

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1 Introducción

Los hormigones de alta resistencia han ido desarrollándose de una forma gradual a lo largo de las etapas de la evolución del hormigón. Debido al notable desarrollo de la tecnología de los materiales, ha sido posible el crecimiento de la utilización de los hormigones de alta resistencia, especialmente con la incorporación de aditivos y adiciones.

La aplicación de hormigones de alta resistencia ha tenido y tiene una gran aceptación en edificios de gran altura a fin de conseguir las resistencias necesarias para disminuir secciones y pesos sobre las cimentaciones.

Para este tipo de hormigón se usan relaciones agua cemento bajas, por lo tanto, algunas propiedades del hormigón en estado fresco podrían verse afectadas (la homogeneidad y la trabajabilidad), para evitar este tipo de complicaciones, es necesario utilizar aditivos que mejoren las propiedades del hormigón. Los tipos de aditivos que se utiliza para fabricar hormigón de alta resistencia, son los superplastificantes, los mismos que son aditivos reductores de agua de alto rango.

El hormigón de alta resistencia es un hormigón especial, que para lograr resistencias elevadas se pueden aplicar diferentes técnicas y una de ellas es utilizar adiciones de microsilíce. En este tipo de hormigones, hay que destacar que además de la mayor resistencia a la compresión que se puede obtener, también se ve mejorada su durabilidad en comparación del hormigón convencional, así como la resistencia a la carbonatación, al ataque de cloruros, entre otros.

El hormigón, al poseer durabilidad y resistencia conforma uno de los materiales de más uso en el ámbito de la construcción; éste presenta dos características básicas que lo hacen diferente al resto de los materiales: en primer lugar, puede ser preparado al momento, ya sea por personal especializado en obra o en una planta de premezclado, debiendo en ambos casos conocerse las cantidades de material a mezclar para obtener un hormigón apropiado; y en segundo lugar, el hormigón debe cumplir con los

requisitos en dos estados, el fresco y el endurecido, en el primero básicamente de consistencia y cohesión, y el segundo de resistencia y durabilidad.

El uso de aditivos y adiciones nos permiten hoy en día contar con hormigón de alta resistencia; sin embargo, el éxito de su obtención depende mucho del correcto uso de los mismos y de la acertada elección del producto; es por ello que se cuenta con un amplio progreso en este campo y es conveniente estar correctamente informado ya que la eficacia depende en gran parte de estos factores. Debido a todo ello es que es necesario conocer el comportamiento del hormigón de alta resistencia con dichos aditivos y adiciones que están en el mercado, en el mismo sentido conocer el comportamiento de su unión, todo ello con la finalidad de estar a la vanguardia en el mundo de la construcción.

La presente investigación se centra en la elaboración de hormigones de alta resistencia. Para lograrlo, se tiene como punto de partida una mezcla patrón de 35 MPa, incrementando progresivamente el porcentaje de superplastificantes y microsílice.

Esta investigación experimental permite observar cómo estas modificaciones influyen en la resistencia a compresión. Con ello, se pretende establecer proporciones que sirvan de referencia técnica para la elaboración de un hormigón de alta resistencia, para futuras aplicaciones estructurales.

Por tanto en el presente documento se describen los resultados de la investigación y cada una de las etapas en el desarrollo de la misma; con fines claros de facilitar al lector las bases científicas para tomar decisiones de aplicación del hormigón de alta resistencia bajo condiciones de diseño similares o simplemente informar acerca de nuevas tecnologías ahora disponibles en nuestro país, mediante la aplicación del método de diseños de mezcla ACI-211.1, Complementando con la identificación de las características físicas de todos los componentes del hormigón, el cual se lo desarrollara en el laboratorio de hormigones y resistencia de materiales de la carrera de Ingeniería Civil de la U.A.J.M.S.

1.2 El problema

La interacción de los aditivos tanto como las adiciones, con el material cementante utilizado no siempre es predecible, y el comportamiento de estos en combinación puede variar dependiendo de la proporción utilizada. Este aspecto genera incertidumbre sobre cómo estos impactan la resistencia final del hormigón, y cómo se deben ajustar la proporción de alguno de sus componentes, para conseguir el máximo rendimiento.

Esta problemática justifica la necesidad de una investigación que permita comprender el uso de los aditivos y las adiciones que puedan potenciar la resistencia mecánica del hormigón, ajustando la demanda de agua para compensar las variaciones causadas por su incorporación.

