



**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

“Evaluación de homogeneizador de alta velocidad en mezclas de hormigón:  
análisis experimental con aditivo en las diferentes etapas de producción.”

**Trabajo previo a la obtención del grado académico de:**

**INGENIERO CIVIL**

**Autores:**

Luis Enrique Astudillo Astudillo

Juan Francisco Sánchez Molina

**Director:**

Ing. Vladimir Carrasco

**CUENCA-ECUADOR**

**2026**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis abuelitos, quienes han sido un ejemplo de vida, esfuerzo y valores, y cuyas enseñanzas han guiado cada paso de mi formación; a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser una gran motivación para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles; a mi hermana Aitana y a mi hermano Daniel, por acompañarme en este camino y por ser una parte esencial de mi vida; a mi familia que se encuentra fuera del país, quienes, a pesar de la distancia, han estado siempre presentes con su apoyo, cariño y confianza en mí; a mis compañeros, y a mis amigos más cercanos, por su compañía, ánimo y por hacer de este proceso una experiencia más llevadera. Este logro también es de ustedes.

**Juan Francisco Sánchez Molina**

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por haber sido mi guía y fortaleza durante todo este camino. Por darme sabiduría, paciencia y fuerza en los momentos de dificultad, y por permitirme llegar hasta esta etapa tan importante de mi vida.

A mis padres, Felipe Astudillo y Priscila Astudillo, por ser el fundamento de todo lo que soy. Gracias por su amor incondicional, por sus sacrificios silenciosos, por cada consejo y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo, disciplina y humildad. Este logro es también suyo, porque detrás de cada paso que he dado siempre ha estado su apoyo.

A mis hermanos, Josué Astudillo y Mathias Astudillo, por acompañarme en este proceso y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante. Su presencia ha sido una motivación constante para superarme y convertirme en un mejor ser humano y profesional.

A mis tíos, quienes han sido parte importante de mi vida, y de manera especial a Diana Astudillo, por su apoyo, orientación y consejos durante mi formación universitaria. Gracias por estar presente en momentos clave, por escucharme, guiarme y brindarme palabras de aliento cuando más las necesitaba.

A mis abuelitos, Arturo Astudillo, Sara Guillén y Esperanza Cobos, por todo el amor, las charlas, los consejos y las enseñanzas que me han brindado a lo largo de mi vida. Gracias por acompañarme con su cariño, por transmitirme valores y por ser parte esencial de este camino.

De manera muy especial, dedico este logro a mi abuelito Silvio Astudillo Rodríguez, quien ocupa un lugar inmenso en mi vida y en mi corazón. Su ejemplo, sus palabras, su cariño y su forma de enseñarme el valor del esfuerzo han dejado una huella profunda en mí. Este logro honra también su memoria, su legado y todo lo que representa para nuestra familia.

A mi novia, Natalie Orozco, por haber sido un pilar fundamental en los últimos ciclos de mi carrera. Gracias por tu paciencia, por tus consejos, por tu apoyo sincero y por estar a mi lado en los días de cansancio, dudas y esfuerzo. Tu compañía hizo más llevadero este camino y tu confianza en mí fue una motivación para no rendirme.

A mi familia, por su cariño, respaldo y confianza permanente. Cada palabra de apoyo, cada gesto de amor y cada muestra de fe en mí fueron parte esencial para culminar esta etapa.

Con profundo amor y gratitud, dedico este trabajo a todos ustedes, porque este logro no representa únicamente el final de una carrera, sino el resultado de un camino compartido con quienes han sido mi fuerza, mi inspiración y mi hogar.

**Luis Enrique Astudillo Astudillo**

## **Agradecimiento**

Agradecemos en primer lugar a nuestro director de tesis, el Ing. Vladimir Carrasco, por su guía, dedicación y valiosos conocimientos compartidos a lo largo del desarrollo de esta investigación, los cuales fueron fundamentales para la culminación de este trabajo; a la Facultad de Ciencia y Tecnología y a la Escuela de Ingeniería Civil, por brindarnos la formación académica y las herramientas necesarias para alcanzar este objetivo; a mi compañero de trabajo de titulación, por el compromiso, la responsabilidad y el esfuerzo conjunto que hicieron posible el desarrollo de este proyecto; a nuestras familias, por su apoyo incondicional, su paciencia y por ser el motor que nos impulsó a seguir adelante en cada etapa de este proceso; y finalmente, a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron en la realización de este trabajo y en nuestra formación profesional.

**Juan Francisco Sánchez Molina**

## **Agradecimiento**

Expreso mi más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay, institución que me brindó la formación académica, los conocimientos y las herramientas necesarias para crecer como estudiante y futuro profesional de la ingeniería civil.

De manera especial, agradezco al Ing. Vladimir Carrasco, tutor de esta tesis, por su guía, paciencia y compromiso durante el desarrollo de esta investigación. Su orientación técnica, su disposición para acompañar cada etapa del proceso y su calidad humana fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

Agradezco también al técnico laboratorista William Lituma, por su apoyo durante la fase experimental, por su colaboración en las actividades prácticas y por su disposición constante para contribuir al correcto desarrollo de los ensayos realizados.

A mis padres, Felipe Astudillo y Priscila Astudillo, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional durante toda mi formación. Gracias por ser mi mayor respaldo y por acompañarme en cada paso de este camino.

A mi abuelito Silvio Astudillo Rodríguez, por haber sido una persona fundamental en mi vida y en este proceso. Su ejemplo, sus enseñanzas y su cariño han sido una inspiración constante para alcanzar esta meta.

Finalmente, extendiendo mi gratitud a todas las personas que, directa o indirectamente, formaron parte de este proceso académico, aportando con su apoyo, tiempo, conocimiento o palabras de aliento para hacer posible la culminación de esta etapa.

**Luis Enrique Astudillo Astudillo**

## Resumen

La presente investigación evalúa la influencia de un homogeneizador de alta velocidad en el comportamiento mecánico del hormigón, comparándolo con el método convencional de mezclado. El estudio considera además la incorporación de un aditivo hiperplastificante antes y después del proceso de homogeneización, con el fin de analizar su efecto en la resistencia a compresión del material.

El programa experimental se desarrolló mediante tres configuraciones de mezcla: método tradicional, aditivo antes de la homogeneización y aditivo después de la homogeneización. Las probetas fueron ensayadas a diferentes edades, con énfasis en la resistencia temprana, para determinar la influencia del proceso de mezclado sobre el desarrollo mecánico del hormigón.

Los resultados obtenidos evidencian que el uso del homogeneizador mejora la dispersión de los componentes de la mezcla y favorece una estructura interna más uniforme en comparación con el método convencional. Asimismo, se observaron diferencias importantes en función del momento de incorporación del aditivo hiperplastificante, alcanzándose mejores desempeños en determinadas edades de ensayo.

Aunque la investigación estuvo orientada principalmente al análisis de la resistencia temprana, los resultados también mostraron incrementos significativos en la resistencia a los 28 días, permitiendo ampliar la comprensión sobre la influencia de la energía de mezclado en el comportamiento del hormigón. Los hallazgos obtenidos aportan criterios técnicos para la optimización de procesos de fabricación en aplicaciones constructivas.

**Palabras clave:** homogeneizador de alta velocidad, hormigón, resistencia a compresión, resistencia temprana, aditivo hiperplastificante, energía de mezclado, matriz cementicia.

## **Abstract**

This research evaluates the influence of a high-speed homogenizer on the mechanical behavior of concrete by comparing it with the conventional mixing method. The study also considers the incorporation of a superplasticizer admixture before and after the homogenization process in order to analyze its effect on the compressive strength of the material.

The experimental program was developed using three mixing configurations: conventional method, admixture added before homogenization, and admixture added after homogenization. The specimens were tested at different curing ages, with emphasis on early-age strength, to determine the influence of the mixing process on the mechanical development of concrete.

The results showed that the use of the homogenizer improved the dispersion of the mixture components and promoted a more uniform internal structure compared to the conventional method. Likewise, significant differences were observed depending on the stage at which the superplasticizer admixture was incorporated, achieving better performance at specific testing ages.

Although the research was mainly focused on early-age strength, the results also revealed significant increases in the 28-day compressive strength, allowing a broader understanding of the influence of mixing energy on concrete behavior. The findings provide technical criteria for optimizing concrete production processes in construction applications.

**Keywords:** high-speed homogenizer, concrete, compressive strength, early-age strength, superplasticizer admixture, mixing energy, cementitious matrix.

# Índice de contenidos

|   |      |
|---|------|
| Dedicatoria                               | ii   |
| Dedicatoria                               | iii  |
| Agradecimiento                            | v    |
| Agradecimiento                            | vi   |
| Resumen                                   | vii  |
| Palabras clave                            | vii  |
| Abstract                                  | viii |
| Keywords                                  | viii |
| Índice de contenidos                      | ix   |
| Índice de figuras                         | xii  |
| Índice de tablas                          | xiii |
| Introducción                              | xiv  |
| Antecedentes                              | xvi  |
| Problemática y Justificación              | xvii |
| Objetivos                                 | xx   |
| 1. Capítulo1                              | 1    |
| 1.1 Análisis de la información existente  | 2    |
| 1.2 Objetivo del capítulo                 | 4    |
| 1.3 Definición de las muestras            | 4    |
| 1.3.1 Tipos de Mezclas                    | 4    |
| 1.4 Diseño de las mezclas                 | 5    |
| 1.4.1 Volumen de los cilindros de ensayo. | 5    |
| 1.5 Número de muestras                    | 6    |
| 1.6 Dosificación y ajuste de las muestras | 7    |
| 1.7 Justificación del aditivo utilizado   | 8    |

|  |    |
|--|----|
| 1.7.1 Aditivo Hiperplastificante _____   | 10 |
| 1.8 Tiempo de evaluación de experimentos _____   | 12 |
| 1.9 Justificación de elaboración del diseño y sus etapas de producción _____                           | 13 |
| 2. Capítulo 2 _____  | 16 |
| 2.1 Proceso de la Fabricación de las Muestras _____  | 16 |
| 2.1.1 Preparación de los Materiales _____  | 16 |
| 2.2 Mezcla de los Materiales _____   | 17 |
| 2.2.1 Montaje y colocación en cilindros _____  | 19 |
| 2.2.2 Curado _____   | 19 |
| 2.2.3 Ajuste de la Cantidad de Agua y el Uso del Aditivo _____   | 20 |
| 2.3 Evaluación de la Resistencia Temprana _____  | 20 |
| 2.4 Muestras elaboradas en base al método tradicional de fabricación de hormigón                       | 21 |
| 2.5 Muestras elaboradas usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo antes del proceso) _____   | 25 |
| 2.6 Muestras elaboradas usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo después del proceso) _____ | 30 |
| 2.7 Proceso de la rotura de los cilindros _____  | 36 |
| 2.8 Resultados _____   | 38 |
| 2.8.1 Resultados día 1 _____   | 38 |
| 2.8.2 Resultados día 2 _____   | 40 |
| 2.8.3 Resultado día 28 _____   | 42 |
| 2.9 Prueba Hormigón Convencional vs Homogeneizador (Aditivo después de Homogeneizador) _____           | 45 |
| 2.10 Prueba Hormigón Convencional vs Homogeneizador (Aditivo antes de Homogeneizador) _____            | 48 |
| 2.11 Impactos generados por el proceso _____   | 51 |
| Capítulo 3 _____   | 53 |
| 3.1 Homegeneizador en el sector de la industria de la construcción _____                               | 53 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2 Ventajas y desventajas del homogeneizador (en sus diferentes procesos de producción) | 55 |
| 3.3 Discusión de resultados  | 56 |
| 3.4 Conclusiones   | 59 |
| 3.5 Recomendaciones  | 61 |
| Bibliografía   | 64 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 Pesos de material método tradicional.....                                   | 23 |
| Figure 2 Proceso de mezclado método tradicional .....                                | 24 |
| Figure 3 Proceso del moldeo método tradicional .....                                 | 25 |
| Figure 4 Pesos de material homogeneizador (ADITIVO ANTES).....                       | 27 |
| Figure 5 Proceso de mezclado homogeneizador (ADITIVO ANTES).....                     | 28 |
| Figure 6 Proceso del moldeo homogeneizador (ADITIVO ANTES).....                      | 29 |
| Figure 7 Pesos de material homogeneizador (ADITIVO DESPUES).....                     | 32 |
| Figure 8 Proceso de mezclado homogeneizador (ADITIVO DESPUES) .....                  | 34 |
| Figure 9 Proceso del moldeo homogeneizador (ADITIVO DESPUES) .....                   | 35 |
| Figure 10 Prensa hidráulica con cilindro de hormigón previa rotura .....             | 36 |
| Figure 11 Pantalla digital de la prensa hidráulica mostrando la carga de rotura..... | 37 |
| Figure 12 Diagrama de roptura de cilindro al día 1 .....                             | 40 |
| Figure 13 Diagrama de ruptura de cilindro al día 2 .....                             | 42 |
| Figure 14 Diagrama de ruptura de cilindro al día 28 .....                            | 44 |
| Figure 14 Diagrama comparativo entre promedios y sus respectivos métodos .....       | 44 |
| Figure 15 Variación entre métodos DIA 1,2 y 28 .....                                 | 47 |
| Figure 16 Variación entre métodos DIA 1,2 Y 28.....                                  | 50 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1- 1. Tabla de Muestras .....  | 6  |
| Tabla 2- 1. Dosificaciones para los experimentos .....   | 8  |
| Tabla 3- 2.8.1. Tabla de Resultados por Edad [Días] .....  | 39 |
| Tabla 4- 3.8.2. Tabla de Resultados por Edad [Días] .....  | 41 |
| Tabla 5- 4.8.3. Tabla de Resultados por Edad [Días] .....  | 43 |
| Tabla 6- 5.9.1. Tabla comparativa de la resistencia en kg/cm <sup>2</sup> entre Hormigón Convencional y Hormigón con Homogeneizador (Aditivo después de homogeneizador) en las pruebas del Día 1, Día 2 y Día 28 ..... | 45 |
| Tabla 7- 6.9.2. Tabla comparativa de la resistencia en kg/cm <sup>2</sup> entre Hormigón Convencional y Hormigón con Homogeneizador (Aditivo antes de homogeneizador) en las pruebas del Día 1, Día 2 y Día 28 .....   | 48 |

## Introducción

El hormigón es uno de los materiales más fundamentales y utilizados en la ingeniería civil, debido a su capacidad para resistir grandes cargas y su durabilidad a lo largo del tiempo. Desde los inicios de la civilización, los seres humanos han buscado desarrollar materiales capaces de sostener estructuras estables y duraderas. A medida que las técnicas de construcción han avanzado, el hormigón ha sido perfeccionado para cumplir con las crecientes exigencias de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. En este proceso de mejora continua, el desarrollo de nuevas tecnologías de mezcla y aditivos ha jugado un papel esencial.

El hormigón, como lo describen (Consuegra & García, 2022) establecen que “El hormigón es un material heterogéneo resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante incluyéndose la incorporación de aditivos, los cuales permiten que se desarrollen sus propiedades al hidratarse con el cemento” (p.3). Estos aditivos son sustancias que se incorporan al hormigón para mejorar aspectos como la fluidez, la resistencia y la durabilidad del material. En particular, el aditivo hiperplastificante, basado en policarboxilatos (PCE), ha demostrado ser una opción eficaz para mejorar la trabajabilidad del hormigón, reducir la relación agua/cemento y aumentar su densidad y durabilidad, sin comprometer su resistencia. Su capacidad para mejorar la dispersión de las partículas de cemento hace que el hormigón sea más compacto y resistente.

A pesar de los avances en el uso de aditivos, la mezcla de hormigón sigue siendo un proceso complejo, ya que los métodos convencionales no siempre garantizan una distribución uniforme de los componentes, lo que puede resultar en zonas débiles dentro de la estructura final. Es aquí donde el uso de homogeneizadores de alta velocidad cobra relevancia. Estos equipos, al generar un corte intensivo durante el proceso de mezcla, ayudan a mejorar la dispersión de los materiales, lo que contribuye a una mezcla más homogénea y, por lo tanto, a un mejor desempeño del hormigón.

No obstante, el uso de altas energías de mezclado introduce modificaciones en la interacción fisicoquímica entre el cemento y los aditivos, particularmente en el caso de los hiperplastificantes basados en policarboxilatos. Estas modificaciones pueden afectar la estabilidad de la dispersión y el proceso de hidratación inicial, lo que se traduce en variaciones en la resistencia temprana del material. En este contexto, resulta fundamental

analizar no solo el efecto del homogeneizador, sino también la forma en que este altera el comportamiento del sistema cemento–agua–aditivo.

Este trabajo de titulación continúa la investigación previamente realizada por Cárdenas Ochoa y Pérez Avecillas (2025), en la cual se evaluó el uso de homogeneizadores de alta velocidad para la mejora de la resistencia temprana del hormigón. En su estudio, se observó que las mezclas tratadas con el homogeneizador de alta velocidad mejoraron su resistencia a los 28 días, pero también se identificó una disminución de la resistencia temprana (1 y 2 días) cuando se utilizaba el aditivo hiperplastificante.

Este descubrimiento dejó claro que es necesario continuar con el estudio de la interacción entre el aditivo y el proceso de homogeneización para optimizar su efectividad.

Por esta razón, el objetivo de esta investigación es evaluar el efecto del homogeneizador de alta velocidad en la resistencia temprana del hormigón utilizando un solo aditivo hiperplastificante, y estudiar su impacto en las diferentes etapas de producción del hormigón. A través de un análisis comparativo entre las mezclas tradicionales y las tratadas con el homogeneizador, se busca determinar si este proceso puede mejorar la resistencia inicial del material sin comprometer sus propiedades a largo plazo, y si su uso puede contribuir a la optimización de los tiempos de construcción y a la sostenibilidad en la industria.

Este estudio tiene un enfoque práctico, ya que busca ofrecer soluciones innovadoras que optimicen la producción de hormigón en la construcción de infraestructuras más duraderas y eficientes. Además, se abordan los aspectos técnicos que hacen que el uso de homogeneizadores de alta velocidad sea una alternativa viable y económica para la industria de la construcción, en especial en proyectos que requieren alta resistencia en tiempos reducidos, como la fabricación de prefabricados o el pavimentado de carreteras.

El trabajo se estructura en tres capítulos principales. En el primer capítulo, se ofrece un marco teórico sobre el hormigón, sus propiedades, y el aditivo, además de una revisión de investigaciones previas relacionadas con la homogeneización de alta velocidad. El segundo capítulo describe la metodología experimental, los materiales utilizados, el procedimiento de ensayo y los resultados obtenidos. Finalmente, el tercer capítulo presenta su análisis comparativo, recomendaciones como se involucra en la construcción y las conclusiones, donde se discutirán las ventajas y limitaciones de utilizar homogeneizadores de alta velocidad en la mezcla de hormigón.

En resumen, esta investigación busca profundizar en el estudio del efecto del homogeneizador de alta velocidad en la resistencia temprana del hormigón cuando se utiliza un aditivo en las diferentes etapas de producción, proporcionando información valiosa tanto para la academia como para la industria de la construcción, y contribuyendo a la creación de soluciones más eficientes y sostenibles para la fabricación de hormigón.

## **Antecedentes**

El hormigón ha sido un material clave en la construcción de infraestructuras, debido a su resistencia y durabilidad. Sin embargo, mejorar las propiedades del hormigón, especialmente su resistencia temprana, ha sido un desafío constante. La resistencia temprana es crucial porque influye directamente en la rapidez con que se puede continuar con las etapas de construcción, como el retiro de los encofrados, lo que a su vez acelera el progreso de la obra.

Se sabe que la compactación del hormigón juega un papel fundamental en el aumento de su resistencia. Métodos tradicionales como la vibración durante el proceso de mezclado han demostrado ser efectivos para mejorar la densidad del hormigón, reduciendo los vacíos y haciendo la mezcla más homogénea. (Hall, 2012) señaló que estas “vibraciones contribuyen a una mejor distribución de las partículas, lo que mejora la resistencia final del material” (pág. 15). Sin embargo, este método tiene limitaciones, como la necesidad de tiempo y equipos pesados para asegurar una correcta compactación.

Con el objetivo de optimizar este proceso, investigadores han comenzado a explorar nuevas tecnologías, como el uso de ondas mecánicas y homogeneizadores de alta velocidad. Estos equipos operan a velocidades extremadamente altas, generando una mezcla mucho más uniforme y mejorando la dispersión de los componentes. Esta técnica no solo promete mejorar la calidad del hormigón, sino también acelerar el proceso de obtención de la resistencia, especialmente en sus primeras etapas.

