluación completa del potencial de la sílice.

Asimismo, el número de dosificaciones analizadas fue reducido, lo que restringe la posibilidad de identificar con mayor precisión un rango óptimo de contenido de sílice. En particular, no se evaluaron porcentajes intermedios entre las dosificaciones consideradas, lo que podría proporcionar una mejor comprensión del comportamiento no lineal observado en algunas propiedades.

### **5.2.3 Limitaciones en las condiciones de ensayo**

Los ensayos realizados se desarrollaron bajo condiciones controladas de laboratorio, lo cual garantiza la repetibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos. No obstante, estas condiciones no representan completamente las condiciones reales de obra, donde intervienen múltiples variables que pueden influir en el comportamiento del hormigón.

Factores como la variación de temperatura y humedad ambiental, los métodos de colocación y compactación, así como las condiciones de curado, pueden afectar significativamente el desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad del material. En particular, el curado inadecuado puede limitar el desarrollo de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica, reduciendo los beneficios asociados a la incorporación de sílice (American Concrete Institute).

Además, no se consideraron variaciones en los materiales constituyentes, tales como cambios en la granulometría o en la naturaleza de los agregados, ni en las características del cemento utilizado. Estas variables pueden influir en la interacción entre la sílice y la matriz cementante, afectando el comportamiento final del hormigón.

### **5.2.4 Limitaciones en la evaluación de durabilidad**

Si bien el presente estudio incluyó la evaluación de la porosidad efectiva como indicador de durabilidad, esta propiedad no permite por sí sola caracterizar completamente el comportamiento del hormigón frente a condiciones reales de exposición.

La durabilidad del hormigón está influenciada por múltiples mecanismos de deterioro, tales como la penetración de cloruros, el ataque por sulfatos, la carbonatación y los ciclos de humedad-sequedad, los cuales no fueron considerados en este estudio. Estos procesos están directamente relacionados con la permeabilidad y la microestructura del material, pero requieren ensayos específicos para su evaluación.

De acuerdo con las recomendaciones técnicas, una evaluación integral de la durabilidad debe incluir diferentes ensayos que permitan analizar el comportamiento

del hormigón frente a distintos agentes agresivos (American Concrete Institute). Por lo tanto, aunque la reducción de la porosidad observada sugiere una mejora en la durabilidad, no es posible establecer conclusiones definitivas sobre el desempeño del material en condiciones reales de servicio.

### **5.3 Recomendaciones para futuras investigaciones**

#### **5.3.1 Evaluación del comportamiento a edades mayores de curado**

Se recomienda que futuras investigaciones amplíen el análisis del comportamiento del hormigón incorporando edades de evaluación superiores a las consideradas en el presente estudio, tales como 56, 90 y 180 días. Esto permitiría obtener una visión más completa del desarrollo de las propiedades mecánicas y de durabilidad a largo plazo.

Como se evidenció en los resultados obtenidos, la incorporación de sílice de tamaño reducido presenta una influencia más significativa en edades medias y tardías, lo cual está directamente relacionado con la naturaleza de la reacción puzolánica. Esta reacción se caracteriza por una cinética más lenta en comparación con la hidratación del cemento Portland, por lo que sus efectos continúan desarrollándose con el tiempo, generando productos adicionales de hidratación que contribuyen a la densificación de la matriz (Concrete Technology).

En este sentido, la evaluación a edades mayores permitiría confirmar si las tendencias observadas a los 28 días se mantienen, se intensifican o se estabilizan, especialmente en lo que respecta a la resistencia a la compresión y a la reducción de la porosidad. Además, posibilitaría analizar el comportamiento del material en condiciones más cercanas a su desempeño real en servicio.

#### **5.3.2 Ampliación del rango y precisión de las dosificaciones de sílice**

Se recomienda profundizar en el estudio de la dosificación de sílice mediante la evaluación de un rango más amplio de porcentajes, particularmente en el intervalo

comprendido entre 1% y 3%, donde se evidenció el mejor desempeño en las propiedades analizadas.

Los resultados obtenidos muestran que el comportamiento del hormigón con sílice no es lineal, lo que indica la existencia de un punto óptimo dentro de este rango. Sin embargo, la limitada cantidad de dosificaciones evaluadas impide definir con precisión dicho punto. Por lo tanto, la inclusión de porcentajes intermedios (por ejemplo, 1.5%, 2% o 2.5%) permitiría establecer con mayor exactitud la relación entre el contenido de sílice y las propiedades del material.

Adicionalmente, sería pertinente analizar la influencia de la sílice en combinación con diferentes relaciones agua/cemento, ya que este parámetro tiene un impacto significativo en el desarrollo de la resistencia y en la durabilidad del hormigón (Properties of Concrete).