1.2.1 Planteamiento

Por medio de la realización de ensayos en laboratorio y cálculos correspondientes, tabular la variabilidad en la resistencia a compresión del hormigón con una resistencia de 35 MPa cuando se incorporan porcentajes controlados de un aditivo superplastificante y la combinación de este con la adición de microsilice en su elaboración. Como parte del análisis comparativo, se incluirá una mezcla patrón en la que se utilizará únicamente cemento como conglomerante hidráulico. Esta referencia permitirá validar los efectos reales de resistencia y comportamiento del material. para así dar a conocer la importancia que tiene las incorporaciones antes mencionadas en la elaboración de hormigones. Con el objetivo de determinar si las mezclas evaluadas alcanzan las características propias de un hormigón de alta resistencia y así definir las proporciones finales de estos.

1.2.2 Formulación

Debido a las variaciones en la fabricación del cemento y, por consiguiente, a sus diferentes composiciones, los aditivos y adiciones no actúan siempre de la misma manera. Esto hace necesario estudiar su efecto en condiciones locales, utilizando agregados de la región. No obstante, la dosificación adecuada de estos materiales resulta crítica para asegurar

que se alcancen las propiedades deseadas. En muchos casos, las proporciones de los materiales y la selección de aditivos o adiciones no son las más adecuadas, lo que puede derivar en hormigones que no cumplen con los estándares de resistencia y durabilidad requeridos.

Por todo lo expuesto, se formula las siguientes preguntas de investigación:

1.2.3 Sistematización

- ¿Cómo influye la incorporación del aditivo superplastificante y su combinación con adición de microsílíce en diferentes porcentajes, sobre la resistencia a compresión del hormigón, en comparación con una mezcla patrón de 35MPa?
- ¿Cuál es la combinación de aditivo superplastificante y adición de microsílíce que permite obtener un hormigón con mejores propiedades mecánicas?
- ¿Qué ajustes en la dosificación de los componentes (agua) son necesarios al incorporar aditivos para garantizar un hormigón de alta resistencia sin comprometer su trabajabilidad?
- ¿Qué conclusiones se pueden obtener sobre la viabilidad técnica y económica del uso de aditivos y adiciones las mezclas de hormigón de alta resistencia, considerando condiciones y materiales locales?

Las preguntas formuladas anteriormente guían el desarrollo del estudio y se encuentran vinculadas con los elementos del problema, los objetivos y las hipótesis en la matriz de sistematización (P.C.E.S.), la cual se presenta en el ANEXO A.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

- Realizar un análisis experimental empírico de la resistencia a compresión de hormigones de alta resistencia mediante la adición de un superplastificante y microsílíce, con el fin de incrementar la resistencia a compresión respecto a un hormigón convencional de 35 MPa.

1.3.2 Específicos

- Caracterizar los materiales componentes del hormigón con el fin de conocer sus propiedades físicas, ya que estas inciden directamente en la calidad final de este.

- Determinar una dosificación patrón utilizando el método ACI-211.1 para un hormigón con una resistencia especificada de 35 MPa, como punto de comparativo con las mezclas modificadas.
- Preparar mezclas experimentales incorporando el aditivo superplastificante en proporciones del 0.5%, 1%, 1.5% y 2% respecto al peso del cemento, con el objetivo de evaluar su efecto sobre la resistencia a compresión del hormigón.
- Preparar mezclas experimentales incorporando la adición de microsílice en proporciones del 2.5%, 5%, 7.5% y 10% respecto al peso del cemento, en combinación con los porcentajes de aditivo superplastificante establecidos en el punto anterior (0.5%, 1%, 1.5% y 2%), con el objetivo de evaluar su efecto conjunto sobre la resistencia a compresión del hormigón.
- Determinar la resistencia a compresión de las probetas elaboradas a edades de 7, 14 y 28 días.
- Elaborar la curva de evolución de la resistencia en función del tiempo de curado del hormigón y Comparar dicha evolución entre tres tipos de mezclas: hormigón con aditivo superplastificante y la adición de microsílice, hormigón con solo aditivo superplastificante, y un hormigón patrón.
- Ajustar las dosificaciones teóricas en función de los efectos generados por la incorporación de aditivo superplastificante y la adición de microsílice.
- Realizar un análisis comparativo económico entre los diferentes tipos de mezclas de hormigón evaluadas.