El uso de tecnologías de ultrasonido y vibraciones mecánicas también ha sido investigado como una manera de acelerar la hidratación del cemento, lo que resulta en una microestructura más eficiente y resistente. Según (P. Kumar Mehta, 2006), “estas tecnologías permiten que el hormigón alcance una resistencia significativa en menos tiempo, lo que resulta beneficioso para proyectos que requieren rapidez” (pág. 45).

Un trabajo previo ya evaluó el uso de homogeneizadores de alta velocidad en la producción de hormigón. Este estudio demostró que, aunque el homogeneizador mejora la mezcla y la resistencia a largo plazo (28 días), las resistencias a los 1 y 2 días fueron menores cuando se utilizaban aditivos como los hiperplastificantes. Esto sugirió que el uso del homogeneizador y los aditivos debe ser cuidadosamente equilibrado para optimizar la resistencia temprana.

Este antecedente resalta la necesidad de seguir investigando y ajustando las técnicas de homogeneización y los métodos de incorporación de aditivos para encontrar la combinación óptima que logre una mejora significativa en la resistencia temprana del hormigón.

## **Problemática y Justificación**

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la construcción de infraestructuras, como viviendas, puentes, carreteras y otras obras fundamentales para el desarrollo de las ciudades. Su resistencia a compresión y durabilidad son esenciales para garantizar la seguridad de la población y el adecuado funcionamiento de las ciudades. Sin embargo, la forma en que se produce el hormigón aún presenta limitaciones significativas. Los métodos tradicionales de mezclado no siempre logran una adecuada integración de los componentes, lo que puede resultar en mezclas con vacíos y zonas débiles. Esto compromete la resistencia y durabilidad de las estructuras, generando vulnerabilidades que afectan la seguridad y longevidad de las obras.

El desafío técnico radica en mejorar la homogeneidad y compactación del hormigón sin recurrir al exceso de aditivos químicos ni aumentar el consumo de cemento. En este contexto, la investigación reciente realizada por Cárdenas Ochoa y Pérez Avecillas (2025) sobre el uso de homogeneizadores de alta velocidad ha demostrado ser prometedora, ya que permite obtener una microestructura más densa y compacta, lo que resulta en resistencias a compresión superiores, especialmente a los 28 días de curado. Esta mejora en la microestructura podría transformar la manera en que se produce el hormigón, optimizando sus características sin comprometer su sostenibilidad. Sin embargo, los ensayos iniciales investigados han mostrado que en las primeras etapas de curado (1 y 2 días), la interacción entre el homogeneizador y ciertos aditivos, como los hiperplastificantes, puede generar resistencias más bajas en comparación con las mezclas

convencionales. Este hallazgo subraya la necesidad de un análisis más profundo sobre la interacción entre los aditivos y el proceso de homogeneización, ya que la aplicación de esta tecnología en condiciones reales de obra requiere un conocimiento más detallado.

Desde el punto de vista social, el problema del hormigón tiene una gran repercusión. En países como Ecuador, donde el crecimiento urbano es acelerado y las condiciones sísmicas representan un desafío constante, contar con un hormigón más resistente, compacto y durable es una necesidad urgente para garantizar la seguridad estructural y resiliencia de las infraestructuras. La mejora en las propiedades del hormigón no solo tiene implicaciones técnicas, sino también sociales: edificaciones más seguras frente a sismos, infraestructuras públicas más duraderas y viviendas de mayor calidad para la población. El uso de técnicas que optimicen la producción del hormigón, sin comprometer la seguridad ni aumentar los costos, es crucial para asegurar el desarrollo urbano sostenible y ofrecer soluciones constructivas que se adapten a las necesidades locales.

En cuanto al impacto ambiental, el hormigón es uno de los materiales de construcción más demandantes en términos de consumo de recursos y emisiones de CO<sub>2</sub>. La producción de cemento, componente principal del hormigón, es responsable de una gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global. Por lo tanto, cualquier tecnología que permita reducir el uso de cemento sin comprometer la calidad del material tiene un impacto directo en la reducción de la huella de carbono de la construcción. El uso de homogeneizadores de alta velocidad podría contribuir a esta meta, ya que permite una mejor dispersión de los componentes sin la necesidad de añadir grandes cantidades de cemento o aditivos, lo que no solo optimiza el rendimiento del hormigón, sino que también disminuye el impacto ambiental del proceso de fabricación.

Desde el punto de vista económico, la optimización del proceso de producción del hormigón tiene implicaciones significativas. El costo de los materiales y el consumo de energía en el proceso de fabricación del hormigón constituyen una gran parte del costo total de las obras de construcción. Al mejorar la eficiencia del proceso de mezcla, se podrían reducir estos costos, lo que resultaría en ahorros significativos para la industria de la construcción. Además, el uso de tecnologías que optimicen el rendimiento de los materiales sin la necesidad de grandes cantidades de insumos costosos tiene un potencial económico importante para los proyectos, especialmente en mercados emergentes donde los recursos son limitados.

El estado actual de la investigación ha confirmado que el uso de homogeneizadores de alta velocidad genera mezclas más uniformes y resistentes a largo plazo, además de un aprovechamiento más eficiente de los recursos. Sin embargo, existen vacíos de conocimiento en cuanto a su interacción con diferentes aditivos y en su influencia sobre propiedades adicionales, como la impermeabilidad, la durabilidad frente a agentes agresivos (como los sulfatos y cloruros) y el comportamiento del material en entornos exigentes (como climas extremos o regiones sísmicas). Estos aspectos son fundamentales para comprender si esta tecnología puede ser aplicable a gran escala y bajo las condiciones reales de trabajo en proyectos de infraestructura.

El desarrollo del presente trabajo de titulación tiene como objetivo responder a estas preguntas, ampliando el estudio sobre el uso del homogeneizador de alta velocidad en combinación con aditivo en sus diferentes etapas de producción y curado. La investigación se enfocará en evaluar la resistencia mecánica a corto y largo plazo y busca aportar soluciones prácticas y aplicables que puedan optimizar la producción de hormigón, reducir los impactos ambientales y mejorar la calidad de la construcción, beneficiando tanto a la industria como a la sociedad en su conjunto. Con este marco de investigación, se espera generar conocimiento que no solo aporte al desarrollo teórico y científico del campo, sino que también influya de manera directa en las prácticas profesionales de la ingeniería civil y la construcción, promoviendo infraestructuras más sostenibles, resilientes y económicas.

## Objetivos

El objetivo general en el que se basa toda la investigación de este proyecto de titulación es “Evaluar el efecto del homogeneizador de alta velocidad en la resistencia temprana del hormigón utilizando aditivo en las diferentes etapas de producción”, del cual se derivan los siguientes objetivos específicos:

- Revisar mezclas de hormigón con diferentes tipos de aditivos en investigaciones previas.
- Diseñar los experimentos que se van a realizar
- Fabricar y ensayar cilindros de hormigón con y sin homogeneizador con La inclusión de aditivo en dos etapas distintas de producción, con el fin de determinar y comparar la resistencia a compresión a edades tempranas y a los 28 días.
- Analizar los efectos de homogeneización de alta velocidad y su potencial aplicación en obras que requieran rapidez y durabilidad.
- Identificar ventajas, limitaciones y recomendaciones de la técnica frente al impacto ambiental y económico.
- Comparar los resultados con el método convencional de mezclado

# 1. Capítulo1

El hormigón ha acompañado al ser humano durante gran parte de la historia de la construcción, y con el tiempo se ha convertido en uno de los materiales más utilizados a nivel mundial. Su resistencia, durabilidad y versatilidad lo han vuelto indispensable en obras civiles de todo tipo. Sin embargo, aunque frecuentemente se considera un material de elaboración simple, su calidad final depende de numerosos detalles: los componentes, la relación agua/cemento, el uso de aditivos y, especialmente, el proceso de mezclado. Cada uno de estos factores influye directamente en cómo se desarrolla la microestructura interna del material y en la resistencia que logra, especialmente en los primeros días de curado.

Dado que en Ecuador coinciden un aumento vertiginoso de las construcciones y condiciones sísmicas significativas, se vuelve indispensable que el hormigón logre niveles de resistencia óptimos desde etapas tempranas. Esto no solo permite avanzar más rápido en obra, sino que contribuye a garantizar la seguridad estructural. Por este motivo, se vuelve necesario buscar alternativas que mejoren la fabricación del hormigón sin incrementar en exceso el uso de cemento o aditivos, ni elevar los costos de producción. Dentro de este contexto surge el interés por nuevas tecnologías que puedan optimizar el proceso de mezcla y mejorar la calidad del material final

Una de las tecnologías que ha llamado la atención en los últimos años es el uso de homogeneizadores de alta velocidad. A diferencia de los métodos de mezcla convencionales, estos equipos aplican fuerzas de cizalla muy intensas, capaces de romper agrupaciones de partículas y distribuir de manera más uniforme los componentes de la mezcla. Esto puede generar un hormigón más compacto, con menos vacíos y con un comportamiento mecánico superior. En diversos estudios internacionales se ha observado que este tipo de mezcla puede acelerar ciertas etapas del proceso de hidratación y mejorar las resistencias, tanto en edades tempranas como a los 28 días de curado

Sin embargo, cuando se introduce un aditivo hiperplastificante en conjunto con el homogeneizador, la situación se vuelve más compleja. Los hiperplastificantes, especialmente los basados en poli carboxilatos, son muy conocidos por mejorar la fluidez del hormigón y permitir reducir la relación agua/cemento. Pero algunos trabajos han

mostrado que, cuando se combinan con mezclas de alta energía, pueden producir resultados inesperados.

Por esta razón, este capítulo reúne la información necesaria para entender qué factores intervienen en la resistencia temprana del hormigón, cómo influye el método de mezclado en la distribución interna de sus componentes y cuál es el papel que cumplen el aditivo en este proceso.

En síntesis, este capítulo sustenta la investigación, explicando por qué resulta relevante comparar un método de mezcla convencional con aditivo con un método de mezcla utilizando el homogeneizador, tanto con aditivo antes o después del mismo. El propósito es analizar cómo se desarrolla la resistencia del hormigón en los días 1, 2 y 28 de curado, con el fin de determinar si esta tecnología puede convertirse en una alternativa para mejorar la eficiencia, calidad y sostenibilidad del hormigón que se produce actualmente.

### **1.1 Análisis de la información existente**

Diversos estudios coinciden en que la manera en que el método de mezclado del hormigón influye significativamente en su desempeño, mucho más de lo que antes se pensaba. Uno de los trabajos más completos es el de (Remus, 2022), donde se analiza el uso de ultrasonido durante el mezclado. Allí se demuestra que someter la mezcla a energías muy altas cambia la forma en que el cemento se hidrata, acelerando tanto el fraguado como la ganancia de resistencia en las primeras horas. Además, el estudio plantea que este tipo de métodos podría permitir reducir la cantidad de cemento sin comprometer la calidad del hormigón, lo cual sería beneficioso para los costos y el impacto ambiental. Aun así, se aclara que estas técnicas necesitan más investigación para aplicarse de forma segura y predecible en distintos tipos de obra y condiciones reales.

Resultados parecidos han sido obtenidos por otros investigadores que emplean mezcladores de alta energía, como el homogeneizador de alta velocidad, o procesos de mezclado más complejos. Cuando la mezcla recibe mayor fuerza y movimiento, las partículas se distribuyen mejor y se forma una estructura interna más compacta, lo que contribuye a mejorar la resistencia tanto en edades tempranas como avanzadas. (Teichmann et al., 2024) demostraron que un mezclado más intenso mejora notablemente el rendimiento del hormigón e incluso permite reducir el contenido de Clinker sin afectar la resistencia a los 28 días. Esto confirma que el método de mezclado no es un paso secundario, sino un factor clave en la calidad final del material.

En el contexto local, un proyecto desarrollado en la Universidad del Azuay confirmó que el homogeneizador de alta velocidad puede aumentar la resistencia frente a mezclas tradicionales. Sin embargo, también se observaron diferencias en la trabajabilidad y en la sensibilidad al tiempo de mezclado, lo que evidencia que aún no existe un parámetro estandarizado para su uso. Esto refleja la necesidad de seguir investigando esta tecnología para comprender mejor su comportamiento en condiciones reales de producción y en obras que manejan volúmenes mayores.

A este panorama se suman los estudios sobre hormigones de alto desempeño, donde los aditivos hiperplastificantes juegan un papel esencial. Estos aditivos mejoran la fluidez y permiten reducir la relación agua/cemento, pero su eficacia depende completamente de cómo se mezclan. Si el aditivo no se distribuye bien, pueden formarse grumos o presentarse retrasos en la hidratación; por el contrario, cuando se dispersa adecuadamente, la mezcla se vuelve más uniforme y alcanza mejores resistencias. Esto demuestra que la calidad del mezclado está directamente ligada al funcionamiento del aditivo y que ambos aspectos deben analizarse en conjunto.

Por otra parte, normas como la NEC-SE-HM y la ASTM C39 establecen los parámetros mínimos y los ensayos necesarios para verificar de manera objetiva si una mezcla realmente mejora. Esto es especialmente importante en países como Ecuador, donde la alta sismicidad exige hormigones más resistentes y duraderos. Por ello, cualquier nueva tecnología de mezclado, como el homogeneizador de alta velocidad, debe evaluarse cuidadosamente dentro de este marco normativo.

En general, la literatura muestra que los métodos de mezcla de alta energía tienen un potencial enorme para mejorar el hormigón. Aun así, también deja claro que no se entiende completamente cómo se comportan estos métodos cuando se combinan con aditivos hiperplastificantes, ya que la interacción entre ambos puede modificar tanto la trabajabilidad como el desarrollo de resistencia en distintas etapas del curado. Esto evidencia la importancia de continuar investigando esta combinación para definir parámetros adecuados de operación y comprender mejor su influencia en las propiedades del hormigón durante todo su proceso de producción.

A partir de la revisión bibliográfica, se evidencia que los métodos de mezclado de alta energía influyen directamente en la microestructura del hormigón, mejorando la dispersión de partículas y la compactación del material. Sin embargo, cuando estos

métodos se combinan con aditivos hiperplastificantes, pueden generarse efectos no lineales en la hidratación del cemento, afectando principalmente la resistencia en edades tempranas. Por ello, el análisis conjunto del proceso de mezclado y la dosificación del aditivo se vuelve fundamental para comprender el comportamiento real del hormigón bajo estas condiciones.

## **1.2 Objetivo del capítulo**

El objetivo de este capítulo es analizar los antecedentes y estudios previos sobre el uso de aditivos en mezclas de hormigón, específicamente en aquellas que emplean un homogeneizador de alta velocidad. Este estudio se centrará en evaluar el impacto de este homogeneizador en la resistencia temprana del hormigón, utilizando un aditivo hiperplastificantes durante las distintas etapas de producción.

El capítulo proporcionará una base teórica para el diseño experimental, enfocándose en cómo el homogeneizador y el aditivo afectan la hidratación del cemento, la mejora de las propiedades mecánicas en los primeros días del curado, y la uniformidad de la mezcla. También se estudiará cómo estos dos elementos interactúan para mejorar la compactación y la resistencia inicial del hormigón. El objetivo es evaluar si este proceso puede ser una solución eficiente para optimizar la calidad del hormigón, especialmente en aplicaciones que requieren alta resistencia en tiempos cortos de producción.

## **1.3 Definición de las muestras**

### **1.3.1 Tipos de Mezclas**

Para analizar de manera más completa el efecto del homogeneizador de alta velocidad en la resistencia temprana del hormigón, se trabajó con tres configuraciones de mezcla diferentes. El objetivo principal fue comparar cómo varía el comportamiento del material dependiendo de si se usa un aditivo hiperplastificante antes o después del proceso de homogeneizador, y cómo se comporta la mezcla bajo el método tradicional de fabricación con concreteira, en comparación con el uso del homogeneizador de alta velocidad.

1. Mezcla con aditivo hiperplastificantes (antes o después del homogeneizador): En esta configuración, se incorporó un hiperplastificantes, que mejora la trabajabilidad del hormigón y facilita la dispersión de las partículas finas del cemento. Este aditivo reduce la fricción interna, mejorando la fluidez y permitiendo una integración más eficiente de los componentes. Además, influye

en la hidratación del cemento, acelerando la disolución de los compuestos y favoreciendo una mayor velocidad de hidratación. Dado que el homogeneizador de alta velocidad genera una energía significativa, se controla cuidadosamente el tiempo y la intensidad del mezclado, ya que el aditivo puede comportarse de manera diferente bajo condiciones de alta energía, afectando la evolución de la resistencia temprana.

2. Mezcla con método tradicional de concretera: Para comparar los resultados obtenidos con el homogeneizador, se preparó una mezcla utilizando el método tradicional de fabricación de hormigón, que consiste en la mezcla manual o con concretera. Este proceso sigue el enfoque convencional de mezclado sin la aplicación de alta energía, y sirve como control para evaluar las diferencias en la resistencia temprana, la trabajabilidad y la homogeneización de la mezcla. Comparar esta mezcla con las otras dos permitirá observar las mejoras o limitaciones que ofrece el homogeneizador con aditivo antes y después del mismo, en contraste con el proceso tradicional de concretera con aditivo.

La comparación entre estas tres configuraciones permitirá un análisis detallado del impacto del aditivo hiperplastificantes y el homogeneizador de alta velocidad en el desarrollo de la resistencia temprana del hormigón, así como en la uniformidad de la mezcla. Esto proporcionará información clave para determinar si el uso de la alta energía y el aditivo mejora, cambia o limita el comportamiento del hormigón en las primeras etapas de curado, y cómo se posiciona frente al método tradicional de fabricación. El objetivo final es evaluar si estos métodos innovadores pueden ofrecer una alternativa más eficiente y rápida para producir hormigón con altas prestaciones en tiempos reducidos, sin comprometer su calidad.

## **1.4 Diseño de las mezclas**

### **1.4.1 Volumen de los cilindros de ensayo.**

Para el presente estudio se usaron cilindros fabricados con las mezclas mencionadas previamente, estos cilindros tienen una altura de 20 cm y un diámetro de 10 cm, que siguen los parámetros estándar. Para obtener el volumen de los cilindros se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = \pi \frac{d^2}{4} h$$

Donde:

- $\pi$  toma un valor aproximado de 3.14159
- $d$  representa el diámetro del cilindro, en este caso 0.1 m.
- $h$  representa la altura del cilindro, en este caso 0.2 m.

Al sustituir valores obtenemos:

$$V = \pi \frac{(0.10)^2}{4} 0.20$$

$$V = 0.00157m^3$$

Para el estudio cada cilindro tendrá un volumen de 1.57 litros.

### 1.5 Número de muestras

Tabla 1- 1. Tabla de Muestras

| Metodo de Mezcla                       | Día 1       | Día 2       | Día 28      | Total de Muestras |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| Antes del Proceso de Homogeneizador    | 4 cilindros | 4 cilindros | 4 cilindros | 12 Muestras       |
| Posterior al Proceso de Homogeneizador | 4 cilindros | 4 cilindros | 4 cilindros | 12 Muestras       |
| Metodo Convencional                    | 4 cilindros | 4 cilindros | 4 cilindros | 12 Muestras       |
| Total Muestras                         | 12 muestras | 12 muestras | 12 muestras | 36 Muestras       |

Fuente: Elaboración propia

Para este ensayo se realizarán 36 muestras, que se dividirán de la siguiente manera:

El número de muestras para el ensayo se dividirá de la siguiente manera; 12 cilindros para la mezcla con aditivo antes del proceso de homogeneizado, los cuales se dividirán en 3 etapas; 4 cilindros para cada una de estas. Asimismo, se utilizarán 12 cilindros de mezcla con adición de aditivo posterior al homogeneizado, para estas muestras seguimos el mismo proceso de división por etapas y por último 12 cilindros para el mezclado tradicional el cual se divide en las mismas etapas antes mencionadas.

Para obtener el volumen total de hormigón a utilizar en el ensayo tomamos el volumen por cilindro y lo multiplicamos por el número de muestras totales del ensayo, este cálculo se detalla a continuación:

$$V = 0.00157m^3 * 36$$

$$V = 0.0565m^3$$

Como el ensayo se divide en tres tipos de mezclas diferentes con 12 cilindros cada uno, tenemos que el volumen para cada una es el siguiente:

$$V = \frac{0.0565m^3}{3}$$

$$V = 0.0188m^3$$

Para las dosificaciones utilizadas en el diseño del hormigón, se utilizó la guía del tutor de tesis, dichas dosificaciones se proporcionan para  $1m^3$  de concreto, por lo tanto, deberán ser ajustadas a los requerimientos del ensayo. El diseño a seguir es el siguiente:

- Cemento Portland: 400 kg
- Grava: 900 kg
- Arena: 750kg
- Agua: 200 litros
- Aditivo: 1% del peso total del cemento (4kg)
- Relación Agua/Cemento con: 0.4%

### **1.6 Dosificación y ajuste de las muestras**

Gracias a la evolución anterior del volumen de 36 cilindros cada uno separado es sus tres diferentes etapas este volumen de  $0.0188m^3$  este valor representa a 12 cilindros separados por etapa, adicional a este valor se incrementó en un 15%, lo que dio como resultado un valor final de  $0.02162m^3$ . Esta mayoración se realizó con el propósito de prevenir posibles pérdidas durante el proceso, asegurando así la precisión y consistencia de los resultados.