### **5.3.3 Incorporación de ensayos avanzados de durabilidad**

Se recomienda que futuras investigaciones incluyan una evaluación más completa de la durabilidad del hormigón mediante la realización de ensayos específicos que permitan analizar su comportamiento frente a diferentes mecanismos de deterioro.

Entre los ensayos recomendados se encuentran la penetración de cloruros, el ataque por sulfatos, la carbonatación y la absorción capilar, los cuales son fundamentales para evaluar el desempeño del hormigón en condiciones reales de exposición. Estos ensayos permitirían validar de manera más integral los efectos observados en la reducción de la porosidad, la cual, si bien es un indicador relevante, no permite por sí sola caracterizar completamente la durabilidad del material.

De acuerdo con las recomendaciones técnicas, la evaluación de la durabilidad debe considerar múltiples variables que influyen en la interacción del hormigón con el medio ambiente, incluyendo su permeabilidad, composición química y microestructura (American Concrete Institute).

#### **5.3.4 Análisis de la trabajabilidad y optimización mediante aditivos**

Se recomienda evaluar de manera más detallada el efecto de la incorporación de sílice sobre la trabajabilidad del hormigón, considerando que las partículas finas presentan una alta área específica, lo que puede incrementar la demanda de agua y afectar la consistencia de la mezcla.

En este contexto, resulta pertinente analizar el uso de aditivos químicos, especialmente superplastificantes, los cuales permiten mejorar la fluidez del hormigón sin modificar la relación agua/cemento. La incorporación de estos aditivos podría optimizar el desempeño del material, facilitando su colocación y compactación en obra, sin comprometer sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

Asimismo, sería relevante estudiar la interacción entre la sílice y distintos tipos de aditivos, con el fin de establecer combinaciones óptimas que maximicen los beneficios de ambos componentes.

#### **5.3.5 Validación en condiciones reales y estudios a escala estructural**

Se recomienda complementar los estudios de laboratorio con investigaciones a escala real, aplicando las mezclas con incorporación de sílice en elementos estructurales y evaluando su comportamiento en condiciones de servicio.

Los ensayos de laboratorio se realizan bajo condiciones controladas que permiten aislar variables y obtener resultados reproducibles; sin embargo, en la práctica, el comportamiento del hormigón está influenciado por factores adicionales como las condiciones ambientales, los métodos de colocación, el proceso de compactación y las condiciones de curado.

La validación en campo permitiría analizar la influencia de estos factores en el desempeño del material y verificar la aplicabilidad de los resultados obtenidos en laboratorio, lo cual es fundamental para su implementación en proyectos reales (American Concrete Institute).

### **5.3.6 Estudios microestructurales y correlación con propiedades macroscópicas**

Se recomienda realizar estudios complementarios a nivel microestructural que permitan comprender con mayor profundidad los cambios internos del hormigón debido a la incorporación de sílice de tamaño reducido.

Técnicas como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la difracción de rayos X (XRD) o el análisis de porosidad mediante métodos avanzados permitirían observar la formación de productos de hidratación, la distribución de los poros y la evolución de la microestructura.

Este tipo de análisis facilitaría la correlación entre los resultados experimentales obtenidos a nivel macroscópico, como la resistencia y la porosidad, y los fenómenos que ocurren a nivel microscópico, proporcionando una comprensión más completa del comportamiento del material (Concrete: Microstructure, Properties, and Materials).

## Bibliografía

Abrams, D. A. (1918). *Design of concrete mixtures*. Lewis Institute.

American Concrete Institute. (2010). *ACI 201.2R-08: Guide to Durable Concrete*. Farmington Hills, MI.

American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete*. Farmington Hills, MI.

ASTM International. (2018). *ASTM C496/C496M: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

ASTM International. (2019). *ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.

ASTM International. (2019). *ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*.

Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, 35(2), 185–189.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Neville, A. M. (2012). *Concrete Technology* (2nd ed.). Pearson Education.

Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071.

Karen Scrivener, K. L., & Arnon Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665.

Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry* (2nd ed.). Thomas Telford.

## Anexos

### Anexo 1



**Figure 15:** *Granulometría*

Anexo 2



Figure 16: *Peso Volumétrico*

Anexo 3



Figure 17: *Probetas Cilíndricas para romper a los 7 días*

Anexo 4



*Figure 18: Probetas Cilíndricas para romper a los 14 días*

Anexo 5



*Figure 19: Probetas Cilíndricas para romper a los 28 días*

Anexo 6



*Figure 20: Elaboración de las Probetas Cúbicas*

Anexo 7



Figure 21: Ensayo Compresión

Anexo 8



Figure 22: Ensayo Porosidad