1.4 Justificación

1.4.1 Académica

Aplicar los conocimientos asimilados en las asignaturas pertinentes de la malla curricular de la carrera de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, buscando un desarrollo intelectual capaz de enfrentar problemas.

1.4.2 Técnica

La presente investigación se justifica y llega a tener gran importancia, ya que en vista del continuo avance de la tecnología y la exigencia a la industria de la construcción

de estar a la vanguardia es requerido contar con materiales de mayor resistencia a la compresión para lograr estructuras de mayor altura y soporte a mayores cargas, con una menor cantidad de elementos estructurales y una menor sección en dichos elementos, es por ello que se debe estudiar y conocer bien el comportamiento de hormigón con proporciones apropiadas para obtener altas resistencias haciendo uso de aditivos y adiciones como los utilizados en la presente investigación: aditivo súper plastificante y adiciones de micro sílice estudiados individualmente y en la combinación de cada uno de ellos.

1.4.3 Social

Este proyecto de investigación contribuye al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería civil y la tecnología de materiales. Promover un entorno de innovación continua que promueve la sostenibilidad, mejorar la eficiencia en el uso de recursos, y contribuir a la calidad y durabilidad de las infraestructuras. Este enfoque no solo beneficia a la industria de la construcción. Sino que también al medio ambiente al generar un potencial ahorro en los materiales.

La investigación promueve el uso de productos que mejoren el rendimiento del hormigón sin necesidad de incrementar significativamente la cantidad de cemento, cuya producción tiene un alto impacto ambiental. De esta manera, el estudio busca no solo optimizar el aprovechamiento de los recursos materiales, sino también reducir el impacto ambiental asociado con la fabricación del hormigón.

Además, la correcta dosificación del hormigón de alta resistencia no solo tiene un impacto técnico, sino también económico, ya que puede generar un ahorro en los costos de los materiales utilizados, lo que resulta en un beneficio directo para la industria de la construcción. Este ahorro, combinado con la mejora de la calidad, puede tener un efecto multiplicador, favoreciendo tanto a las empresas constructoras como a los consumidores finales, quienes se beneficiarían de infraestructuras más económicas, pero igualmente seguras y duraderas.

1.5 Alcance

La presente investigación se enfoca en evaluar el comportamiento del hormigón de alta resistencia elaborado con agregados regionales y cemento Fancesa tipo IP-40,

mediante la incorporación de un aditivo superplastificante y la adición de microsilíce. Se considera una mezcla patrón de 35 MPa, con cemento como único conglomerante, que servirá como referencia para comparar las mezclas modificadas mediante la incorporación controlada del superplastificante y su combinación con la microsilíce. El análisis experimental se centrará en la resistencia a compresión como variable dependiente principal, evaluando las mezclas a 7, 14 y 28 días de curado. Asimismo, se medirá el efecto de los productos sobre la trabajabilidad mediante el ensayo de asentamiento. Las únicas variables experimentales serán el tipo y porcentaje de aditivo superplastificante y de adición de microsilíce incorporados, manteniéndose constantes los demás componentes de la mezcla.

La investigación se desarrollará siguiendo los criterios establecidos por la norma ACI-211.1 para la dosificación del hormigón. No se considerarán otras propiedades mecánicas ni aspectos relacionados con la durabilidad a largo plazo.

Finalmente, se buscará definir proporciones de materiales que permitan una dosificación eficiente del hormigón de alta resistencia, en función de los resultados obtenidos en los ensayos. Asimismo, se elaborarán conclusiones y recomendaciones que puedan servir como guía técnica para el uso de los aditivos y adiciones evaluados en este estudio.

1.6 Hipótesis

La incorporación de porcentajes controlados de aditivo superplastificante en proporciones de 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%, así como su combinación con la adición de microsilíce en porcentajes de 2.5%, 5.0%, 7.5% y 10.0% respectivamente, ambos referidos al peso de cemento, incrementara la resistencia a compresión de un hormigón convencional de 35 MPa hasta en un 40% respecto al hormigón patrón sin aditivos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Introducción

Antes de continuar con la lectura de este documento se vuelve necesario definir una serie de elementos muy relacionados con el hormigón de alta resistencia. Se empezará abordando lo que es hormigón de alta resistencia a fin de que los lectores comprendan que muchas veces no basta restringir este material con requisitos únicamente numéricos, que si bien los rangos de resistencia a la compresión son sumamente importantes igual o mucho mayor es de importante cumplir con requisitos de durabilidad que garantizan la funcionabilidad de las estructuras y no solo eso, existen países en donde el solo hecho de elaborar hormigones convencionales es toda una hazaña importante de admirar.