Se realizo 3 etapas del experimento las cuales se dividen en:

- Mezcla con aditivo antes del proceso de homogeneizado
- Mezcla con adición de aditivo posterior al homogeneizado

- El mezclado tradicional con aditivo

Se realizaron con las dosis previamente calculadas para 1 m<sup>3</sup>, las cuales fueron multiplicadas por el valor de 0.02162m<sup>3</sup> (volumen de cilindro mayorado) para obtener las cantidades adecuadas de cada material en las mezclas. A continuación, en la Tabla 1-2. Dosificaciones para los experimentos se presentarán las dosificaciones empleadas:

Cálculo del factor de escala: Factor=0.02162m<sup>3</sup>

Dosificaciones por experimento

Multiplicamos cada material por 0.02162m<sup>3</sup>:

Cemento:  $400 \times 0.02162 = 8.648 \text{ kg}$

Grava:  $900 \times 0.02162 = 19.458 \text{ kg}$

Arena:  $750 \times 0.02162 = 16.215 \text{ kg}$

Agua:  $200 \times 0.02162 = 4.324 \text{ L}$

Aditivo:  $4 \times 0.02162 = 0.08648 \text{ kg} \approx 87 \text{ g}$

Tabla 2- 1. Dosificaciones para los experimentos

| Material         | Unidad | Mezcla Aditivo<br>antes del<br>homogeneizado | Mezcla Aditivo<br>después del<br>homogeneizado | Mezcla<br>Mezclado<br>tradicional |
|------------------|--------|--|--|-----------------------------------|
| Cemento Portland | Kg     | 8.648  | 8.648  | 8.648                             |
| Grava            | Kg     | 19.458                                       | 19.458   | 19.458                            |
| Arena            | Kg     | 16.215                                       | 16.215   | 16.215                            |
| Agua             | L      | 4.324  | 4.324  | 4.324                             |
| Aditivo (1%)     | Kg     | 0.08648                                      | 0.08648  | 0.08648                           |

Fuente: Elaboración propia

### 1.7 Justificación del aditivo utilizado

Los aditivos son productos químicos que se añaden al hormigón en proporciones pequeñas, generalmente entre el 0,2% y el 1,60% del peso del cemento, con el objetivo de modificar sus propiedades en estado fresco, durante el fraguado o en el proceso de endurecimiento. Su utilización se ha convertido en una práctica habitual a nivel internacional, ya que contribuyen al desarrollo de mezclas más eficientes y especializadas, como hormigón bombeado, proyectado, prefabricado o premezclado,

mejorando tanto la productividad como la economía del proceso constructivo.( Carrasco, 2013.).

Según (Neville, 2012), la acción de los aditivos se relaciona directamente con la microestructura de la pasta de cemento. Al incorporarlos, estos pueden modificar la hidratación, reducir la demanda de agua o mejorar la dispersión de las partículas cementicias. Los superplastificantes, por ejemplo, permiten alcanzar mezclas altamente fluidas sin incrementar la cantidad de agua, lo que resulta fundamental para mantener relaciones agua/cemento bajas y, en consecuencia, obtener hormigones más resistentes y durables. En estudios realizados en hormigones de alto desempeño, (UNIVERSIDAD DE CUENCA Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Civil, 2005.) evidencian que la combinación adecuada entre aditivos reductores de agua y cementantes suplementarios mejora la trabajabilidad, incrementa la densidad del material y reduce la absorción, lo que se traduce en un mejor comportamiento mecánico y mayor durabilidad.

La literatura reciente señala que la efectividad de los aditivos no depende únicamente de su composición química, sino también del método de mezclado empleado. Investigaciones como las de (Shcherban' et al., 2022) describen que los procesos de alta energía, como la homogeneización a 20.000 rpm, pueden alterar temporalmente la estructura molecular de los polímeros presentes en algunos aditivos. Esto provoca que su acción se modifique en las primeras horas, aunque a largo plazo favorece una mayor homogeneidad y un desarrollo más eficiente de la hidratación. Estudios complementarios sobre el uso de ultrasonido en matrices cementicias, como los de (Remus, 2022), confirman que la energía mecánica intensa contribuye a formar microestructuras más compactas y con menor porosidad.

La normativa ASTM C494 clasifica los aditivos en función del efecto que producen en la mezcla, como reductores de agua, acelerantes, retardantes, incorporadores de aire, inhibidores de corrosión o reductores de contracción. Esta clasificación permite seleccionar el tipo de aditivo adecuado para las condiciones del proyecto y el comportamiento esperado del hormigón. La guía ACI 211 también destaca que el momento de incorporación del aditivo es un factor determinante en su desempeño, ya que una adición temprana puede influir en la hidratación inicial del cemento, mientras que una adición posterior puede favorecer la trabajabilidad sin alterar significativamente la estructura interna del material.

En el contexto de esta investigación, resulta especialmente relevante analizar el efecto del aditivo en tres condiciones distintas: incorporado antes del proceso de homogeneización, añadido después del homogeneizado y aplicado en un mezclado tradicional. Estas variaciones permiten evaluar cómo la energía de corte, la secuencia de mezclado y el tiempo de interacción entre el aditivo y el cemento modifican la reología del hormigón y su resistencia temprana.

(Neville, 2012), advierte que, aunque los aditivos aportan múltiples beneficios, su dosificación debe realizarse con precisión, ya que un exceso puede generar segregación, retrasos excesivos en el fraguado o inestabilidad en la mezcla. Por esta razón, las normas internacionales recomiendan efectuar ensayos preliminares para verificar la compatibilidad entre el aditivo, el cemento y los agregados utilizados.

### **1.7.1 Aditivo Hiperplastificante**

Los aditivos hiperplastificantes basados en poli carboxilatos (PCE) representan uno de los avances más importantes en la tecnología del hormigón, especialmente por su capacidad para modificar de manera efectiva la reología y el comportamiento mecánico de la mezcla. Su mecanismo principal se basa en la dispersión eficiente de las partículas de cemento a través de una estructura química tridimensional que ejerce efectos estéricos y electrostáticos. Esta dispersión evita la formación de aglomerados y permite que la hidratación ocurra de forma más uniforme y controlada, lo cual mejora tanto la trabajabilidad en estado fresco como la resistencia mecánica en edades posteriores. De acuerdo con (M. Palacios F. P., 2005) la compatibilidad de los PCE con distintos tipos de cemento no es constante y depende de la composición mineralógica del Clinker y de la presencia de adiciones como escoria o cenizas. En cementos con mayor contenido de materiales suplementarios, el efecto fluidificante suele ser más intenso, permitiendo mayores reducciones de agua sin comprometer la cohesión de la mezcla.

Una de las ventajas más relevantes de los PCE es su capacidad para proporcionar una elevada fluidez incluso en mezclas con relaciones agua/cemento muy reducidas, aspecto fundamental en hormigones destinados a altas resistencias. (P. Kumar Mehta, 2006) señalan que este tipo de aditivos no solo mejoran la distribución de partículas en el estado fresco, sino que contribuyen a una matriz endurecida más compacta y con menor porosidad. Esto se traduce en un hormigón más resistente frente a agentes agresivos como cloruros y sulfatos, disminuyendo los riesgos de deterioro prematuro y aumentando

significativamente la vida útil de las estructuras. La reducción de la segregación y la exudación es otro aspecto crucial, ya que asegura una mezcla estable y adecuada para aplicaciones en elementos con alta densidad de refuerzo o geometrías complejas.

Desde el punto de vista económico y operativo, (Neville, 2012) destaca que los polis carboxilatos permiten optimizar procesos constructivos al disminuir la necesidad de vibración, facilitar el llenado de encofrados y acelerar tiempos de fraguado en ciertos casos. En contextos como prefabricación, pavimentos o intervenciones que requieren rápida habilitación, estos aditivos pueden reducir costos asociados a mano de obra, tiempos de obra e incluso tiempos de inactividad relacionados con cierres viales. Esto se debe a la capacidad del PCE de mantener la fluidez sin añadir agua adicional, lo que produce un hormigón más fácil de colocar y con mejores propiedades finales.

La selección del aditivo hiperplastificantes de poli carboxilato para este estudio se justifica por su capacidad de mejorar la homogeneidad de las mezclas, un aspecto fundamental cuando se trabaja con procesos de homogeneización de alta energía. Al distribuir las partículas de cemento de manera más uniforme, se minimiza la variabilidad interna de las muestras y se garantiza que cada lote mantenga condiciones similares de trabajabilidad y cohesión. Esto resulta especialmente importante en investigaciones experimentales donde se comparan diferentes métodos de mezcla o secuencias de incorporación del aditivo.

(Carrasco, 2013.) explica que el uso de estos aditivos permite obtener hormigones con excelente trabajabilidad sin incrementar la cantidad de agua o cemento, lo cual facilita la colocación del material en zonas de difícil acceso o con alta congestión de acero. Además, la disminución en la relación agua/cemento aumenta la compacidad del hormigón, mejorando su resistencia, impermeabilidad y durabilidad. A su vez, esta compacidad reduce la formación de micro fisuras asociadas a retracción, generando mezclas más estables y con un mejor desempeño estructural a largo plazo.

No obstante, es indispensable considerar que la dosificación de los PCE debe realizarse con precisión. Una cantidad excesiva puede generar una mezcla excesivamente fluida, comprometiendo la estabilidad, la resistencia mecánica y la capacidad de control durante el vaciado. Por ello, las normativas internacionales recomiendan ajustar la dosis con base en ensayos previos y condiciones específicas de cada proyecto.

En conjunto, los polis carboxilatos constituyen un aditivo de alto rendimiento que no solo mejora la trabajabilidad y la resistencia del hormigón, sino que también favorece su durabilidad, reduce costos operativos y facilita el cumplimiento de requisitos técnicos exigentes. Estas características los convierten en la opción más adecuada para investigaciones que requieren mezclas homogéneas, con baja relación agua/cemento y con un comportamiento estable frente a condiciones experimentales controladas.

### **1.8 Tiempo de evaluación de experimentos**

Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del hormigón bajo diferentes condiciones de mezclado, se estableció un programa de ensayos de compresión en tres edades específicas:

- Día 1
- Día 2
- Día 28

La elección de estos tiempos responde a criterios ampliamente documentados en la literatura técnica. Según (Neville, 2012), el desarrollo de la resistencia a compresión en el hormigón ocurre de manera acelerada durante los primeros días debido a la hidratación inicial del cemento, etapa en la cual se forman los compuestos responsables del incremento rápido en la rigidez y cohesión interna del material.

Posteriormente, a los 28 días, el hormigón alcanza lo que se considera su resistencia característica, correspondiente al estándar utilizado en la mayoría de especificaciones de diseño estructural.

Este comportamiento inicial reviste especial importancia en investigaciones donde se pretende analizar la influencia de técnicas de mezclado no convencionales, como el uso de homogeneizadores de alta velocidad. (Menéndez et al., 2008.), destacan la relevancia de estudiar la resistencia temprana, ya que esta etapa está estrechamente vinculada con la eficiencia de los procesos constructivos y con la posibilidad de habilitar elementos estructurales en menor tiempo. En este sentido, resulta fundamental determinar si el homogeneizador modifica la cinética de hidratación del cemento y, por ende, el desarrollo inicial de resistencia.

Bajo esta perspectiva, la ejecución de los ensayos en los días 1 y 2 permitirá analizar la evolución inmediata del hormigón y verificar si existen diferencias significativas

atribuibles al proceso de homogeneización. Por su parte, el ensayo del día 28 brindará un panorama definitivo sobre la resistencia a largo plazo, permitiendo establecer comparaciones con los valores esperados según normas técnicas y con el comportamiento de mezclas elaboradas mediante el método convencional. Esta combinación de edades proporciona una visión integral del desempeño mecánico del material bajo estudio.

Para garantizar una evaluación adecuada y estadísticamente uniforme, se fabricaron un total de 36 cilindros, distribuidos equitativamente entre las tres condiciones experimentales definidas. En cada caso, se elaboraron 12 cilindros, los cuales fueron divididos en tres etapas correspondientes a las edades de ensayo: cuatro cilindros para el día 1, cuatro para el día 2 y cuatro para el día 28.

La primera serie corresponde a la mezcla en la cual el aditivo hiperplastificantes se incorporó antes del proceso de homogeneización, con el fin de analizar cómo la energía de corte influye en la acción química del aditivo. La segunda serie contempla la adición del aditivo después del homogeneizador, evaluando la interacción del polímero con una pasta previamente dispersada. Finalmente, la tercera serie se elaboró mediante el método convencional, sirviendo como grupo de control para la comparación de los resultados.

Esta sectorización en tres etapas y tres métodos de mezcla permite analizar el efecto del homogeneizador en diferentes momentos del proceso y determinar si su uso favorece el desarrollo temprano de resistencia, si modifica la tendencia entre los días 1 y 2, o si influye en la resistencia final a los 28 días. De esta forma, el diseño experimental proporciona una base sólida para evaluar de manera rigurosa el potencial del homogeneizador de alta velocidad como alternativa en la producción de hormigones con mejores propiedades mecánicas y mayor uniformidad.

### **1.9 Justificación de elaboración del diseño y sus etapas de producción**

El diseño experimental se fundamenta en la necesidad de analizar la interacción entre el método de mezclado y el comportamiento del aditivo hiperplastificante. Para ello, se plantean diferentes escenarios de incorporación del aditivo dentro del proceso de producción, con el objetivo de identificar cómo la energía de homogeneización influye en su efectividad. Esta estrategia permite no solo comparar resultados, sino también comprender el origen de las variaciones en la resistencia del hormigón.

Como se mencionó anteriormente, el empleo de un homogeneizador de alta velocidad permite obtener mezclas con un nivel superior de uniformidad, ya que acelera la

dispersión de las partículas dentro del fluido y reduce la presencia de aglomeraciones. Esta acción mecánica favorece una distribución más eficiente del cemento, los agregados finos y los aditivos, generando una mezcla más estable y homogénea. De acuerdo con (Zambrano Navarrete *et al.*, 2022), intervenir directamente en la microestructura del hormigón mediante procesos de alta energía puede disminuir la variabilidad en la resistencia, optimizar el desempeño mecánico del material y, en algunos casos, incluso permitir reducciones sostenibles en el contenido de cemento gracias a una mejor compactación interna.

En este contexto, la presente investigación evalúa un único aditivo hiperplastificantes basado en poli carboxilatos, pero aplicado en dos etapas distintas del proceso de producción: antes y después de la homogeneización. Esta decisión metodológica responde a la necesidad de comprender cómo la secuencia de incorporación del aditivo influye en su capacidad de dispersión y, por consecuencia, en el desarrollo de la resistencia temprana. Incorporar el aditivo antes del homogeneizado permite que sus polímeros interactúen directamente con la energía de cizalla, lo cual podría modificar temporalmente su estructura o potenciar su efecto sobre la pasta cementicia. En cambio, añadirlo después del proceso de homogeneización posibilita evaluar su comportamiento en una mezcla previamente dispersada, donde el cemento ya ha sido sometido a una desagregación más fina.

La comparación de estos dos métodos de incorporación ofrece un análisis más profundo del proceso de producción del hormigón, especialmente porque la resistencia temprana depende en gran medida de la hidratación inicial del cemento y de la eficiencia con la que las partículas se encuentran distribuidas en la mezcla. Al estudiar cómo el aditivo interactúa con la pasta en momentos diferentes, se espera determinar si el orden de incorporación mejora la fluidez, la cohesión y, particularmente, el desarrollo de la resistencia en los primeros días, que es uno de los aspectos clave de este trabajo.

Finalmente, al integrar estas variaciones en el proceso de mezclado con el método tradicional como referencia, el estudio busca identificar si el uso del homogeneizador, combinado con una adecuada estrategia de incorporación del aditivo, puede convertirse en una herramienta viable para mejorar la resistencia inicial del hormigón. Esta información es esencial para aplicaciones donde el rápido desarrollo de resistencia es determinante, como en prefabricados, reparaciones urgentes o proyectos que requieren acelerar la puesta en servicio de elementos estructurales. De esta manera, la investigación

no solo aborda una necesidad técnica, sino que también aporta evidencia sobre nuevas prácticas de producción que pueden contribuir a la optimización del hormigón en la industria de la construcción.

## **2. Capítulo 2**

En este capítulo se detalla de manera técnica el proceso de fabricación de las muestras de hormigón utilizadas para llevar a cabo los experimentos de esta investigación. El objetivo principal es evaluar el impacto de un homogeneizador de alta velocidad y un aditivo hiperplastificante en la resistencia temprana del hormigón, comparando tres enfoques distintos en la etapa de su producción: la mezcla tradicional, la mezcla con aditivo antes del homogeneizador y la mezcla con aditivo después del homogeneizador. Cada metodología tiene una influencia distinta en las propiedades del material, especialmente en lo que respecta a la resistencia en las primeras etapas de curado.

### **2.1 Proceso de la Fabricación de las Muestras**

El proceso de fabricación de las muestras se desarrolló en varias etapas, desde la preparación de los materiales hasta la mezcla y moldeado del hormigón en cilindros. Cada uno de estos pasos es clave para garantizar la consistencia y homogeneidad del material final, lo que tiene un impacto directo en las propiedades mecánicas del hormigón. A continuación, se describe cada etapa del proceso, detallando las herramientas utilizadas, las dosificaciones empleadas y las precauciones tomadas para asegurar la calidad del hormigón.

#### **2.1.1 Preparación de los Materiales**

La preparación de los materiales es el primer paso crucial en la fabricación del hormigón. Los materiales fueron pesados y medidos de acuerdo con las dosificaciones previamente establecidas en el Capítulo 1. Las cantidades de cemento Portland, agua, arena, grava y aditivo fueron ajustadas para cada tipo de mezcla (tradicional, aditivo antes del homogeneizador y aditivo después del homogeneizador). A lo largo de este proceso, se tuvo en cuenta la calidad de los materiales y las propiedades deseadas para las muestras, garantizando que el hormigón cumpliera con las especificaciones necesarias.

- **Cemento:** El cemento Portland utilizado fue de alta calidad, seleccionado por su capacidad para alcanzar las resistencias esperadas a lo largo del tiempo.
- **Agregados (Arena y Grava):** Los agregados finos y gruesos fueron seleccionados por su granulometría, siguiendo las recomendaciones de las normas internacionales para asegurar una buena integración de los componentes y una mezcla homogénea.

- Agua: Se utilizó agua potable limpia y libre de impurezas para garantizar que no se produjeran reacciones indeseadas que pudieran afectar la hidratación del cemento.
- Aditivo hiperplastificante (PCE): El aditivo utilizado fue un superplastificante a base de policarboxilatos (PCE), conocido por su capacidad para mejorar la fluidez del hormigón y reducir la relación agua/cemento sin comprometer la resistencia final.

## **2.2 Mezcla de los Materiales**

Una vez preparados los materiales, se procedió a la mezcla de acuerdo con las tres metodologías de mezcla propuestas:

### **Método Tradicional (Mezcla Convencional)**

En el método tradicional, se pesó la cantidad de material necesaria para la elaboración de cuatro cilindros correspondientes a cada edad de curado. No obstante, el proceso de mezclado se realizó en dos etapas, preparando en cada una el volumen equivalente a dos cilindros.

Para determinar el volumen de mezcla, se consideró que cada cilindro posee un volumen aproximado de 1,57 L, al cual se añadió un 15 % adicional de material con el fin de compensar posibles pérdidas durante el proceso de mezclado y colocación en los moldes.

Una vez pesados todos los materiales, se inició el proceso de mezcla. En primer lugar, se realizó una premezcla manual para integrar de forma inicial los componentes. Posteriormente, los materiales se introdujeron en el mezclador, comenzando con los agregados finos y gruesos, seguidos del cemento, y finalmente se incorporó el agua previamente mezclada con el aditivo.