El hormigón de alta resistencia en muchas ocasiones va acompañado de otras bondades como la baja permeabilidad, la resistencia al desgaste, al aumento de la rigidez, a una serie de beneficios en estado fresco, y muchos otros. Por eso hasta la fecha la resistencia a los esfuerzos de compresión se toma como el parámetro principal para cumplimiento de la calidad de este material.

Se puede elaborar de manera simple si se siguen programas de control de calidad desde los materiales constituyentes hasta en la elaboración del hormigón como tal. No sin antes seguir buenas prácticas de diseño de mezclas y selección de materiales.

El problema muchas veces es que existen países en donde aún no se adaptan los diseños a las propiedades de los materiales locales, esto genera una importante variación en los resultados y por ende cierta “aceptable” desconfianza en los proyectistas a optar por el hormigón de alta resistencia. Un material bondadoso por el cual vale la pena invertir en estudios como el aquí presente.

En el presente capítulo, se detallan los aspectos más relevantes de la tecnología del hormigón, como definiciones, las aplicaciones de este tipo de hormigón, ventajas y desventajas sobre su utilización, propiedades mecánicas de este tipo de hormigón, finalizando con la caracterización de los materiales componentes del hormigón y

nombramiento de normativas a utilizar en el procedimiento experimental para alcanzar un hormigón de alta resistencia.

2.2 Definición de hormigón de alta resistencia.

La definición de "alta resistencia" en términos de un valor numérico de aplicación universal no es posible, al menos no con algún alto grado de justificación. "Alta resistencia" es un término relativo que depende de muchos factores, tales como la calidad de los materiales del hormigón disponibles a nivel local y las prácticas de construcción. Muchos investigadores no creen necesario que la alta resistencia del hormigón se define en términos de un valor numérico, sin embargo, en este documento se sugieren rangos en los que la mayoría de las autoridades están de acuerdo; este es un umbral razonable para lo que se considera "hormigón de alta resistencia", con base a las definiciones adoptadas en ACI 363R-10.

La resistencia no es una propiedad intrínseca del hormigón. Es una propiedad familiar que depende de numerosos factores. Los Factores principales que influyen en la resistencia medida del hormigón incluyen geometría de la probeta, el tamaño, edad y la historia de curado; parámetros de los equipos de prueba, tales como capacidad de carga, la rigidez lateral y longitudinal, la tasa de carga y la uniformidad de la distribución de la carga.

Hay consideraciones geográficas también. En las regiones donde se producen comercialmente en una forma rutinaria hormigón con resistencia a la compresión de 60 MPa el hormigón no puede ser considerado de "alta resistencia" hasta que se alcance una resistencia medida en el rango de 70 o 80 MPa.

Por el contrario, en las regiones donde el límite superior del hormigón disponibles en el mercado ha sido de 30 MPa, el hormigón que cumple con éxito un requisito de diseño de 40 MPa podría ser considerado de alta resistencia, y por una buena razón.

La razón de esta diversidad es doble: la necesidad y la capacidad, aunque hay que tener en cuenta que ambos son relativos, el tipo de construcción necesitará la iniciativa del diseñador, la capacidad y el compromiso del productor de hormigón y la calidad disponible a nivel local de los materiales.

La definición de hormigón de alta resistencia con un valor de resistencia especificado en esencia establece una línea seleccionada arbitrariamente de demarcación la cual no es ni práctica ni justificada. La principal preocupación de muchos autores en los valores elegidos arbitrariamente que definen la alta resistencia es que el hormigón en general es habitualmente producido en mercados donde el solo hecho de elaborarlo puede ser considerado un gran logro en sí.

La definición de hormigón de alta resistencia no es de ninguna manera estática. Cuando el hormigón de alta resistencia se ha definido en términos de un valor numérico preciso, su definición ha cambiado con los años.