La mezcla se realizó utilizando un taladro equipado con una broca mezcladora, operado a baja velocidad durante aproximadamente 5 a 7 minutos, con el objetivo de lograr una adecuada integración de los componentes y obtener una mezcla lo más homogénea posible.

### Homogeneizador de Alta Velocidad (Aditivo antes del proceso)

El proceso con homogeneizador de alta velocidad comenzó con la adición de los materiales en el homogeneizador, que operó en un rango de 2,000 a 7,000 revoluciones por minuto (rpm), la velocidad máxima permitida por el equipo. Este proceso de alta energía genera una cizalla, lo que mejora la dispersión de las partículas de cemento, mejorando la integridad y consistencia de la mezcla.

- Proceso: se agregó al homogeneizador la mitad de peso requerido para dos cilindros de cemento, agua y aditivo. La mitad del aditivo superplastificante se agregó antes de que los materiales se sometieron al proceso de mezcla, permitiendo que el aditivo interactuara directamente con el cemento y agua de manera aislada, esto contribuye a una mejor dispersión y reduce la cantidad de agua requerida para obtener la fluidez adecuada.
- Duración: el proceso de mezcla fue realizado durante 5 minutos a la velocidad en un rango de 2,000 a 7,000 rpm, lo que permitió una mezcla completamente homogénea y optimizada para mejorar la dispersión de los componentes.

### Homogeneizador de Alta Velocidad (Aditivo después del proceso)

El tercer proceso de mezcla utilizó el mismo homogeneizador de alta velocidad, pero en este caso, el aditivo fue incorporado después del proceso de homogeneización. Este enfoque permitió estudiar cómo la adición del aditivo a una mezcla que ya ha sido homogeneizada influye en la trabajabilidad y las propiedades mecánicas del hormigón.

- Proceso: Los materiales fueron mezclados en el homogeneizador a alta velocidad y, una vez completada la homogeneización, se introdujo el aditivo hiperplastificante. Esto permitió evaluar el efecto de la incorporación del aditivo en una mezcla que ya había sido sometida a una alta cizalla, lo que puede alterar la manera en que el aditivo dispersa las partículas de cemento.
- Duración: Al igual que el proceso anterior, el homogeneizador operó en un rango de 2,000 a 7,000 rpm durante 5 minutos. El aditivo se incorporó en la segunda fase, al final de la mezcla.

### **2.2.1 Montaje y colocación en cilindros**

Una vez que la mezcla fue preparada, se procedió a verterla en los moldes de cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, siguiendo las normas estándar para ensayos de compresión. En esta etapa se empleó un martillo de silicón para vibrar con el cual se garantiza la menor cantidad de burbujas de aire atrapadas en la mezcla y que la distribución de los materiales dentro del molde fuera lo más uniforme posible.

Para el vaciado el hormigón se vertió cuidadosamente en los cilindros, asegurando que la mezcla llegará a cada rincón del molde. Igualmente, el proceso de vaciado se realizó en 3 etapas para cada cilindro, se colocaba una capa inicial, y se procedía a la compactación de la mezcla por medio del varillado, 25 golpes por capa. Este paso es crucial para obtener una muestra compacta y homogénea que represente fielmente las condiciones de la mezcla.

Vibración: Durante el vaciado, se utilizó un martillo de silicón para vibrar y así eliminar las burbujas de aire y asegurar que el hormigón se compactara adecuadamente dentro del molde, evitando la formación de zonas débiles en la muestra.

### **2.2.2 Curado**

Después de moldear las muestras, se procedió al curado en condiciones controladas. Las muestras fueron curadas a una temperatura constante de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y en un ambiente con 100% de humedad relativa, condiciones que garantizan que el proceso de hidratación del cemento se desarrolle correctamente sin interrupciones.

Tiempo de Curado: Las muestras fueron curadas en tres etapas siguiendo la metodología ya establecida de 24 horas, 48 horas y 28 días, con mediciones de resistencia a compresión en estos intervalos. Estos intervalos son fundamentales para observar la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo.

En el caso de las muestras cuya rotura se realizó a los 28 días, posterior al desmolde de los cilindros a las 24 horas, se procedió a introducir los cilindros en agua hasta el ensayo de compresión, proceso que no se realizó con los cilindros cuya rotura se llevó a cabo a las 24 y 48 horas.

### **2.2.3 Ajuste de la Cantidad de Agua y el Uso del Aditivo**

El control de la cantidad de agua en la mezcla se ha fijado en una relación de 0.4 con respecto al peso del cemento (agua/cemento). Asimismo, el aditivo se ha incorporado en una proporción equivalente al 1% del peso total del cemento utilizado en la formulación.

- Relación agua-cemento ( $w/c = 0.4$ ): Una relación baja de agua-cemento contribuye a un aumento en la resistencia del hormigón, al reducir la porosidad de la mezcla y formar una estructura más densa. No obstante, esta reducción en la cantidad de agua puede afectar la trabajabilidad de la mezcla, dificultando su manejo y colocación. El uso de aditivos, como los superplastificantes, permite mantener la fluidez de la mezcla sin comprometer la resistencia del material.
- Aditivo (1% del peso del cemento): La incorporación de aditivos en una proporción del 1% respecto al peso del cemento tiene como principal objetivo mejorar la fluidez del hormigón, optimizando la distribución del cemento y reduciendo la fricción interna. Esto facilita el proceso de mezcla. Además, el aditivo puede acelerar la hidratación del cemento, promoviendo un incremento de la resistencia temprana y contribuyendo a una reducción significativa de la permeabilidad del hormigón.

### **2.3 Evaluación de la Resistencia Temprana**

La resistencia temprana del hormigón constituye uno de los parámetros más importantes dentro del estudio del comportamiento mecánico del material en sus primeras edades. En ingeniería civil, la evaluación de la resistencia a compresión en edades tempranas permite conocer la velocidad con la que el hormigón desarrolla su capacidad portante después del proceso de fraguado y durante las primeras etapas de hidratación del cemento.

El análisis de la resistencia temprana resulta fundamental en diversas aplicaciones de la ingeniería, ya que permite optimizar los procesos constructivos, reducir los tiempos de ejecución de obra y garantizar condiciones adecuadas de seguridad estructural durante las etapas iniciales de carga. En proyectos de infraestructura, edificaciones, pavimentos y elementos prefabricados, conocer el desarrollo inicial de la resistencia del hormigón facilita la toma de decisiones relacionadas con el desencofrado, la aplicación de cargas tempranas, el avance de las etapas constructivas y la programación de los tiempos de curado.

Desde el punto de vista del comportamiento del material, el desarrollo de la resistencia temprana está directamente relacionado con el proceso de hidratación del cemento, la relación agua-cemento, la calidad y distribución de los agregados, el uso de aditivos químicos y las condiciones de mezclado y curado. Una adecuada dispersión de los componentes de la mezcla favorece una hidratación más uniforme de las partículas de cemento, lo que contribuye a la formación de una microestructura más densa y a un incremento más rápido de la resistencia mecánica.

En los últimos años, diversos estudios han investigado métodos alternativos de mezclado y tecnologías que permitan mejorar el desarrollo inicial de la resistencia del hormigón. Entre estas tecnologías se encuentra el uso de homogeneizadores de alta velocidad, los cuales permiten una mejor dispersión de los materiales cementantes y de los aditivos dentro de la mezcla, favoreciendo una distribución más uniforme de las partículas y optimizando el proceso de hidratación del cemento.

La evaluación de la resistencia temprana, generalmente realizada mediante ensayos de compresión a edades de 24 y 48 horas, permite analizar el comportamiento inicial del material y comparar diferentes métodos de fabricación del hormigón. Este tipo de análisis es especialmente relevante en investigaciones orientadas a mejorar el rendimiento del hormigón, reducir tiempos de construcción y desarrollar mezclas con mayor eficiencia estructural.

En este contexto, el presente estudio se enfoca en evaluar el comportamiento del hormigón en edades tempranas mediante ensayos de resistencia a compresión, comparando el método tradicional de mezclado con un proceso que incorpora el uso de un homogeneizador de alta velocidad. El objetivo principal es analizar si la incorporación de esta tecnología influye en el desarrollo inicial de la resistencia del material y determinar su potencial aplicación en procesos constructivos donde se requiera una ganancia temprana de resistencia.

#### **2.4 Muestras elaboradas en base al método tradicional de fabricación de hormigón**

Las muestras de hormigón elaboradas mediante el método tradicional de fabricación, el cual corresponde al procedimiento convencional de mezclado utilizado comúnmente en obras y ensayos de laboratorio. Este proceso consiste en la dosificación de los materiales que conforman la mezcla: cemento, agregados, agua y aditivo. Seguida de su mezclado en una concreteira con el objetivo de obtener una distribución uniforme de todos los

componentes. Para esta investigación, la mezcla tradicional también incorporó el mismo aditivo hiperplastificante utilizado en las demás configuraciones experimentales, con el fin de mantener condiciones similares entre los diferentes métodos de fabricación. De esta manera, se busca que la comparación entre el método tradicional y el método que utiliza el homogeneizador de alta velocidad sea lo más justa posible, permitiendo evaluar de forma más precisa el efecto que tiene el proceso de homogeneización sobre las propiedades del hormigón, especialmente en el desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas y a los 28 días de curado.

El procedimiento para la elaboración de las muestras de hormigón mediante el método tradicional se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos que permitieron asegurar la correcta preparación de la mezcla y la uniformidad de los materiales.

Paso 1: Preparación de los materiales:

En esta etapa inicial se realizó la preparación y dosificación de los materiales necesarios para la elaboración de los cilindros de hormigón. Primero se determinó la cantidad de mezcla requerida para fabricar un cilindro de ensayo basado en cantidades para un m<sup>3</sup> de hormigón, considerando además un 15 % adicional de material con el fin de compensar posibles pérdidas durante el proceso de mezclado, manipulación y moldeo. Posteriormente, este volumen fue multiplicado por el número total de cilindros que se iban a elaborar, lo que permitió calcular las cantidades totales de cemento, agregados finos (arena), agua y aditivo hiperplastificante requeridas para la mezcla.

Una vez definidas las cantidades necesarias, se procedió al pesaje individual de cada material utilizando una balanza de precisión, con el objetivo de garantizar que las proporciones del diseño de mezcla se mantuvieran de forma adecuada. Después del pesaje, cada material fue separado y organizado previamente antes de iniciar el proceso de mezclado, lo cual permitió facilitar la secuencia de incorporación de los componentes dentro del lugar de mezclado y asegurar una correcta preparación de la mezcla destinada a la elaboración de los cilindros de ensayo.

Figure 1 Pesos de material método tradicional



Fuente: Elaboración propia

## Paso 2: Proceso de mezclado de los materiales

Una vez realizada la dosificación y el pesaje de los materiales en la etapa anterior, se procedió al proceso de mezclado del hormigón. Como parte del procedimiento, el aditivo hiperplastificante fue previamente incorporado al agua, realizándose una mezcla inicial entre ambos con el fin de lograr una adecuada dilución del aditivo antes de su incorporación al resto de los materiales. Posteriormente, esta solución de agua con aditivo fue añadida progresivamente a la mezcla de cemento y agregados finos previamente colocados en el recipiente de mezclado, lo que permitió favorecer una mejor dispersión del aditivo dentro de toda la mezcla.

Se inició la incorporación de los componentes con un pre mezclado manualmente para lograr una integración inicial de los materiales después, el proceso de mezclado se realizó utilizando un taladro eléctrico acoplado a una herramienta mezcladora tipo hélice, comúnmente utilizada para la mezcla de pinturas, la cual permitió generar un movimiento rotacional capaz de integrar de manera uniforme los materiales.

El mezclado se mantuvo durante el tiempo necesario hasta obtener una mezcla homogénea y con buena trabajabilidad, procurando que todos los materiales se integraran correctamente. Para facilitar el control del proceso y mantener uniformidad en las

muestras, cada mezcla preparada se utilizó para elaborar dos cilindros de ensayo. Este procedimiento se repitió para cada grupo de probetas necesarias dentro del experimento, permitiendo trabajar con cantidades manejables de mezcla y asegurando una adecuada preparación del hormigón antes de realizar el proceso de moldeo de los cilindros.

*Figure 2 Proceso de mezclado método tradicional*



*Fuente: Elaboración propia*

### Paso 3: Moldeo y compactación de los cilindros

Antes de iniciar el proceso de moldeo, se realizó la limpieza y preparación de los moldes cilíndricos que se utilizarían para la elaboración de las probetas. Posteriormente, los moldes fueron aceitados en su parte interna, con el fin de evitar que el hormigón se adhiera a las paredes del molde y facilitar el proceso de desmolde una vez finalizado el tiempo de curado.

Una vez preparados los moldes, se procedió a colocar la mezcla de hormigón en su interior. El llenado de los moldes se realizó en tres capas aproximadamente iguales. En cada capa se aplicaron 25 golpes utilizando una varilla lisa de 5/8 de pulgada, lo que permitió compactar adecuadamente el hormigón, eliminar posibles burbujas de aire atrapadas y asegurar una mejor distribución del material dentro del molde.

Adicionalmente, para mejorar la compactación de la mezcla, se aplicaron golpes en los laterales del molde utilizando un martillo de goma. Estos golpes se realizaron alrededor

de toda la circunferencia del cilindro, aplicando aproximadamente 10 golpes por cada lado, lo que en total representó 40 golpes alrededor del molde. Este procedimiento ayudó a liberar el aire atrapado en las paredes del molde y a mejorar la acomodación del hormigón dentro del cilindro.

Finalmente, una vez completado el llenado del molde, se procedió a alisar la superficie superior del hormigón, con el objetivo de obtener una superficie plana y uniforme. Posteriormente, las probetas fueron identificadas y dejadas en reposo para iniciar su proceso de curado, permitiendo así el adecuado desarrollo de sus propiedades mecánicas antes de la realización de los ensayos de resistencia a compresión.

*Figure 3 Proceso del moldeo método tradicional*



*Fuente: Elaboración propia*

## **2.5 Muestras elaboradas usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo antes del proceso)**

Las muestras de hormigón elaboradas mediante el uso del homogeneizador de alta velocidad corresponden a un método de mezclado alternativo al procedimiento tradicional, cuyo objetivo es mejorar la dispersión de los componentes de la mezcla mediante la aplicación de mayor energía de mezclado. Este proceso consiste igualmente en la dosificación de los materiales que conforman la mezcla: cemento, agregados, agua y aditivo hiperplastificante. Sin embargo, a diferencia del método convencional, el proceso de integración de los materiales se realiza utilizando un homogeneizador de alta

velocidad, el cual genera fuerzas de corte más intensas que permiten lograr una distribución más uniforme de los componentes dentro de la mezcla.

Para esta configuración experimental, el aditivo hiperplastificante fue incorporado previamente al agua de mezclado, realizando una mezcla inicial entre ambos antes de su incorporación al resto de los materiales. Esta estrategia se aplicó con el propósito de facilitar una mejor dispersión del aditivo dentro de la mezcla y evaluar su comportamiento cuando es introducido antes del proceso de homogeneización. En este procedimiento, el proceso de homogeneización se realizó únicamente con una parte de los materiales, específicamente utilizando la mitad del cemento y agua que contenía previamente el aditivo ya diluido. Esta etapa permitió generar una pasta inicial más homogénea antes de integrar el resto de los componentes de la mezcla.

El procedimiento para la elaboración de las muestras de hormigón utilizando el homogeneizador de alta velocidad con el aditivo añadido antes del proceso de mezclado se desarrolló siguiendo una serie de pasos que permitieron mantener el control del experimento y asegurar la correcta preparación de las mezclas. Este procedimiento fue diseñado con el fin de comparar los resultados obtenidos con los del método tradicional de fabricación, permitiendo evaluar con mayor precisión el efecto que tiene el proceso de homogeneización sobre las propiedades del hormigón, especialmente en el desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas y a los 28 días de curado.

El procedimiento para la elaboración de las muestras de hormigón mediante el método usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo antes del proceso) se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos que permitieron asegurar la correcta preparación de la mezcla y la uniformidad de los materiales.

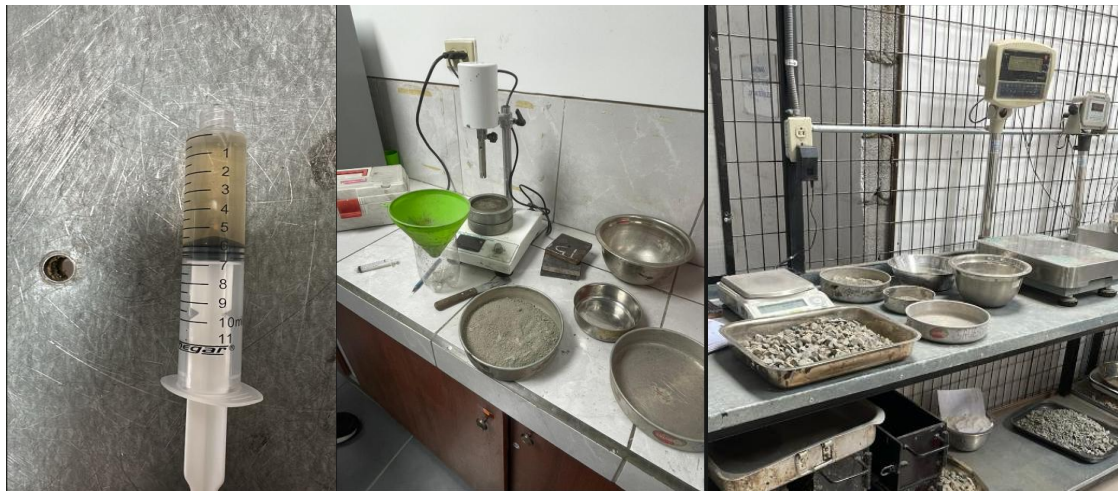
#### Paso 1: Preparación y dosificación de los materiales

En esta primera etapa se realizó la preparación y dosificación de los materiales necesarios para la elaboración de los cilindros de hormigón. Para ello, inicialmente se calculó la cantidad de mezcla requerida para la fabricación de un cilindro de ensayo, considerando además un 15 % adicional de material, con el fin de compensar posibles pérdidas durante el proceso de mezclado, manipulación y moldeo. Posteriormente, este volumen fue multiplicado por el número total de cilindros que se iban a elaborar, lo que permitió determinar las cantidades necesarias de cemento, agregados finos (arena), agua y aditivo hiperplastificante.

Una vez obtenidas las cantidades correspondientes, cada material fue pesado individualmente utilizando una balanza, con el objetivo de mantener las proporciones establecidas en el diseño de mezcla. En esta configuración experimental, el aditivo hiperplastificante fue previamente incorporado al agua de mezclado, realizándose una mezcla inicial entre ambos para asegurar su correcta dilución antes de su incorporación al resto de los materiales.

Adicionalmente, para el proceso de mezclado mediante el homogeneizador de alta velocidad, se separó previamente una parte de los materiales, específicamente la mitad del cemento y una porción del agua que ya contenía el aditivo previamente mezclado, los cuales serían utilizados en la etapa de homogeneización inicial. Finalmente, todos los materiales fueron organizados y preparados previamente, con el fin de facilitar el proceso de mezclado y asegurar un mejor control durante la elaboración de las mezclas experimentales.

*Figure 4 Pesos de material homogeneizador (ADITIVO ANTES)*



*Fuente: Elaboración propia*

## Paso 2: Proceso de mezclado mediante homogeneizador de alta velocidad

Una vez preparados y pesados los materiales, se procedió al proceso de mezclado utilizando el homogeneizador de alta velocidad para este proceso se separó específicamente la mitad del cemento, agua y aditivo, los cuales fueron colocados en un recipiente independiente, se procedió a mezclarlos manualmente por aproximadamente un minuto previo al proceso de homogeneización, con la finalidad de una mejor integración de los mismos y evitar grumos en el homogeneizador.

Posteriormente, esta premezcla fue sometida al proceso de homogeneización utilizando el homogeneizador de alta velocidad, el cual se operó a una velocidad aproximada en un rango de 2,000 a 7,000 rpm durante 5 minutos. Durante este tiempo se procuró que el equipo tuviera contacto con toda la mezcla dentro del recipiente, permitiendo que el homogeneizador alcance todas las zonas del material y así lograr una homogeneización más uniforme de la pasta formada por cemento, agua y aditivo.

Una vez finalizado el proceso de homogeneización, la mezcla obtenida fue incorporada al resto de los materiales previamente preparados, que correspondían a los agregados y la porción restante de cemento, agua y aditivo. Inicialmente, todos los componentes fueron mezclados manualmente para lograr una integración inicial de los materiales después, el proceso de mezclado continuó utilizando un taladro eléctrico acoplado a una herramienta mezcladora tipo hélice, comúnmente utilizada para la mezcla de pinturas. Este equipo generó un movimiento rotacional constante, permitiendo integrar de manera más uniforme todos los componentes de la mezcla y mejorar la distribución del cemento, los agregados y el agua dentro del sistema, hasta obtener una mezcla con consistencia homogénea y adecuada trabajabilidad.