En la versión de 1992 del Informe del Comité ACI 363, 41 MPa fue seleccionado como un límite inferior para el hormigón de alta resistencia. Según ese informe, aunque este valor fue seleccionado como el límite inferior, no era la intención de implicar cualquier cambio drástico en las propiedades del material o técnicas de producción que se producía a este nivel de resistencia a la compresión.

En realidad, todos los cambios graduales que se producen representan un proceso que se inicia con niveles de resistencia muy modestos y continúa así hasta donde gobierna el hormigón de muy alta resistencia.

En la revisión de la versión de 2001, del Informe del Estado de Arte del hormigón de Alta Resistencia, el Comité 363 define como hormigón de alta resistencia al que tiene una resistencia a la compresión especificada para el diseño de 55 MPa, o mayor. El Comité 363 también reconoció que la definición de hormigón de alta resistencia varía sobre una base geográfica. El Comité reconoció que la selección de materiales, el proceso de diseño de la mezcla de hormigón, la dosificación, mezcla, transporte, colocación, curado, y los procedimientos de control de calidad son aplicables a una amplia gama de resistencias del hormigón. Sin embargo, el Comité 363 también acordó que las propiedades de los materiales y las consideraciones de diseño estructural que se abordan en el informe deben estar enfocados en hormigones que tengan la más alta resistencia a la compresión.

A pesar de la firme creencia de muchos autores de que el hormigón de alta resistencia no se define por un valor numérico fijo, teniendo en cuenta el título de esta

investigación es razonable definir al menos un rango de resistencia a la compresión y aceptación designada a edades que son considerados por la mayoría de las autoridades dentro del umbral de "alta resistencia". (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

En el contexto europeo, la Instrucción EHE-08 citada por García Meseguer, Morán Cabré y Arroyo Portero (2009), Se consideran hormigones de alta resistencia (HAR) aquellos cuya resistencia característica a compresión f'_{ck} en probeta cilíndrica 15×30 cm, a 28 días, es igual o superior 50 MPa sin rebasar los 100 MPa.

Algo acorde con las definiciones del Informe del Estado de Arte del hormigón de Alta Resistencia del Comité ACI 363 y en cumplimiento del rango mínimo que establece el ACI 211.4R-08 de 41 MPa, que también sirve como base para esta investigación.

En el presente estudio se adopta esta última definición. No obstante, dado que la investigación se desarrolla conforme a la metodología de dosificación propuesta por el American Concrete Institute (ACI), se adopta un criterio equivalente basado en la resistencia especificada a compresión (f'_c), parámetro utilizado por dicha institución como referencia para la clasificación del hormigón de alta resistencia.

Por supuesto, si la tasa de la industria de los avances en la tecnología de materiales continúa, tal vez no sea mucho antes de que los valores de esta magnitud se vuelvan obsoletos.

2.2.1 Aplicaciones:

Beneficios excepcionales, tanto técnicos como económicos, se han obtenido utilizando hormigón de alta resistencia. Debido a estas ventajas, el hormigón de alta resistencia está siendo utilizado regularmente en muchas aplicaciones, incluyendo edificios, estructuras marítimas, elementos de puentes, revestimientos y pavimentos.

El hormigón de alta resistencia se utiliza a menudo en las estructuras no por su resistencia, sino por otras propiedades de ingeniería que vienen añadidas con mayor resistencia, como el aumento de módulo de elasticidad estático (rigidez), reducción de la permeabilidad de materiales perjudiciales, o de alta resistencia a la abrasión.

En las estructuras de puentes, el hormigón de alta resistencia se utiliza para lograr uno o una combinación de los siguientes atributos mecánicos:

- Aumentar la longitud del claro;
- Aumentar el espaciamiento entre vigas y
- Reducir la profundidad de la sección.

La reducción de la permeabilidad del hormigón de alta resistencia presenta oportunidades para mejorar la durabilidad y aumentar la vida útil de servicio de las estructuras.

En los edificios, el hormigón de alta resistencia presenta oportunidades para la reducción de tamaño de las columnas, lo que resulta en menores volúmenes de hormigón y grandes reducciones en las cargas muertas.

Aunque el costo por unidad de volumen del hormigón de alta resistencia es probablemente mayor que el del hormigón de resistencia convencional, dadas las ventajas mecánicas del hormigón de alta resistencia, el costo total de la construcción de una estructura elaborada incorporando hormigón de alta resistencia puede ser inferior.