Finalmente, cada mezcla preparada fue utilizada para la elaboración de dos cilindros de ensayo, repitiendo este procedimiento para cada conjunto de muestras necesarias dentro del programa experimental.

*Figure 5 Proceso de mezclado homogeneizador (ADITIVO ANTES)*



*Fuente: Elaboración propia*

**Paso 3: Moldeo y compactación de los cilindros**

Una vez obtenida la mezcla final después del proceso de homogeneización e integración con el resto de los materiales, se procedió al proceso de moldeo de los cilindros de ensayo. Previamente, los moldes cilíndricos fueron limpiados y preparados, asegurando que se encontraran libres de residuos de mezclas anteriores. Posteriormente, se aplicó aceite en la superficie interna de los moldes, con el propósito de evitar la adherencia del hormigón a las paredes del molde y facilitar el desmolde de las probetas una vez finalizado el tiempo de curado.

A continuación, la mezcla de hormigón fue colocada dentro de los moldes cilíndricos en tres capas aproximadamente iguales. Cada capa fue compactada mediante la aplicación de 25 golpes utilizando una varilla lisa de 5/8 de pulgada, lo cual permitió mejorar la acomodación del hormigón dentro del molde, reducir la presencia de vacíos y favorecer una distribución más uniforme de la mezcla.

De manera adicional, con el fin de mejorar la compactación y liberar el aire que pudiera quedar atrapado en las paredes del molde, se aplicaron golpes en los laterales del cilindro utilizando un martillo de goma. Estos golpes se realizaron alrededor de toda la circunferencia del molde, aplicando aproximadamente 10 golpes por cada lado, lo que en total correspondió a 40 golpes distribuidos alrededor del cilindro.

Finalmente, una vez completado el llenado y compactación del molde, se procedió a alisar la superficie superior del hormigón, buscando obtener una superficie plana y uniforme. Posteriormente, cada probeta fue identificada correctamente y dejada en reposo para iniciar su proceso de curado, permitiendo el adecuado desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón antes de realizar los ensayos de resistencia a compresión.

*Figure 6 Proceso del moldeo homogeneizador (ADITIVO ANTES)*



*Fuente: Elaboración propia*

## **2.6 Muestras elaboradas usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo después del proceso)**

Las muestras de hormigón elaboradas mediante el uso del homogeneizador de alta velocidad corresponden a un método de mezclado alternativo al procedimiento tradicional, cuyo objetivo es mejorar la dispersión de los componentes de la mezcla mediante la aplicación de mayor energía de mezclado. Al igual que en los otros métodos experimentales, la mezcla estuvo compuesta por cemento, agregados, agua y aditivo hiperplastificante. Sin embargo, en este caso el proceso de integración inicial de los materiales se realizó mediante un homogeneizador de alta velocidad, el cual genera fuerzas de corte que favorecen una mejor distribución de las partículas dentro de la mezcla.

A diferencia del procedimiento donde el aditivo se incorpora antes de la homogeneización, en esta configuración experimental el aditivo hiperplastificante fue añadido después del proceso de homogeneización. En primer lugar, se realizó la homogeneización utilizando una parte del cemento y del agua de mezclado, con el fin de formar una pasta inicial más uniforme mediante la acción del homogeneizador.

Posteriormente, esta mezcla homogeneizada fue incorporada al resto de los materiales, momento en el cual se añadió el aditivo hiperplastificante junto con los demás componentes, permitiendo analizar el comportamiento del aditivo cuando es introducido después del proceso de homogeneización. Este procedimiento permitió comparar los resultados obtenidos con los otros métodos de mezclado y evaluar su influencia en las propiedades del hormigón, especialmente en el desarrollo de la resistencia a compresión en edades tempranas y a los 28 días de curado.

El procedimiento para la elaboración de estas muestras se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos que permitió asegurar la correcta preparación de la mezcla y mantener el control experimental durante todo el proceso.

El procedimiento para la elaboración de las muestras de hormigón mediante el método usando el homogeneizador de alta velocidad (Aditivo después del proceso) se desarrolló siguiendo una secuencia de pasos que permitieron asegurar la correcta preparación de la mezcla y la uniformidad de los materiales.

#### Paso 1: Preparación y dosificación de los materiales

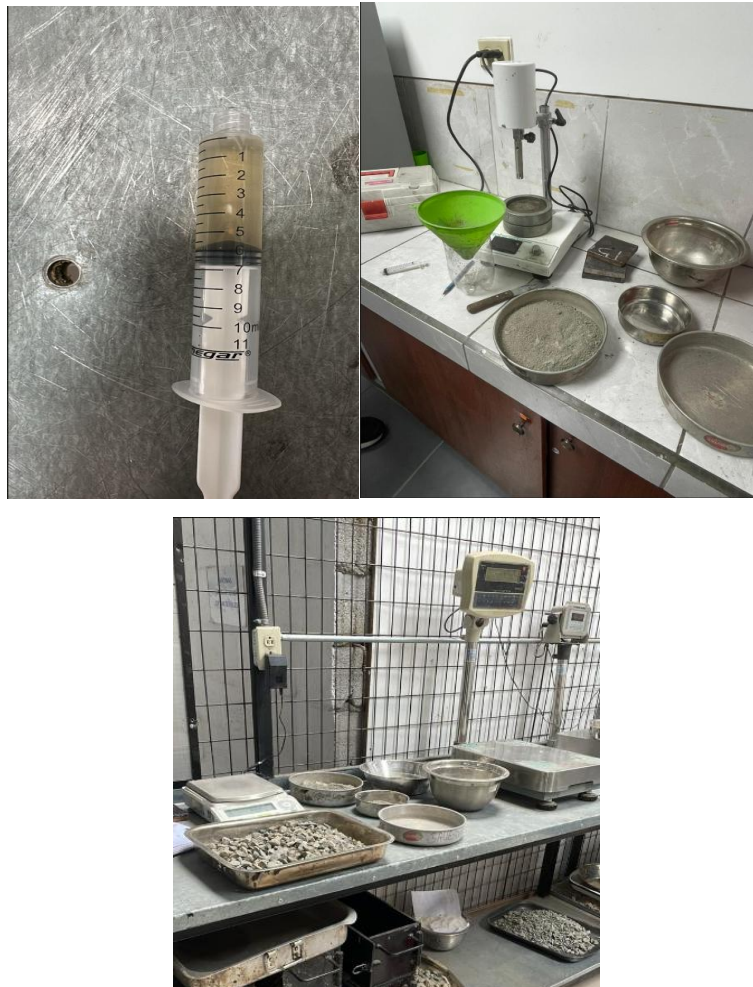
En esta etapa inicial se llevó a cabo la preparación y dosificación de los materiales requeridos para la elaboración de los cilindros de hormigón. Primero se determinó la cantidad de mezcla necesaria para la fabricación de un cilindro de ensayo, considerando además un 15 % adicional de material, con el objetivo de compensar posibles pérdidas durante las etapas de mezclado, manipulación y moldeo. Posteriormente, este volumen fue multiplicado por el número total de cilindros a elaborar, lo que permitió calcular las cantidades necesarias de cemento, agregados finos (arena), agua y aditivo hiperplastificante.

Una vez definidas las cantidades correspondientes, cada uno de los materiales fue pesado de manera individual utilizando una balanza, con el propósito de respetar las proporciones establecidas en el diseño de mezcla. En esta configuración experimental, a diferencia del

procedimiento en el que el aditivo se incorpora antes del proceso de homogeneización, el aditivo hiperplastificante no fue mezclado previamente con el agua, ya que su incorporación se realizaría en una etapa posterior del proceso de mezclado.

Además, para llevar a cabo el proceso de mezclado mediante el homogeneizador de alta velocidad, se separó previamente una parte de los materiales, específicamente la mitad del cemento y agua de mezclado, los cuales serían utilizados durante la etapa inicial de homogeneización. Finalmente, todos los materiales fueron organizados y preparados previamente, con el fin de facilitar el proceso de mezclado y mantener un adecuado control durante la elaboración de las mezclas experimentales.

*Figure 7 Pesos de material homogeneizador (ADITIVO DESPUES)*



*Fuente: Elaboración propia*

## Paso 2: Proceso de mezclado mediante homogeneizador de alta velocidad

Una vez preparados y pesados los materiales, se procedió al proceso de mezclado utilizando el homogeneizador de alta velocidad. En primer lugar, se tomó la mitad del agua de mezclado y la mitad del cemento, los cuales fueron colocados en un recipiente independiente y mezclados manualmente de manera inicial, con el objetivo de formar una pasta preliminar de cemento y agua antes de iniciar el proceso de homogeneización.

Posteriormente, esta mezcla fue sometida al proceso de homogeneización utilizando el homogeneizador de alta velocidad, el cual se operó a una velocidad aproximada en un rango de 2,000 a 7,000 rpm durante 5 minutos. Durante este tiempo se procuró que el equipo tuviera contacto con toda la mezcla dentro del recipiente, permitiendo que el homogeneizador alcance

todas las zonas del material y así lograr una homogeneización más uniforme de la pasta de cemento y agua.

Una vez finalizado el proceso de homogeneización, la pasta obtenida fue incorporada al resto de los materiales previamente preparados. En esta etapa se agregó la cantidad restante de agua de mezclado, en la cual previamente se había diluido la totalidad del aditivo hiperplastificante, con el objetivo de facilitar su correcta distribución dentro de la mezcla.

Inicialmente, todos los componentes fueron mezclados manualmente para lograr una integración preliminar de los materiales. Posteriormente, el proceso de mezclado continuó utilizando un taladro eléctrico acoplado a una herramienta mezcladora tipo hélice, comúnmente utilizada para la mezcla de pinturas, lo que permitió integrar de manera más uniforme todos los componentes y obtener una mezcla con adecuada consistencia y trabajabilidad.

Finalmente, cada mezcla preparada fue utilizada para la elaboración de dos cilindros de ensayo, repitiendo este procedimiento para cada conjunto de muestras necesarias dentro del programa experimental.

Figure 8 Proceso de mezclado homogeneizador (ADITIVO DESPUES)



Fuente: Elaboración propia

### Paso 3: Moldeo y compactación de los cilindros

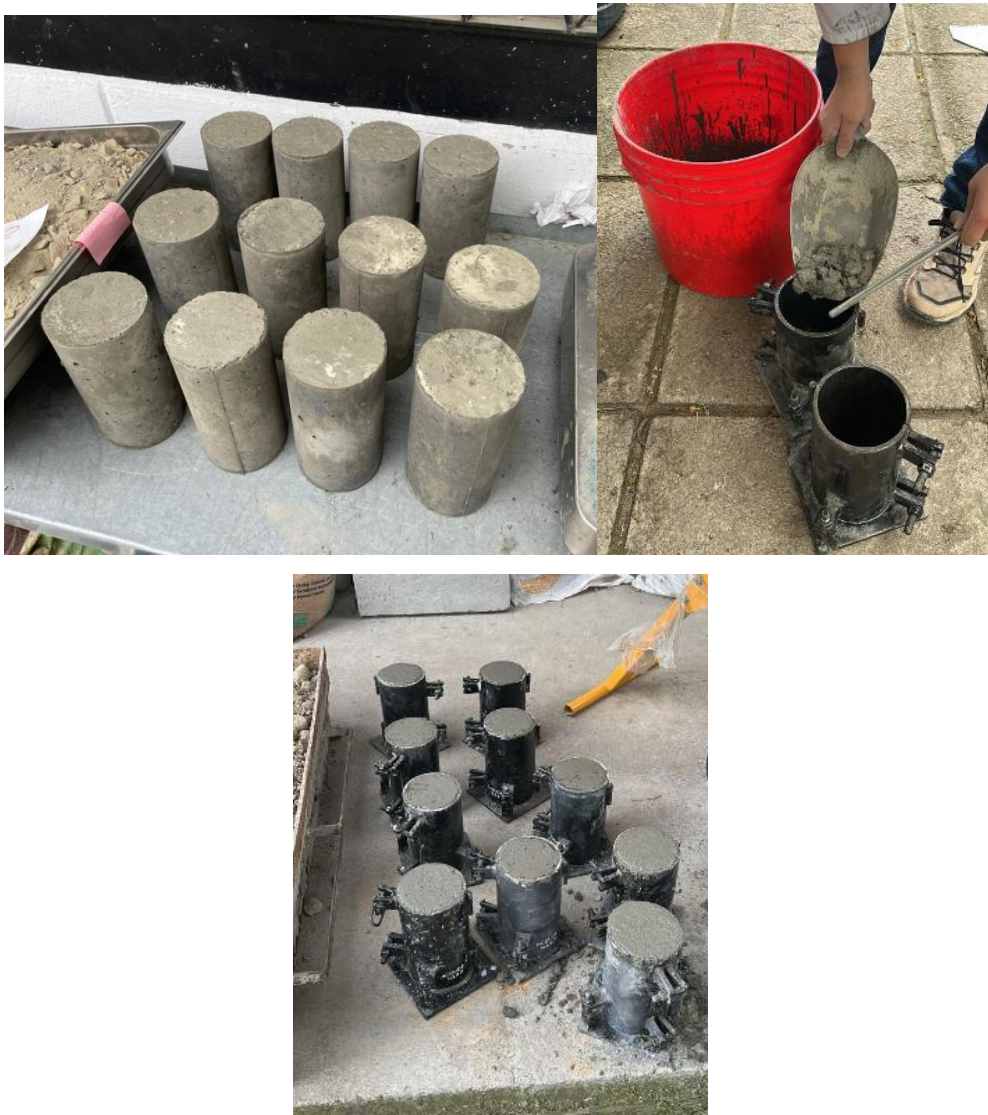
Una vez obtenida la mezcla final después del proceso de homogeneización e integración con el resto de los materiales, se procedió al moldeo de las probetas cilíndricas. Antes de realizar el llenado de los moldes, estos fueron limpiados y revisados, asegurando que no presentaran residuos de mezclas anteriores que pudieran afectar los resultados del ensayo. Posteriormente, se aplicó una ligera capa de aceite en la superficie interna de los moldes, con el objetivo de evitar la adherencia del hormigón y facilitar el proceso de desmolde una vez cumplido el tiempo de curado.

A continuación, la mezcla de hormigón fue colocada dentro de los moldes en tres capas de volumen similar. Cada una de estas capas fue compactada mediante la aplicación de 25 golpes utilizando una varilla lisa de 5/8 de pulgada, lo cual permitió mejorar la acomodación de la mezcla dentro del molde, reducir la presencia de vacíos y asegurar una distribución más uniforme del hormigón.

Como complemento al proceso de compactación, se aplicaron golpes en los laterales del molde utilizando un martillo de goma, con el fin de liberar el aire que pudiera quedar atrapado en las paredes del cilindro. Estos golpes se distribuyeron alrededor de toda la circunferencia del molde, aplicando aproximadamente 10 golpes por cada lado, lo que correspondió a 40 golpes en total alrededor del cilindro.

Una vez finalizado el llenado y la compactación de los moldes, se procedió a nivelar y alisar la superficie superior del hormigón, buscando obtener una superficie plana y uniforme. Finalmente, las probetas fueron identificadas y dejadas en reposo para iniciar su proceso de curado, permitiendo el adecuado desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón antes de la realización de los ensayos de resistencia a compresión.

*Figure 9 Proceso del moldeo homogeneizador (ADITIVO DESPUES)*



*Fuente: Elaboración propia*

## **2.7 Proceso de la rotura de los cilindros**

Una vez cumplido el período de curado establecido para cada conjunto de probetas, se procedió a la realización del ensayo de resistencia a compresión de los cilindros de hormigón. Para este proceso se seleccionaron un total de 12 cilindros, correspondientes a cuatro muestras por cada tipo de mezcla evaluada dentro del programa experimental.

Posteriormente, cada cilindro fue retirado del medio de curado y preparado para el ensayo, verificando que las superficies estuvieran limpias y en condiciones adecuadas para su colocación en el equipo de ensayo. A continuación, las probetas fueron colocadas individualmente en la prensa hidráulica de compresión, asegurando que cada cilindro estuviera correctamente centrado para garantizar una aplicación uniforme de la carga.

Durante el ensayo se aplicó una carga axial creciente de forma continua y controlada, manteniendo condiciones similares de ensayo para todas las muestras. La carga fue aplicada hasta alcanzar la falla del cilindro, registrando la carga máxima soportada por cada probeta. Este procedimiento permitió determinar la resistencia a compresión del hormigón correspondiente a cada tipo de mezcla evaluada, lo cual constituye un parámetro fundamental para el análisis comparativo entre los distintos métodos de fabricación estudiados en la investigación.

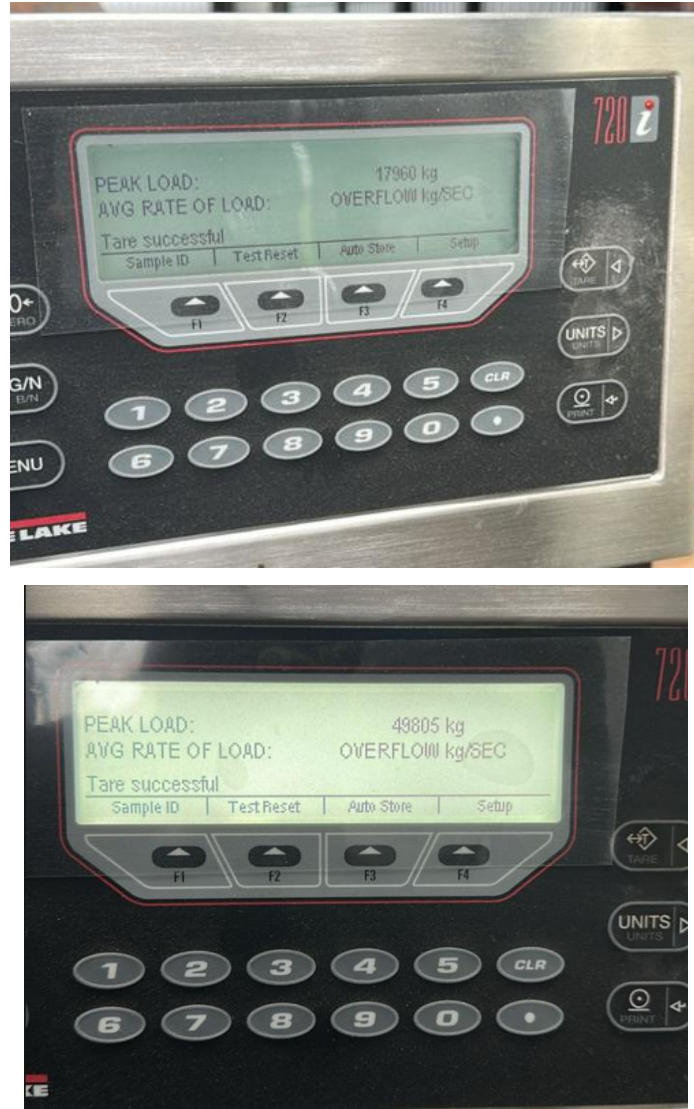
*Figure 10 Prensa hidráulica con cilindro de hormigón previa rotura*



*Fuente: Elaboración propia*

La prensa hidráulica muestra de manera digital la cantidad de carga aplicada previo al fallo del cilindro, como se muestra a continuación.

Figure 11 Pantalla digital de la prensa hidráulica mostrando la carga de rotura.



Fuente: Elaboración propia

Para cada edad de rotura establecida, se realizaron los ensayos de compresión respetando cuidadosamente los tiempos de curado correspondientes al momento en que fueron fabricados los cilindros. En el caso de las probetas destinadas al ensayo a 24 horas, el intervalo de rotura entre cada par de muestras fue aproximadamente de una hora, con el objetivo de asegurar que cada cilindro cumpliera de manera precisa con el tiempo de curado de 24 horas antes de ser sometido al ensayo.

Este mismo criterio fue aplicado para las probetas correspondientes a las edades de 48 horas y 28 días, manteniendo un control similar en los tiempos de ensayo para garantizar condiciones comparables entre todas las muestras evaluadas. De esta manera, se buscó asegurar que los resultados obtenidos reflejan de forma adecuada el comportamiento del hormigón en cada edad de curado analizada.

Una vez que la prensa hidráulica registró la carga máxima de fractura de cada cilindro, se procedió a calcular la resistencia a compresión del hormigón correspondiente a cada probeta, utilizando la siguiente expresión:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

f'c: Resistencia a compresión del hormigón.