El hormigón de alta resistencia es un material versátil y puede adaptarse fácilmente a los requisitos de cada proyecto, aunque comúnmente se utiliza en este tipo de elementos:

- Pilotes y pilas de cimentación.
- Elementos pre-esforzados; vigas y losas pre o post-tensadas.
- Columnas en edificios de mediana y gran altura.
- Bóvedas de seguridad.
- Columnas y vigas en puentes.
- Tableros de puentes de gran esbeltez.
- Hormigones sometidos a ambientes agresivos.
- Pisos Industriales de tráfico pesado.
- Entre otras. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

2.2.2 Ventajas y desventajas del uso de hormigones de alta resistencia.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la aplicación del hormigón de alta resistencia

VENTAJAS	DESVENTAJAS
▪ Posibilidad de disminuir secciones transversales de los elementos estructurales. ▪ Uso eficiente del cemento. ▪ Uso eficiente de la mano de obra. ▪ Disminuye el porcentaje de aire en la mezcla de concreto. ▪ Aumenta la vida útil de la estructura. ▪ Mejora la protección contra la corrosión. ▪ Permite optimizar costos en las estructuras. ▪ Presenta una mayor resistencia a la erosión. ▪ Incremento del área rentable. ▪ Permite bombearlo a grandes alturas. ▪ Posee alta fluidez. ▪ Posible reducción de la cantidad de acero de refuerzo. ▪ Alto módulo de elasticidad. ▪ Su módulo de deformación es más elevado y, por tanto, tienen un menor acortamiento debido a esfuerzos axiales. ▪ Permite una remoción temprana del encofrado ▪ Permite incrementar el espaciamiento del apuntalamiento. ▪ Mayor durabilidad. ▪ Peso propio global de la estructura inferior con la consiguiente reducción de la cimentación. ▪ Mejor acabado. ▪ Mayor rendimiento.	▪ Se requiere personal capacitado para su manejo. ▪ Sensible a las variaciones de las materias primas. ▪ Mayor precio unitario de material. ▪ Requiere excelentes condiciones de curado. ▪ Cualquier adición de agua, cemento o aditivo en obra alterará su diseño, perjudicando la calidad del concreto. ▪ Se deben cumplir estrictamente todas las normas referentes a manejo, protección y control del concreto.

Fuente: (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

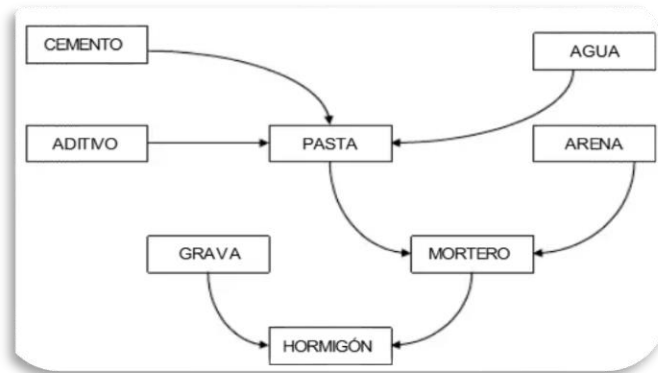
2.3 Principales Características del Hormigón

El hormigón es de uso común en las estructuras civiles, el cual se produce esencialmente por la mezcla de tres componentes: Cemento, Agregados y Agua. Sin embargo, en aplicaciones específicas como el hormigón de alta resistencia, es habitual incorporar un cuarto componente, al que se denomina aditivos y/o adiciones.

Estos son sustancias que, añadidas en pequeñas proporciones, tienen como propósito modificar o mejorar ciertas propiedades del hormigón fresco o endurecido.

La integración de los componentes del hormigón se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Esquema de integración del hormigón



Fuente: Elaboración propia

Hoy en día el uso de aditivos se convierte en un integrante más de las mezclas de hormigón con el objetivo de mejorar una o más propiedades del hormigón.

La mezcla de los componentes principales ya mencionados, para la elaboración del hormigón, producen una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad, cabe notar que gradualmente pierde esta característica al cabo de unas horas, donde la masa de hormigón posteriormente se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, llegando a convertirse finalmente en un material mecánicamente resistente conocido como hormigón endurecido o hormigón estructural.