P: Carga máxima aplicada.

A: área de la sección transversal del cilindro.

## **2.8 Resultados**

### **2.8.1 Resultados día 1**

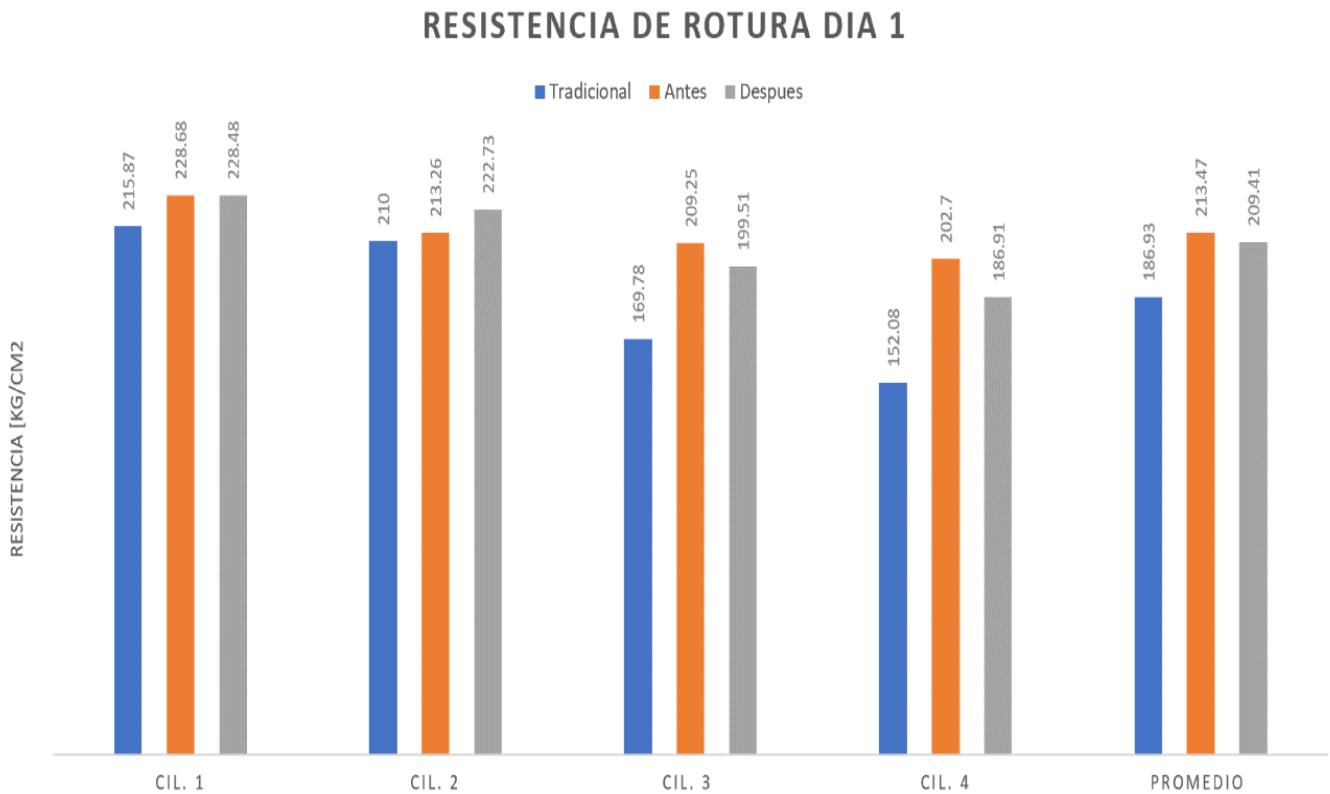
En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión de los cilindros de hormigón a la edad de 1 día de curado, correspondientes a los diferentes métodos de elaboración evaluados en la investigación. Los valores registrados permiten observar el comportamiento del hormigón producido mediante mezcla tradicional y mediante mezclado con homogeneizador de alta velocidad, tanto con incorporación del aditivo antes como después del proceso de homogeneización, lo que facilita realizar una comparación entre los distintos procedimientos analizados.

Tabla 3- 2.8.1. Tabla de Resultados por Edad [Días]

| <b>TIPO</b>    | <b>Proceso</b>                                       | <b>Edad<br/>[Días]</b> | <b>Resistencia<br/>[kg/cm2]</b> |
|----------------|--|------------------------|---------------------------------|
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 1                      | 215.87                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 1                      | 210,02                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 1                      | 169.78                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 1                      | 152.08                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 1                      | 228.48                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 1                      | 222.73                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 1                      | 199.51                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 1                      | 186.91                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 1                      | 228.68                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 1                      | 213.26                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 1                      | 209.25                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 1                      | 202.7                           |

Fuente: Elaboración propia

Figure 12 Diagrama de roptura de cilindro al día 1



Fuente: Elaboración propia

## 2.8.2 Resultados día 2

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a compresión realizados a los 2 días de curado de los cilindros de hormigón. Los valores obtenidos permiten analizar el comportamiento del material en una etapa temprana de desarrollo de resistencia, considerando las diferentes configuraciones de mezclado evaluadas en la investigación: mezcla tradicional y mezclas elaboradas mediante homogeneizador de alta velocidad, con incorporación del aditivo antes y después del proceso de homogeneización. Estos resultados permiten establecer comparaciones entre los distintos métodos de fabricación del hormigón.

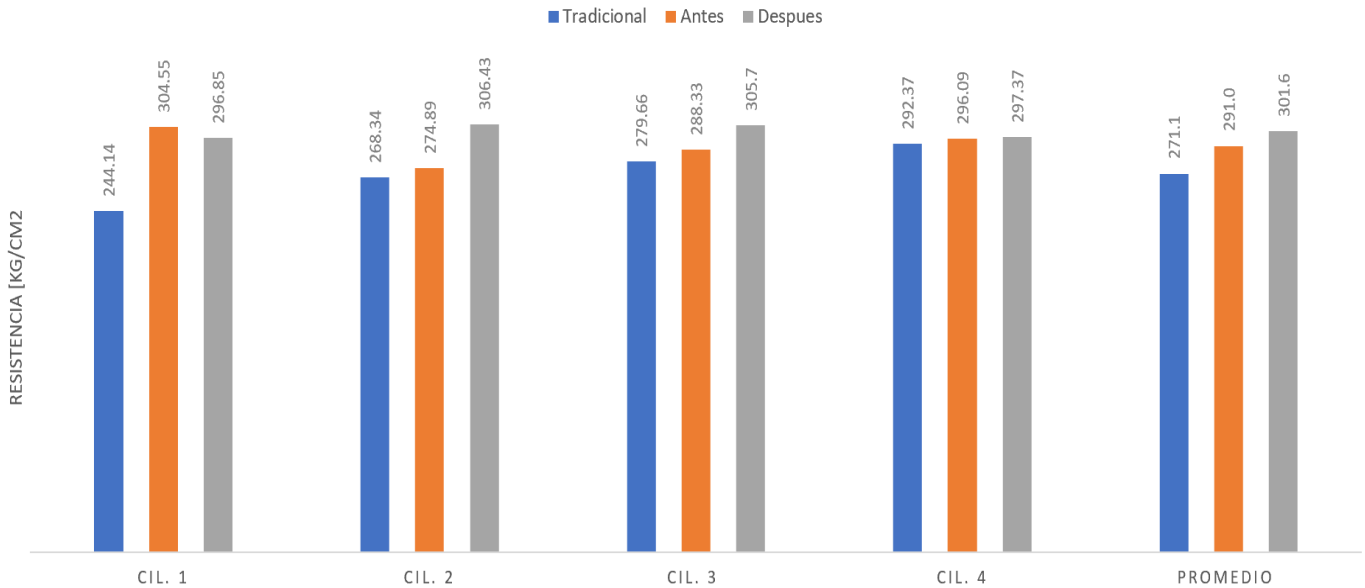
Tabla 4- 3.8.2. Tabla de Resultados por Edad [Días]

| <b>TIPO</b>    | <b>Proceso</b>                                       | <b>Edad<br/>[Días]</b> | <b>Resistencia<br/>[kg/cm2]</b> |
|----------------|--|------------------------|---------------------------------|
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 2                      | 294.14                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 2                      | 268.39                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 2                      | 279.66                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 2                      | 292.47                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 2                      | 296.85                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 2                      | 306.93                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 2                      | 305.70                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homegeneizador</b> | 2                      | 297.37                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 2                      | 304.55                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 2                      | 274.89                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 2                      | 288.33                          |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homegeneizador</b>   | 2                      | 296.09                          |

Fuente: Elaboración propia

Figure 13 Diagrama de ruptura de cilindro al día 2

## RESISTENCIA DE ROTURA DIA 2



Fuente: Elaboración propia

### 2.8.3 Resultado día 28

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión realizados a los 28 días de curado de los cilindros de hormigón. Este período corresponde al tiempo convencionalmente establecido para evaluar la resistencia mecánica del hormigón, ya que a esta edad el material ha alcanzado un alto grado de hidratación del cemento, reflejando de manera representativa su desempeño estructural.

Los valores obtenidos permiten analizar el desempeño del hormigón elaborado mediante mezcla tradicional y mediante el uso del homogeneizador de alta velocidad, tanto con incorporación del aditivo antes como después del proceso de homogeneización, facilitando así la comparación entre los distintos métodos de fabricación evaluados.

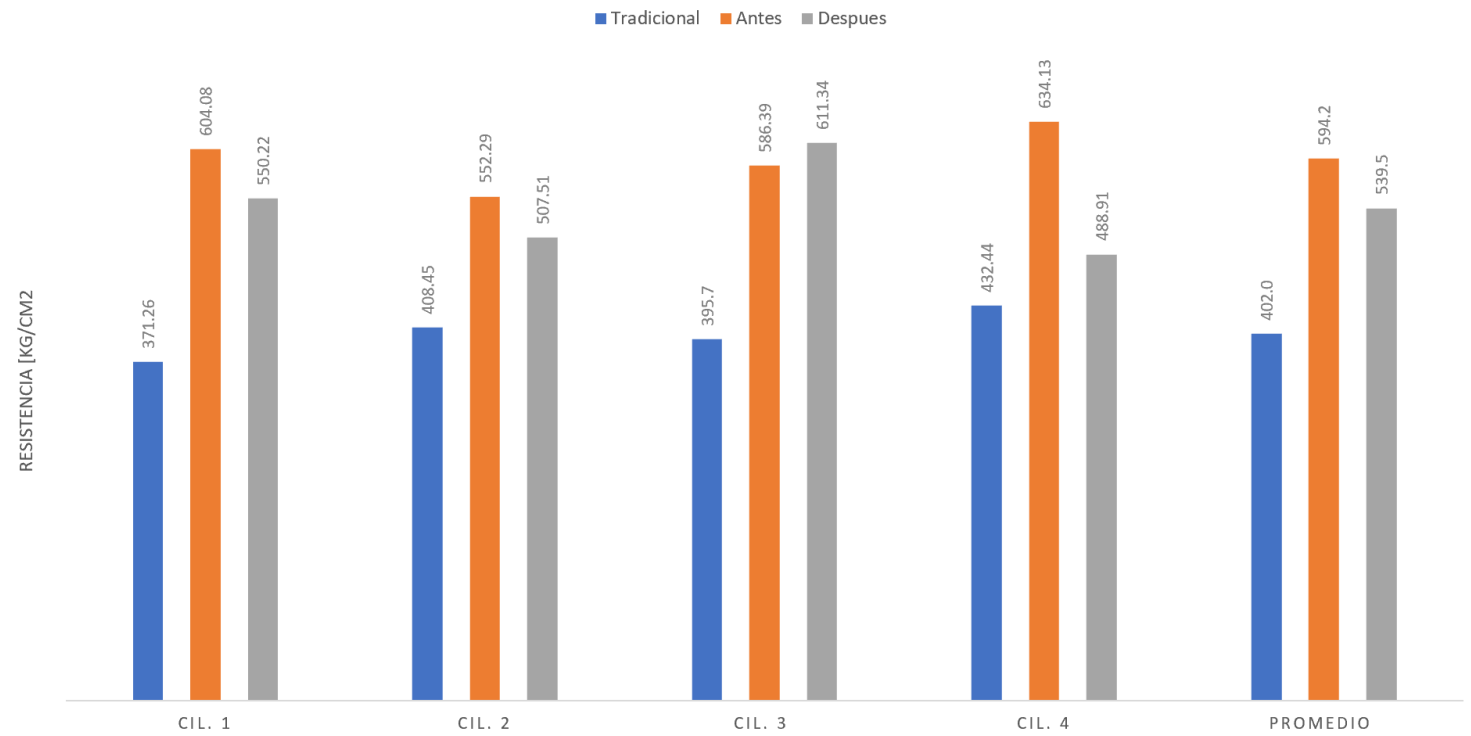
Tabla 5- 4.8.3. Tabla de Resultados por Edad [Días]

| <b>TIPO</b>    | <b>Proceso</b>                                       | <b>Edad<br/>[Días]</b> | <b>Resistencia<br/>[kg/cm2]</b> |
|----------------|--|------------------------|---------------------------------|
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 28                     | 371.26                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>Tradicional</b>                        | 28                     | 408.45                          |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 28                     | 395.7                           |
| Convencional   | <b>Mezcla<br/>tradicional</b>                        | 28                     | 432.44                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homogeneizador</b> | 28                     | 550.22                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homogeneizador</b> | 28                     | 507.51                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homogeneizador</b> | 28                     | 611.34                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo después<br/>del homogeneizador</b> | 28                     | 488.91                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homogeneizador</b>   | 28                     | 552.29                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homogeneizador</b>   | 28                     | 604.08                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homogeneizador</b>   | 28                     | 586.39                          |
| Homogeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del<br/>homogeneizador</b>   | 28                     | 634.13                          |

Fuente: Elaboración propia

Figure 14 Diagrama de ruptura de cilindro al día 28

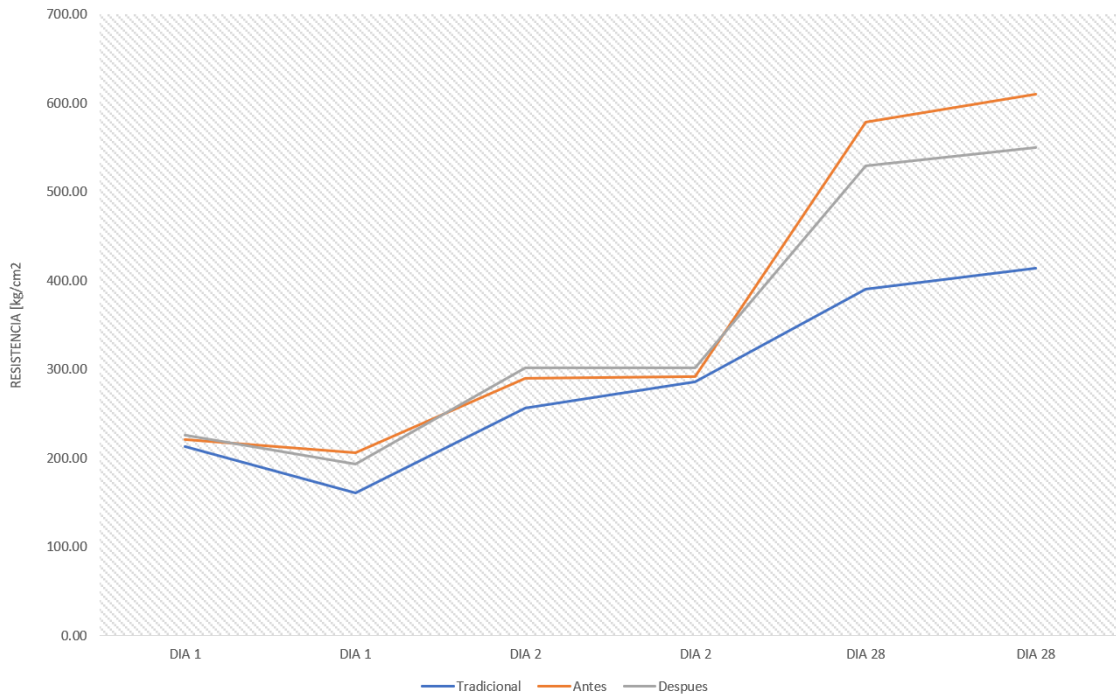
### RESISTENCIA DE ROTURA DIA 28



Fuente: Elaboración propia

Figure 15 Diagrama comparativo entre promedios y sus respectivos métodos

### COMPARATIVA RESISTENCIA



Fuente: Elaboración propia

## 2.9 Prueba Hormigón Convencional vs Homogeneizador (Aditivo después de Homogeneizador)

En esta sección se presenta la comparación entre el hormigón elaborado mediante el método convencional de mezclado y el hormigón producido utilizando el homogeneizador de alta velocidad con incorporación del aditivo después del proceso de homogeneización. El propósito de este análisis es evaluar el comportamiento del material en términos de resistencia a compresión en edades tempranas, con el fin de identificar si el uso del homogeneizador influye en el desarrollo inicial de la resistencia del hormigón en comparación con el método tradicional de fabricación.

Tabla 6- 5.9.1. Tabla comparativa de la resistencia en kg/cm<sup>2</sup> entre Hormigón Convencional y Hormigón con Homogeneizador (Aditivo después de homogeneizador) en las pruebas del Día 1, Día 2 y Día 28

| TIPO           | Proceso  | Resistencia<br>Kg/cm <sup>2</sup> |        |        |
|----------------|--|-----------------------------------|--------|--------|
|                |  | Día 1                             | Día 2  | Día 28 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                        | 215.87                            | 294.14 | 371.26 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                        | 210                               | 268.34 | 408.45 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                        | 169.78                            | 279.66 | 395.7  |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                        | 152.08                            | 292.37 | 432.44 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después del homogeneizador</b> | 228.48                            | 296.85 | 550.22 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después del homogeneizador</b> | 222.73                            | 306.43 | 507.51 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después del homogeneizador</b> | 199.51                            | 305.7  | 611.34 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo después del homogeneizador</b> | 186.91                            | 297.37 | 488.91 |

Fuente: Elaboración propia

Dado que se ensayaron cuatro muestras por cada variable (convencional y con homogeneizador) en cada edad de curado, se calculó el promedio para obtener un valor

representativo que mitigue las dispersiones individuales propias del ensayo. Para ello se empleó la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\sum xi}{n}$$

Donde xi representa el valor de resistencia a la compresión de cada probeta individual y n es el número total de muestras. Al sustituir los valores obtenidos en laboratorio, se tiene el siguiente desarrollo:

Promedios aproximados

Hormigón convencional

Día 1

$$(215.87 + 210 + 169.78 + 152.08) / 4 = 186.93 \text{ kg/cm}^2$$

Día 2

$$(244.14 + 268.34 + 279.66 + 292.37) / 4 = 271.12 \text{ kg/cm}^2$$

Día 28

$$(371.26 + 408.45 + 395.7 + 423.44) / 4 = 401.96 \text{ kg/cm}^2$$

Homogeneizador (aditivo después)

Día 1

$$(228.48 + 222.73 + 199.51 + 186.91) / 4 = 209.41 \text{ kg/cm}^2$$

Día 2

$$(296.85 + 306.43 + 305.7 + 297.37) / 4 = 301.58 \text{ kg/cm}^2$$

Día 28

$$(550.22 + 507.51 + 611.34 + 488.91) / 4 = 539.49 \text{ kg/cm}^2$$

Para medir el impacto del uso del homogeneizador respecto a la mezcla tradicional se utilizó la fórmula de incremento porcentual relativo:

$$\Delta\% = \left( \frac{Vf - Vi}{Vi} \right) * 100$$

Donde  $V_f$  es la resistencia promedio del hormigón con el homogeneizador y  $V_i$  es la resistencia promedio del hormigón de método convencional. La aplicación de esta fórmula arroja las siguientes variaciones de desempeño:

#### Variación entre métodos

Dia 1

$$(209.41 - 186.93)/186.93 = 12\%$$

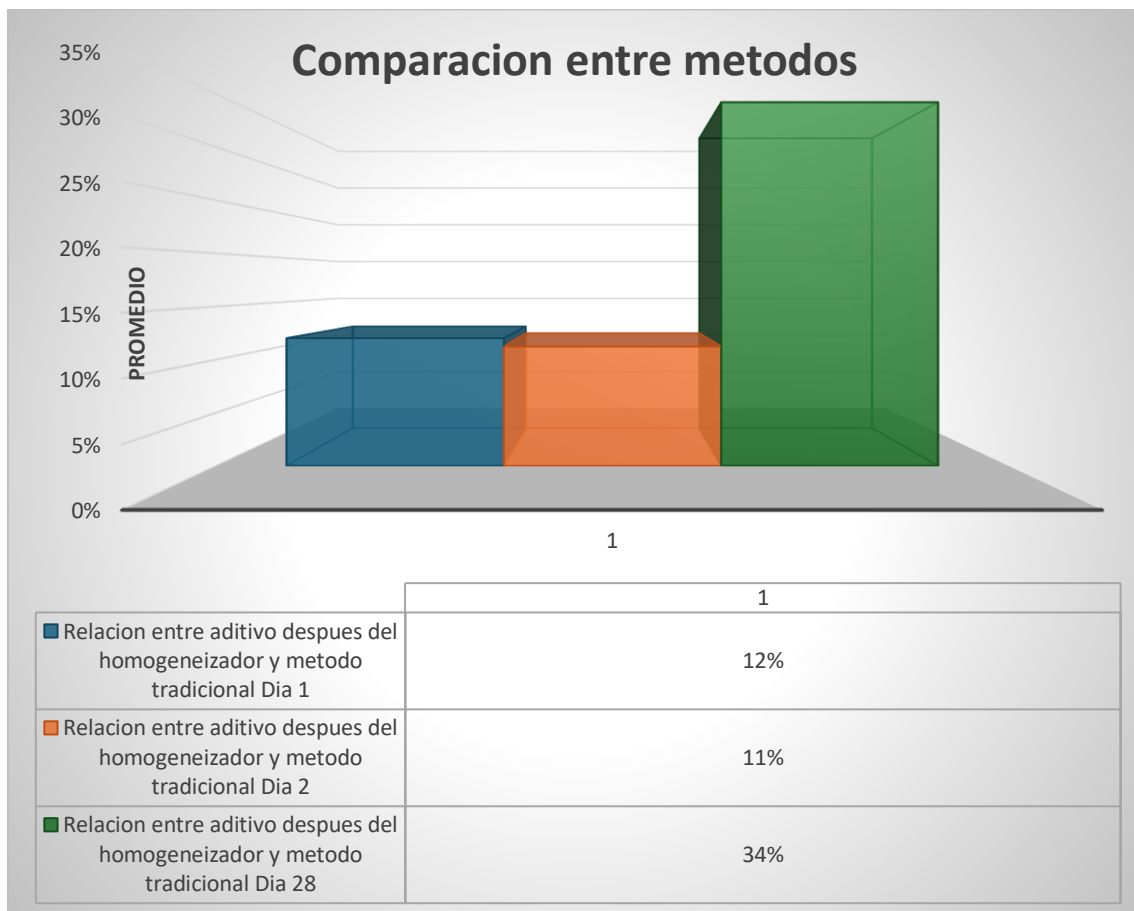
Dia 2

$$(301.58 - 271.12)/271.12 = 11\%$$

Dia 28

$$(539.50 - 401.96)/401.96 = 34.22\%$$

Figure 16 Variación entre métodos DIA 1,2 y 28



Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión, se realizó la comparación entre el hormigón elaborado mediante mezclado convencional y el hormigón procedente del homogeneizador de alta velocidad, incorporando el aditivo después del proceso de homogeneización.

Los valores promedio obtenidos para el método tradicional fueron de 186.93 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 271.12 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 401.96 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. En contraste, las probetas elaboradas con el empleo del homogeneizador alcanzaron resistencias promedio de 209.41 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 301.58 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 539.49 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. La comparación entre ambos procedimientos evidencia un incremento de resistencia del orden de 12 % al día 1, 11 % al día 2 y 34.22 % a los 28 días a favor del método con homogeneización de alta velocidad.

## 2.10 Prueba Hormigón Convencional vs Homogeneizador (Aditivo antes de Homogeneizador)

Tabla 7- 6.9.2. Tabla comparativa de la resistencia en kg/cm<sup>2</sup> entre Hormigón Convencional y Hormigón con Homogeneizador (Aditivo antes de homogeneizador) en las pruebas del Día 1, Día 2 y Día 28

| TIPO           | Proceso  | Resistencia<br>Kg/cm <sup>2</sup> |        |        |
|----------------|--|-----------------------------------|--------|--------|
|                |  | Día 1                             | Día 2  | Día 28 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                      | 215.87                            | 244.14 | 371.26 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                      | 210                               | 268.34 | 408.45 |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                      | 169.78                            | 279.66 | 395.7  |
| Convencional   | <b>Mezcla tradicional</b>                      | 152.08                            | 292.37 | 432.44 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del homogeneizador</b> | 228.68                            | 304.55 | 552.29 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del homogeneizador</b> | 213.26                            | 274.89 | 604.08 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del homogeneizador</b> | 209.25                            | 288.33 | 586.39 |
| Homegeneizador | <b>Mezcla Aditivo antes del homogeneizador</b> | 202.7                             | 296.09 | 634.13 |

Fuente: Elaboración propia

## Promedios aproximados

### Hormigón convencional

Día 1

$$(215.87 + 210 + 169.78 + 152.08) / 4 = 186.93 \text{ kg/cm}^2$$

Día 2

$$(244.14 + 268.34 + 279.66 + 292.37) / 4 = 271.12 \text{ kg/cm}^2$$

Día 28

$$(371.26 + 408.45 + 395.7 + 423.44) / 4 = 401.96 \text{ kg/cm}^2$$

### Homogeneizador (aditivo antes)

Día 1

$$(228.68 + 213.26 + 209.25 + 202.7) / 4 = 213.48 \text{ kg/cm}^2$$

Día 2

$$(304.55 + 274.89 + 288.33 + 296.09) / 4 = 290.97 \text{ kg/cm}^2$$

Día 28

$$(552.29 + 604.08 + 586.39 + 634.13) / 4 = 594.22 \text{ kg/cm}^2$$

### Variación entre métodos

Día 1

$$(213.48 - 186.93) / 186.93 = 14\%$$

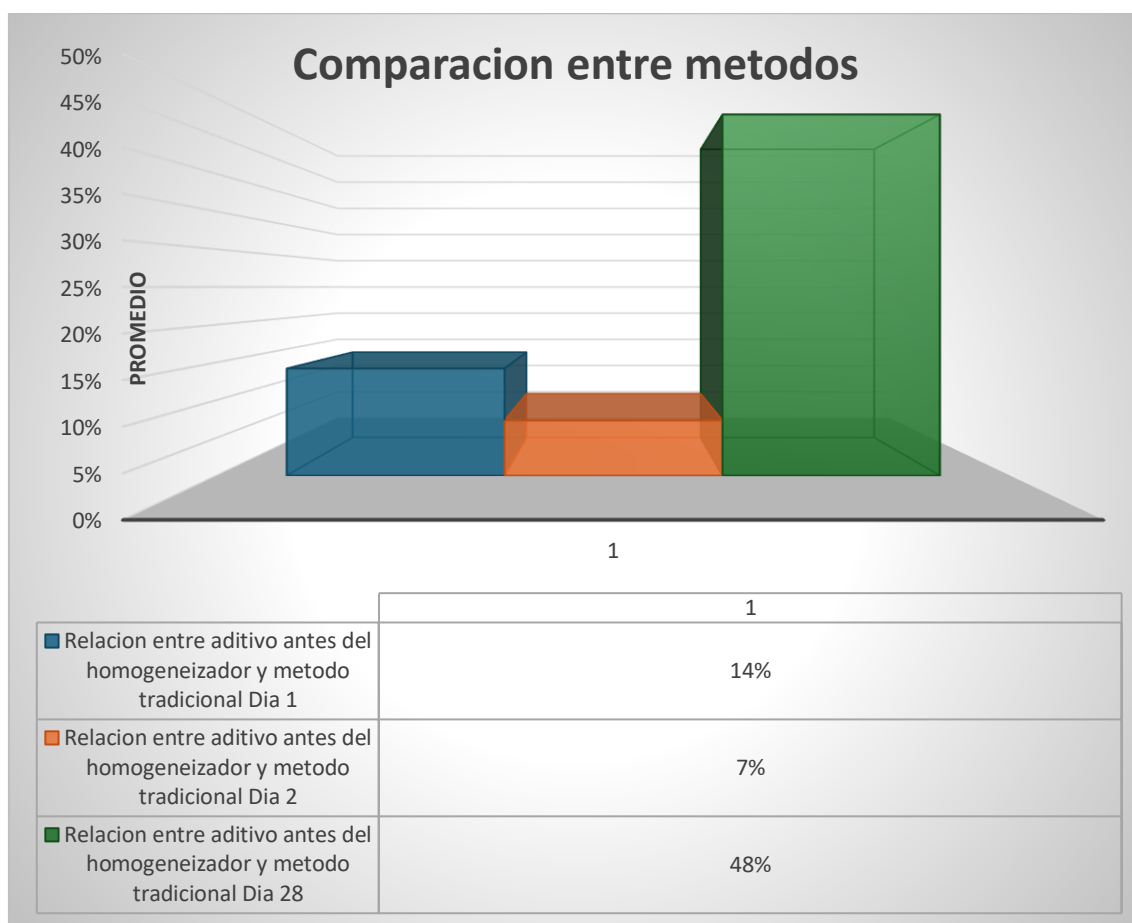
Día 2

$$(290.97 - 271.12) / 271.12 = 7\%$$

Día 28

$$(594.22 - 401.96) / 401.96 = 48\%$$

Figure 17 Variación entre métodos DIA 1,2 Y 28



Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión, se realizó la comparación entre el hormigón elaborado mediante mezclado convencional y el hormigón realizado con homogeneizador de alta velocidad, agregando el aditivo antes del proceso de homogeneización. Los valores promedio obtenidos para el método tradicional fueron de 186.93 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 271.12 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 401.96 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. Por su parte, las probetas elaboradas con el empleo del homogeneizador alcanzaron resistencias promedio de 213.48 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 290.97 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 594.22 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días. La comparación entre ambos procedimientos muestra un incremento de resistencia del orden de 14 % al día 1, 7 % al día 2 y 48 % a los 28 días a favor del método con homogeneización de alta velocidad. Estos resultados permiten establecer que la incorporación del aditivo antes del proceso de homogeneización mejora el comportamiento mecánico del hormigón en todas las edades evaluadas, siendo más notorio su efecto a los 28 días, lo que sugiere una mejor dispersión de los materiales y una mayor uniformidad en la matriz cementicio.

## 2.11 Impactos generados por el proceso

El impacto de los métodos de fabricación mediante los resultados obtenidos permite afirmar que el proceso de fabricación ejerció una influencia directa y determinante sobre el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón. A pesar de que las tres configuraciones experimentales se elaboraron con la misma dosificación de cemento, agregados, agua, relación agua/cemento y porcentaje de aditivo, las diferencias registradas entre sus resistencias demuestran que el comportamiento mecánico del material no dependió únicamente de la proporción de sus componentes, sino de la manera en que estos fueron integrados durante el mezclado. En ese sentido, el método convencional constituyó la referencia de comparación y presentó los menores valores promedio en todas las edades evaluadas, con 186.93 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 271.12 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 401.96 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, lo que evidencia las limitaciones del mezclado tradicional para alcanzar un nivel de dispersión y compactación interna comparable al de los procesos con homogeneización de alta velocidad.

En contraste, el uso del homogeneizador de alta velocidad generó un efecto favorable en el desempeño resistente del hormigón desde edades tempranas, aunque con respuestas distintas según el momento de incorporación del aditivo hiperplastificante. Cuando el aditivo fue añadido después del proceso de homogeneización, las resistencias promedio alcanzaron 209.41 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 301.58 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 539.49 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, lo que representa incrementos aproximados de 12 %, 11 % y 34.22 % respecto al método convencional. Este comportamiento sugiere que la homogeneización previa favoreció una mejor dispersión de la pasta cementicia y una distribución más uniforme de los componentes, mientras que la incorporación posterior del aditivo permitió complementar la trabajabilidad del sistema sin anular el beneficio mecánico obtenido por la acción del equipo. Dentro de esta configuración, el resultado más relevante se observó al día 2, donde la mezcla mostró una respuesta temprana particularmente eficiente frente a las demás alternativas estudiadas.

No obstante, el procedimiento que produjo el mayor impacto global sobre la resistencia fue aquel en el que el aditivo se incorporó antes de la homogeneización, en este caso se obtuvieron resistencias promedio de 213.48 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 290.97 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 594.22 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, equivalentes a incrementos de 14 %, 7 % y 48 % frente al método tradicional. Estos resultados indican que la interacción temprana entre el agua, el aditivo y parte del cemento, sometida posteriormente a la acción del homogeneizador,

favoreció la formación de una pasta inicial más uniforme y energéticamente mejor dispersada, condición que probablemente mejoró la integración del sistema completo cuando se incorporaron los materiales restantes. Aunque al día 2 este procedimiento no superó al método con aditivo añadido después de la homogeneización, sí presentó el mejor desempeño al día 1 y, sobre todo, la mayor ganancia de resistencia a los 28 días, lo que lo convierte en la alternativa más favorable en términos de comportamiento mecánico integral.

En consecuencia, puede establecerse que el principal impacto de los métodos evaluados no radicó solo en el uso del homogeneizador como equipo de mezclado, sino en la secuencia específica de incorporación del aditivo dentro del proceso de fabricación. La homogeneización de alta velocidad mejoró de manera consistente la resistencia del hormigón frente al procedimiento convencional, pero su efectividad varió según el momento en que el aditivo entró en contacto con el sistema cemento-agua. Bajo las condiciones de este estudio, la incorporación del aditivo antes de la homogeneización produjo el mejor desempeño global, especialmente en la resistencia final a 28 días, mientras que la incorporación posterior mostró una respuesta más destacada en la resistencia temprana. Por tanto, los resultados confirman que la optimización del proceso de mezclado constituye una estrategia técnicamente viable para mejorar el rendimiento mecánico del hormigón y ampliar su aplicación en situaciones donde se requiere mayor eficiencia resistente en tiempos reducidos

## Capítulo 3

Se presentarán y analizarán con más claridad los resultados obtenidos en el laboratorio, usando como base las roturas de compresión de 36 muestras de hormigón ensayadas a 1, 2 y 28 días. En este capítulo se comparan únicamente tres procesos de fabricación: 1. el método convencional, 2. el uso del homogeneizador de alta velocidad agregando el aditivo hiperplastificante antes del homogeneizado, y 3. el uso del homogeneizador agregando el aditivo después del homogeneizado. Con esta comparación se busca entender cómo cambia el comportamiento del hormigón cuando se aplica una mezcla de alta velocidad y, sobre todo, cómo influye el momento en que se incorpora el aditivo.

Además de mostrar los valores de resistencia y su evolución con el tiempo, el capítulo explicará las ventajas que esta tecnología podría ofrecer en la práctica de la construcción y la ingeniería, por ejemplo: una mezcla más uniforme, menor presencia de “grumos” o zonas mal mezcladas, mejor facilidad para trabajar el hormigón (colocarlo, compactarlo y darle acabado), y la posibilidad de obtener mejores resultados de resistencia en edades tempranas o a 28 días dependiendo de la forma en que se aplique el aditivo. Al mismo tiempo, se detallarán las desventajas o limitaciones que pueden aparecer en obra, como la necesidad de contar con un equipo adicional (costos y disponibilidad), el cuidado que requiere el proceso (porque no es lo mismo poner el aditivo antes o después), el tiempo extra que podría representar en el mezclado, y la variación de resultados si no se controla bien la dosificación y el procedimiento. En resumen, este capítulo busca dar una visión completa y realista: no solo si la homogeneizadora mejora o no el hormigón, sino en qué condiciones conviene usarlo y qué aspectos deben cuidarse para que funcione bien en una aplicación real.

### 3.1 Homogeneizador en el sector de la industria de la construcción

En la industria de la construcción, el hormigón continúa siendo uno de los materiales más utilizados debido a su capacidad estructural, durabilidad y versatilidad en diferentes tipos de obras. Sin embargo, el desempeño del hormigón no depende únicamente de sus componentes, sino también del proceso de mezclado, el cual influye directamente en la distribución de las partículas, la hidratación del cemento y la formación de su microestructura. En este contexto, el uso de tecnologías avanzadas como los homogeneizadores de alta velocidad ha comenzado a ganar relevancia como una alternativa para optimizar la calidad del material.

Los homogeneizadores de alta velocidad funcionan mediante la aplicación de fuerzas de cizalla intensas, capaces de desintegrar aglomeraciones de partículas finas y mejorar la dispersión del cemento y los aditivos dentro de la mezcla. Este proceso permite obtener una matriz más uniforme y compacta, lo que se traduce en una reducción de vacíos internos y una mejora en las propiedades mecánicas del hormigón. De acuerdo con estudios recientes, los procesos de mezcla de alta energía favorecen una hidratación más homogénea del cemento, lo que contribuye a un incremento en la resistencia y durabilidad del material (Dils *et al.*, 2012).

En el ámbito de la construcción, la aplicación de homogeneizadores representa una innovación importante, especialmente en la producción de hormigones de alto desempeño y en sistemas constructivos que requieren rapidez en la ejecución, como los elementos prefabricados. La mejora en la dispersión de los componentes permite optimizar el uso de materiales, reducir la relación agua/cemento y alcanzar resistencias superiores en edades avanzadas, lo cual es fundamental para garantizar la seguridad estructural y la eficiencia en obra (P. Kumar Mehta, 2006) .

No obstante, la implementación de esta tecnología también presenta desafíos. Diversas investigaciones han evidenciado que, cuando se combina el proceso de homogeneización con aditivos hiperplastificantes, pueden producirse variaciones en el desarrollo de la resistencia temprana del hormigón. En algunos casos, las resistencias iniciales (1 a 2 días) resultan menores en comparación con los métodos tradicionales, aunque posteriormente se observa una mejora significativa a los 28 días de curado. Este comportamiento sugiere que la interacción entre el método de mezclado y los aditivos químicos aún requiere un análisis más detallado (Wan *et al.*, 2025).

Desde una perspectiva práctica, el uso de homogeneizadores en la industria de la construcción tiene el potencial de contribuir a la optimización de procesos productivos, la reducción del consumo de cemento y la mejora del desempeño estructural del hormigón. Además, su aplicación puede alinearse con criterios de sostenibilidad, al permitir una mejor eficiencia en el uso de materiales y una disminución de la huella ambiental asociada a la producción de hormigón.

En el contexto ecuatoriano, donde las condiciones sísmicas y el crecimiento urbano demandan materiales más resistentes y confiables, la incorporación de tecnologías como el homogeneizador de alta velocidad puede representar una oportunidad para mejorar la

calidad de las construcciones. Sin embargo, su implementación requiere estudios experimentales que validen su comportamiento bajo condiciones reales de uso, lo que justifica la necesidad de investigaciones como la presente.

### **3.2 Ventajas y desventajas del homogeneizador (en sus diferentes procesos de producción)**

#### Ventajas

1. Aumento comprobado de la resistencia temprana: los resultados experimentales obtenidos evidencian que el uso del homogeneizador incrementa la resistencia a compresión en edades tempranas en comparación con el método convencional.
2. Mejor dispersión de materiales: el homogeneizador, al trabajar a altas velocidades, genera fuerzas de cizallamiento que permiten desintegrar posibles aglomeraciones de partículas finas, especialmente del cemento. Esto facilita una distribución más uniforme de todos los componentes de la mezcla.
3. Mayor homogeneidad en la mezcla: como consecuencia directa de la mejor dispersión, la mezcla obtenida presenta una mayor uniformidad en su composición. Esto reduce la presencia de zonas débiles o con diferentes concentraciones de materiales.
4. Mejora en la trabajabilidad: la adecuada distribución del aditivo hiperplastificante, favorecida por el homogeneizador, contribuye a mejorar la fluidez y manejabilidad de la mezcla. Esto facilita las labores de colocación, compactación y acabado del hormigón en obra.
5. Potencial para resultados globales: Aunque el enfoque del estudio se centra en edades tempranas, la mejora en la homogeneidad y en la dispersión de los componentes sugiere un potencial impacto positivo en las propiedades a largo plazo del hormigón. Una mezcla más uniforme puede favorecer una microestructura más densa y un mejor desarrollo de las propiedades mecánicas con el tiempo.