El comportamiento de este material y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

1. Las características, composición y propiedades de la pasta de cemento, o matriz cementante.
2. La calidad propia de los agregados.
3. La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad de trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, cuyas características de fabricación y almacenado sean las correctas, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y si es necesario el uso de un aditivo con el cual se pueda asegurar la calidad de la pasta de cemento o matriz cementante.

La calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no presenten un punto débil en el comportamiento del hormigón y en su capacidad para resistir adecuadamente a diferentes fenómenos o acciones que se puedan presentar a lo largo de su vida útil o puesta en servicio.

La compatibilidad y el buen trabajo en conjunto de la matriz cementante con los agregados depende de diversos factores, tales como las características físicas y químicas del cementante, la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen a los agregados, la forma, el tamaño máximo y textura superficial de los mismos.

Hay que tener en cuenta que, si se quiere obtener estructuras resistentes y durables, se debe cumplir requerimientos de diseño, especificación, construcción y mantenimiento de acuerdo a normas vigentes del lugar donde se desarrolla el proyecto.

En los últimos años, el desarrollo de estructuras más esbeltas, con mayores exigencias mecánicas y durabilidad, ha impulsado el uso del hormigón de alta resistencia (HAR). Este tipo de hormigón se diferencia del convencional principalmente por su mayor resistencia a compresión (mayor a 50 MPa), lo que se logra mediante una dosificación más precisa, el uso de aditivos especializados y una menor relación agua/cemento. Por ello, es pertinente considerar ciertas particularidades del HAR al analizar sus propiedades físicas y mecánicas.

2.3.1 Propiedades del hormigón en estado fresco

El hormigón en estado fresco es realmente una suspensión concentrada de partículas sólidas (agregados) en un líquido viscoso (pasta de cemento), la pasta de cemento a su vez no es un fluido homogéneo y está compuesta de partículas (granos de cemento) en un líquido (agua). Por lo tanto, el hormigón en estado fresco en una escala macroscópica fluye como un líquido. (Portugal Barriga, 2007)

Siguiendo esta filosofía, se debe lograr un hormigón que en estado fresco posea un bajo grado de fricción entre sus partículas, adecuado para darle una fluidez elevada. Sin embargo, también debe estar dotado de la viscosidad necesaria para asegurar la cohesión y evitar la segregación. Por tanto, es la reología del hormigón en el estado fresco la que determina sus cualidades. La fluidez elevada y la viscosidad adecuada se alcanzan utilizando aditivos superfluidificantes, adiciones de elevada finura y en algunos casos agentes que aumentan la viscosidad.

Es muy importante medir sistemáticamente las propiedades del hormigón de alta resistencia en estado fresco justo después del mezclado. Esta es la forma más fácil de averiguar si algo está mal durante el proceso de elaboración y permite tomar una acción correctiva rápida. Si las propiedades del hormigón fresco cambian, no siempre es fácil determinar si el problema viene de los materiales (cambios en su calidad, en el contenido de agua de los agregados, etc), de la dosificación (formulación inadecuada, errores en la cantidad de cemento, agregados equivocadas, secuencia equivocada), de los equipos utilizados o de la forma de dispersión de las adiciones y aditivos, etc. Como el hormigón de alta resistencia es más sensible a las variaciones en la mezcla debido a que los materiales están trabajando cerca de, o en, su máximo potencial, cualquier desviación de las características optimizadas de los materiales y de su mezcla puede modificar fuertemente las propiedades del hormigón tanto en estado fresco como endurecido. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

El hormigón en estado fresco presenta las siguientes propiedades:

2.3.1.1 Trabajabilidad

La trabajabilidad se puede definir como la cantidad de trabajo interno útil que se requiere para producir una compactación adecuada de la mezcla. (Portugal Barriga, 2007)

La trabajabilidad depende, entre otros factores, de los siguientes

- De la cantidad de agua de amasado. Cuanto mayor sea ésta, mayor será la docilidad.

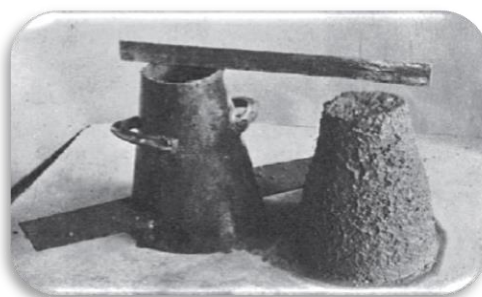
- De la granulometría de los áridos, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido en arena es mayor.
- La docilidad es mayor con áridos redondeados que con áridos procedentes de machaqueo.
- La docilidad aumenta con el contenido en cemento y con la finura de éste.
- El empleo de un plastificante aumenta la docilidad del hormigón. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

2.3.1.2 Revenimiento, asentamiento o caída

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse, existen varios procedimientos para determinar la consistencia, siendo los más empleados el cono de Abrams.