## Desventajas

1. Equipo adicional: el uso del homogeneizador implica la incorporación de un equipo especializado que no forma parte del proceso convencional de mezclado de hormigón. Esto puede representar un incremento en los costos iniciales, así como limitaciones en su implementación en obras.
2. Proceso delicado: el desempeño del homogeneizador depende en gran medida del procedimiento empleado, variaciones pueden generar diferencias significativas en los resultados.
3. Mayor control operativo: es necesario controlar cuidadosamente variables como el tiempo de mezclado, la velocidad del equipo y la dosificación de los materiales. Esto implica una mayor exigencia técnica durante la ejecución del proceso.
4. Aumento en el tiempo de mezclado: la incorporación de una etapa adicional de homogeneización puede extender el tiempo total de preparación de la mezcla. En proyectos donde los tiempos de producción son críticos, este aspecto podría representar una desventaja operativa.
5. Volúmenes de mezclado: la capacidad de producción del homogeneizador está directamente condicionada por el volumen máximo que el equipo puede procesar en una sola fase de mezclado. Esto implica que, a medida que se requieren mayores volúmenes de hormigón, es necesario realizar múltiples ciclos de homogeneización, o un homogeneizador con mayor capacidad, lo que puede tener repercusión en costos y/o tiempo.

### **3.3 Discusión de resultados**

La discusión de los resultados obtenidos permite sostener que las diferencias registradas en la resistencia a compresión del hormigón respondieron, principalmente, a la configuración del proceso de mezclado y no únicamente a la presencia del homogeneizador de alta velocidad como equipo de fabricación. Dado que las tres configuraciones experimentales fueron elaboradas con la misma dosificación de cemento, agregados, agua, relación agua/cemento y porcentaje de aditivo, las variaciones observadas entre los valores resistentes deben interpretarse como consecuencia de la secuencia de producción aplicada en cada caso, especialmente del momento en que el aditivo hiperplastificante interactuó con el sistema cemento-agua. En ese marco, el método convencional constituyó una referencia comparativa válida, pero presentó los menores valores promedio en todas las edades evaluadas, con 186.93 kg/cm<sup>2</sup> al día 1,

271.12 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 401.96 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, lo que evidencia una menor eficiencia del mezclado tradicional para desarrollar una respuesta mecánica comparable a la alcanzada mediante homogeneización de alta velocidad.

A diferencia del método convencional, los dos procedimientos con homogeneizador superaron los valores resistentes en todas las edades analizadas, lo que confirma que la incorporación de alta energía de mezclado favoreció una mejora real en el desempeño mecánico del material. Sin embargo, la comparación detallada entre ambos métodos homogeneizados muestra que dicha mejora no siguió una tendencia uniforme. Cuando el aditivo fue incorporado después del proceso de homogeneización, las resistencias promedio alcanzaron 209.41 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 301.58 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 539.49 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días; por su parte, cuando el aditivo fue añadido antes de la homogeneización, se obtuvieron valores de 213.48 kg/cm<sup>2</sup>, 290.97 kg/cm<sup>2</sup> y 594.22 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. Esta diferencia es relevante porque revela que el efecto del homogeneizador no dependió solamente de aportar mayor energía al sistema, sino de cómo esa energía actuó sobre la mezcla en función de la etapa de incorporación del aditivo.

Desde esta perspectiva, el método con aditivo incorporado antes del homogeneizador presentó el comportamiento global más favorable, particularmente a los 28 días, donde alcanzó la mayor resistencia de toda la investigación. Este resultado sugiere que la incorporación anticipada del aditivo, junto con el agua y una fracción del cemento, antes de la homogeneización, generó condiciones más eficientes para la dispersión del sistema cementicio y para el desarrollo posterior de la resistencia. En contraste, el método con aditivo añadido después del homogeneizador mostró su mejor respuesta relativa al día 2, superando incluso al procedimiento con adición previa en esa edad específica. Esto permite interpretar que la adición posterior del aditivo pudo favorecer un desarrollo más estable de la resistencia temprana intermedia, aunque sin igualar la ganancia final obtenida cuando el aditivo fue incorporado antes del proceso. En consecuencia, los resultados no permiten afirmar que uno de los métodos homogeneizados fue superior en todas las fases del curado, sino que cada secuencia de producción favoreció de manera distinta la evolución resistente del hormigón.

Esta lectura adquiere mayor importancia al compararse con el antecedente citado dentro del propio documento, en el que se expone que una investigación previa reportó mejoras a los 28 días, pero reducciones en la resistencia temprana cuando intervenía el aditivo hiperplastificante junto con el homogeneizador. En el presente estudio, esa tendencia no

se repitió, ya que ambos procedimientos homogeneizados superaron al método convencional desde las primeras 24 y 48 horas. Este contraste permite plantear que el problema no radica necesariamente en el uso del homogeneizador como tal, sino en la manera en que se articula el proceso de producción, en la secuencia de incorporación del aditivo y en el control experimental aplicado durante la fabricación de las mezclas. Bajo esta interpretación, el hallazgo más importante del estudio no es solamente que la homogeneización mejore la resistencia, sino que su efectividad depende de la lógica operativa con la que se ejecuta el procedimiento.

Adicionalmente, debe considerarse que en la metodología el homogeneizador fue planteado para operar a 2,000 rpm durante 5 minutos; sin embargo, si durante la ejecución experimental se observó que, por las características de la máquina utilizada, las revoluciones variaban ocasionalmente desde 2,000 hasta 7,000 rpm, esta situación constituye una fuente potencial de variabilidad que no debería ser ignorada en la interpretación de los resultados. Aunque el estudio no incluyó una medición específica del efecto de esas fluctuaciones sobre la resistencia, sí es técnicamente razonable señalar que cambios no uniformes en la velocidad de operación pudieron modificar el nivel de energía transmitida a la mezcla y, con ello, influir en el grado de dispersión de los componentes y en la respuesta resistente obtenida en algunas probetas. Por esa razón, esta observación debe incorporarse como una consideración crítica del proceso experimental y como una posible limitación del control operativo del equipo, más que como una explicación definitiva de las diferencias encontradas.

En síntesis, la discusión de los resultados permite concluir que la resistencia del hormigón no dependió exclusivamente del uso del homogeneizador de alta velocidad, sino de la interacción entre la energía de mezclado, la secuencia de incorporación del aditivo y las condiciones reales de operación del proceso. El método convencional confirmó ser la alternativa menos eficiente dentro del esquema comparativo del estudio; el procedimiento con aditivo después de la homogeneización mostró una respuesta más favorable en la fase temprana intermedia; y el procedimiento con aditivo antes de la homogeneización presentó el mejor desempeño global, especialmente en la resistencia final a 28 días. En consecuencia, la evidencia obtenida permite afirmar que el verdadero aporte del estudio no está solo en validar el uso del homogeneizador, sino en demostrar que las etapas con aditivo y su colocación con control efectivo de la operación son factores decisivos para interpretar adecuadamente el comportamiento resistente del hormigón.

### 3.4 Conclusiones

La presente investigación permitió cumplir el objetivo general de evaluar el efecto del homogeneizador de alta velocidad en la resistencia temprana del hormigón utilizando aditivo en distintas etapas de producción, estableciendo que el proceso de homogeneización influye directamente en el comportamiento mecánico del material y que su desempeño depende no solo de la energía de mezclado aplicada, sino también de la secuencia de incorporación del aditivo hiperplastificante dentro del sistema cemento-agua-agregado. La comparación entre las tres configuraciones estudiadas permitió verificar que el método de fabricación constituye un factor determinante en el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón y en la evolución de su microestructura interna.

Los ensayos realizados confirmaron que las mezclas elaboradas mediante homogeneización de alta velocidad presentaron un comportamiento mecánico superior frente al método convencional en todas las edades evaluadas. El hormigón tradicional registró los menores valores promedio de resistencia, alcanzando 186.93 kg/cm<sup>2</sup> al día 1, 271.12 kg/cm<sup>2</sup> al día 2 y 401.96 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, mientras que las dos configuraciones con homogeneizador evidenciaron incrementos importantes asociados a una mejor dispersión de partículas, una reducción de vacíos internos y una matriz cementicia más uniforme y compacta. Estos resultados permiten establecer que el uso de mezclado de alta energía favorece una integración más eficiente de los materiales y mejora el desempeño resistente global del hormigón.

En relación con la resistencia temprana, la incorporación del aditivo antes del proceso de homogeneización presentó el mejor comportamiento al día 1, alcanzando una resistencia promedio de 213.48 kg/cm<sup>2</sup>, equivalente a un incremento aproximado del 14 % respecto al método convencional. Este resultado evidencia que la interacción temprana entre el aditivo hiperplastificante y el proceso de alta cizalla favoreció una mejor dispersión del cemento y una distribución más uniforme de los componentes desde las primeras etapas de hidratación. Sin embargo, en la etapa de curado correspondiente al día 2, el comportamiento más eficiente fue obtenido por la configuración con incorporación del aditivo después del proceso de homogeneización, alcanzando una resistencia promedio de 301.58 kg/cm<sup>2</sup>, superior tanto al método convencional como a la configuración con aditivo antes del homogeneizado. Este comportamiento demuestra que la secuencia de incorporación del aditivo modifica de forma importante la evolución de la hidratación en

edades tempranas y que el desarrollo resistente del hormigón no responde de manera lineal frente al proceso de homogeneización.

Aunque el objetivo principal de la investigación estuvo enfocado en evaluar y mejorar la resistencia temprana del hormigón, los resultados más relevantes y técnicamente más significativos se evidenciaron a los 28 días de curado. Las mejoras obtenidas durante los días 1 y 2 fueron moderadas en comparación con el método convencional; sin embargo, a los 28 días ambas configuraciones con homogeneizador presentaron incrementos considerablemente mayores, mostrando un comportamiento muy superior al inicialmente esperado dentro del alcance de la investigación. La configuración con incorporación del aditivo antes del homogeneizado alcanzó una resistencia promedio de 594.22 kg/cm<sup>2</sup>, equivalente a un incremento aproximado del 48 % respecto al método convencional, mientras que la configuración con aditivo después del homogeneizado alcanzó 539.49 kg/cm<sup>2</sup>, correspondiente a un incremento cercano al 34.22 %. Estos resultados evidencian que el efecto del homogeneizador no se limita únicamente a acelerar el desarrollo resistente inicial, sino que produce modificaciones importantes en la evolución progresiva de la hidratación y en la consolidación de la microestructura del hormigón a largo plazo.

La diferencia observada entre las mejoras moderadas en edades tempranas y los incrementos altamente significativos a los 28 días permite concluir que el proceso de homogeneización de alta velocidad influye de manera más profunda en la calidad interna y en la densificación progresiva de la matriz cementicia que en una simple aceleración inicial de resistencia. Esto sugiere que la alta energía de mezclado favorece una mejor dispersión de las partículas cementicias y una reducción más eficiente de zonas débiles y vacíos internos, permitiendo que el proceso de hidratación continúe desarrollándose de manera más uniforme y eficiente durante el curado prolongado. En consecuencia, el comportamiento obtenido a los 28 días representa uno de los hallazgos más importantes de la investigación, ya que demuestra que el homogeneizador tiene un impacto considerable no solo en la resistencia temprana, sino especialmente en el desempeño mecánico final del hormigón.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye además que el beneficio del homogeneizador no debe interpretarse únicamente como un incremento numérico de resistencia, sino como una mejora integral en la homogeneidad de la mezcla, en la compactación de la matriz cementicia y en la eficiencia de interacción entre cemento, agua y aditivo. Esto permite afirmar que el homogeneizador de alta velocidad constituye

una herramienta técnicamente eficaz para optimizar el comportamiento mecánico del hormigón, siempre que exista un control adecuado de variables como la velocidad de operación, el tiempo de mezclado y la secuencia de incorporación del aditivo.

En términos generales, la investigación permitió comprobar que el homogeneizador de alta velocidad constituye una alternativa técnicamente viable para mejorar el desempeño del hormigón frente al mezclado convencional. La incorporación del aditivo antes del proceso de homogeneización presentó el mejor desempeño global del estudio, especialmente por su comportamiento al día 1 y por la ventaja altamente significativa obtenida a los 28 días, consolidándose como la configuración más eficiente dentro del programa experimental desarrollado. De esta manera, el aporte principal de la investigación no solo consiste en validar el uso del homogeneizador como herramienta de mejora, sino en demostrar que el control técnico del proceso de mezclado y de la interacción entre el aditivo y la energía de homogeneización representa el verdadero factor decisivo en la optimización del comportamiento resistente del hormigón.

### **3.5 Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos, se recomienda considerar la incorporación del aditivo hiperplastificante antes del proceso de homogeneización como la configuración más favorable dentro de las condiciones evaluadas, debido a que presentó el mejor desempeño resistente al día 1 y, especialmente, a los 28 días de curado, donde se registraron los incrementos más significativos frente al método convencional. Este comportamiento evidencia que la interacción temprana entre el aditivo y la energía de alta cizalla favorece una dispersión más eficiente de las partículas cementicias y una estructura interna más uniforme y compacta.

Sin embargo, también se recomienda considerar que la incorporación del aditivo después del proceso de homogeneización presentó el mejor comportamiento mecánico al día 2, alcanzando la mayor resistencia promedio dentro de las etapas tempranas evaluadas. Este resultado confirma que la secuencia de incorporación del aditivo influye directamente en la evolución de la hidratación y en el desarrollo resistente del hormigón, por lo que futuras investigaciones deberían profundizar en el análisis de esta interacción y en la influencia específica que tiene cada etapa de mezclado sobre el comportamiento mecánico del material.

Aunque la investigación estuvo enfocada principalmente en el estudio de la resistencia temprana del hormigón, los resultados obtenidos a los 28 días representaron el hallazgo más relevante del trabajo experimental. Las mejoras observadas en edades tempranas fueron moderadas; no obstante, el incremento considerable de resistencia registrado a los 28 días evidencia que el efecto del homogeneizador de alta velocidad no se limita únicamente a acelerar la resistencia inicial, sino que influye de manera significativa en la evolución progresiva de la hidratación y en la densificación de la matriz cementicia a largo plazo.

En este contexto, se recomienda ampliar futuras investigaciones enfocadas en el comportamiento del hormigón a edades medias y finales de curado, debido a que los resultados obtenidos sugieren que el potencial del homogeneizador de alta velocidad es mayor al inicialmente planteado dentro del estudio de resistencia temprana. Los incrementos alcanzados a los 28 días abren nuevas posibilidades de análisis relacionadas con la compactación interna del material, la reducción de vacíos y el mejoramiento progresivo de la microestructura del hormigón mediante procesos de mezclado de alta energía.

Asimismo, sería importante evaluar diferentes dosificaciones de aditivo, tiempos de homogeneización, velocidades de operación y relaciones agua/cemento, con el fin de determinar cómo estas variables modifican el comportamiento resistente del hormigón y si es posible optimizar aún más los resultados obtenidos. De igual manera, resulta pertinente complementar el análisis con estudios relacionados con durabilidad, permeabilidad, absorción y comportamiento frente a agentes agresivos, ya que las mejoras observadas sugieren que el efecto del homogeneizador podría extenderse más allá de la resistencia a compresión.

Se recomienda también emplear equipos con mayor estabilidad operativa y mejor control de revoluciones por minuto, debido a que la constancia de la energía aplicada constituye un factor importante para garantizar la uniformidad del proceso y la repetibilidad de los resultados experimentales. Un control más preciso permitiría reducir variaciones entre mezclas y facilitar la futura estandarización de esta tecnología en aplicaciones de laboratorio y posibles condiciones de campo.

Finalmente, los resultados obtenidos permiten establecer que el estudio del homogeneizador de alta velocidad todavía presenta un amplio campo de investigación dentro de la tecnología del hormigón, más allá de los objetivos iniciales relacionados con la resistencia temprana, el comportamiento observado a los 28 días demuestra que esta metodología posee un potencial importante para mejorar el desempeño mecánico del hormigón y generar nuevas líneas de investigación asociadas a mezclas de alto desempeño, optimización del proceso de fabricación y mejor aprovechamiento de los materiales cementicios.

## Bibliografía

- Consuegra, L. L., & García, C. R. (2022). Factores que influyen en la resistencia a la compresión del hormigón. Estado del arte. *Revista Arquitectura e Ingeniería ISSN-e 1990-8830, Vol. 16, N° 3, 2022.*
- Hall, N. (2012). *Properties of concrete (5th edition)*. Pearson. International Economy Edition.
- Institute., A. C. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. Farmington Hills, MI.: American Concrete Institute.
- International, A. (2019). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (ASTM C192/C192M-19)*. West Conshohocken, PA. ASTM International.
- Kosmatka, S. H. (2011). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, IL. Portland Cement Association.
- M. Palacios, F. P. (2005). Aditivos superplastificantes basados en policarboxilatos y poliéteres. Compatibilidad con cementos. *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), Madrid.*
- M. Palacios, F. P. (2005). *CEMENTO HORMIGÓN*. Obtenido de <https://cemento-hormigon.com/cemento/aditivos-superplastificantes-basados-en-policarboxilatos-y-polieteres-compatibilidad-con-cementos>
- N. E., & C. (2018). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO*. INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
- Neville, H. (2012). *Properties of concrete (5th edition)*. Pearson. International Economy Edition.
- P. Kumar Mehta, P. J. (2006). *CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials*.
- Remus. (2022). *Producción de hormigón asistida por ultrasonidos*. Alemania.
- S.C, S. J. (2009). *HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA INICIAL (FAST TRACK)*. Obtenido de UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO: <https://repositorio.unab.cl/items/42c4b9c0-6446-43ef-8a4e-a75b876aefba>

Castro, J. D. , & O. G. L. (2019a). . *TÍTULO: Resistencia a la compresión de cilindros de concreto (Falla con almohadillas) 2. NORMA DE REFERENCIA: ASTM C39, ASTM C1231 3. ALCANCE.*

De, N. E., & Construcción, L. A. (n.d.-a). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO.*

Dils, J., de Schutter, G., & Boel, V. (2012). Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: A review. In *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* (Vol. 45, Issue 11, pp. 1673–1683). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9864-8>

-Ecuador, Q. (n.d.). *INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.*  
Hidrovo, C., Steeven, F., Vargas, C., Chavarria, O. M., Fernando, T., Ganchozo Hernandez, A., Celine, C., Intriago, G., Fernando, F., Sanchez, G., Sam, M., Cesar, J., & Bravo, P. (2019). *IMPORTANCIA DEL HORMIGÓN EN LA INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ FACULTAD DE CIENCIAS MATEMÁTICAS, FÍSICAS Y QUÍMICAS CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL PROFESOR.*

Horszczaruk, E., Łukowski, P., & Seul, C. (2020). Influence of dispersing method on the quality of nano-admixtures homogenization in cement matrix. *Materials*, 13(21), 1–14. <https://doi.org/10.3390/ma13214865>

Lu, D., & Zhong, J. (2022). Carbon-based nanomaterials engineered cement composites: a review. In *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience* (Vol. 3, Issue 1). Springer Nature. <https://doi.org/10.1186/s43065-021-00045-y>  
Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2008). *Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón Autores.*

Shcherban', E. M., Stel'makh, S. A., Beskopylny, A. N., Mailyan, L. R., Meskhi, B., Varavka, V., Beskopylny, N., & El'shaeva, D. (2022). Enhanced Eco-Friendly Concrete Nano-Change with Eggshell Powder. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/app12136606>

Teichmann, A., Strahm, B., Garrecht, H., & Blandini, L. (2024). *Effects of a two-stage mixing process on the characteristics of concrete: Part I-Hardened concrete characteristics.* <https://doi.org/10.18419/darus-3753>  
*toaz.info-properties-of-concrete-by-adam-neville-pr\_bbf4bc8b91bf0f9e35862c0087efbb89.* (n.d.).

*UNIVERSIDAD DE CUENCA Facultad de Ingeniería Carrera de Ingeniería Civil.*  
(n.d.-a).

Vashisth, V., Nigam, K. D. P., & Kumar, V. (2021). Design and development of high shear mixers: Fundamentals, applications and recent progress. *Chemical Engineering Science*, 232, 116296. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2020.116296>

Wan, Y., Cao, H., Zhang, G., Lu, X., Gao, Y., Niu, J., He, C., & Lu, X. (2025). Influence of Mixing Conditions on the Strength and Microstructure of Cement Paste. *Buildings*, 15(18). <https://doi.org/10.3390/buildings15183277>

Wu, T., Wang, H., & Rong, Z. (2024). The Dispersion and Hydration Improvement of Silica Fume in UHPC by Carboxylic Agents. *Materials*, 17(17). <https://doi.org/10.3390/ma17174253>

Zambrano Navarrete, L. D., Alava Santos, R. J., Ruíz Párraga, W. E., & Menéndez Menéndez, E. A. (2022). Aplicación de métodos de curado y su influencia en la resistencia a la compresión del hormigón. *Gaceta Técnica*, 23(1), 35–47. <https://doi.org/10.51372/gacetatecnica231.4>