El cono de Abrams es un molde troncocónico de 30cm de altura (Fig.2) que se rellena con el hormigón objeto de ensayo. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

Figura 2. Cono de Abrams y su uso para medir el asentamiento



Fuente: (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

Tabla 2. Consistencia de los hormigones.

<i>Consistencia</i>		<i>Asiento en cono de Abrams (cm)</i>
Seca	(S)	0 a 2
Plástica	(P)	3 a 5
Blanda	(B)	6 a 9
Fluida	(F)	10 a 15
Líquida	(L)	≥ 16

Fuente: (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

La medición de la caída del hormigón normal es fácil, porque después de unos pocos segundos se detiene el colapso del cono de hormigón y mantiene una altura estable que es fácil de medir. La medición del revenimiento del hormigón de alta resistencia no es tan fácil: el colapso del cono de hormigón es progresivo y a veces es difícil decidir cuándo medir la altura del cono de hormigón colapsado.

A pesar del hecho de que esta sencilla prueba es criticada regularmente con respecto a su valor científico y tecnológico, no va a ser mañana, cuando ya no se utilice para el control de la trabajabilidad del hormigón de alta resistencia.

2.3.1.2.1 Factores que influyen en el revenimiento

Hay muchos factores que afectan la consistencia caída del hormigón, pero desde un punto de vista reológico se pueden clasificar en dos grandes categorías: los relacionados con la estructura de los agregados y los relacionados con el comportamiento reológico de la pasta de cemento en sí.

El importe total de los áridos presentes en la mezcla, las proporciones relativas de los agregados gruesos y finos, sus respectivas granulometrías y las formas de las partículas del agregado son los principales factores relacionados con la estructura del agregado que afectan al asentamiento del hormigón, ya sean del tipo convencional o de alta resistencia.

El comportamiento reológico de la pasta de cemento en el hormigón convencional se relaciona esencialmente con la relación A/C. Cuanto mayor sea esta relación, las partículas finas son más diluidas en agua, de modo físico que el agua juega un papel clave en la reología de la pasta de cemento hidratado cuando la relación A/C es alta, por ejemplo, por encima de 0.50. A una proporción tan alta de A/C, las partículas de materiales cementantes (adiciones cementantes) y cemento están tan separados unos de otros dentro de la pasta que su interacción durante la hidratación no afecta en particular el asentamiento del hormigón.

A medida que la relación agua/cemento disminuye y que aumenta la dosis de superplastificante, la situación se vuelve más y más compleja desde un punto de vista

reológico, porque el agua por sí misma ya no juega un papel clave en la reología de la pasta de cemento. El cemento y las partículas de material cementante interactúan físicamente, y esto se ve afectado por su forma, su distribución del tamaño del grano y su reactividad química.

Por otra parte, el superplastificante usado para desflocular las partículas de cemento interactúa con las partículas de cemento hidratantes de modo que ahora es un conjunto muy complejo de factores que influyen en la reología y la caída del hormigón de alta resistencia.

Por supuesto, cuanto menor sea la relación agua/cemento, se vuelve más compleja la situación, por lo que los términos tales como "pegajoso" y "tixotrópico" se utiliza para describir la consistencia de algunos hormigones de alta resistencia. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

2.3.1.3 Cohesión

Esta propiedad permite que los áridos se adhieran y aglutinen adecuadamente al gel o pasta producido por la mixtura de agua y material cementoso, evitando así la segregación (áridos gruesos por un lado y áridos finos por otro), y optimizando la trabajabilidad en la obra. Este aspecto está estrechamente relacionado con la consistencia, siendo la finura del cemento el factor dominante. El hormigón que contiene microsílice y superplastificante es más cohesivo en estado fresco y tiene menor exposición a la segregación que el hormigón normal. (Díaz Villarreal & Terán Escobar, 2023)

2.3.1.4 Homogeneidad

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales. La homogeneidad se consigue con un buen amasado y, para mantenerse, requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

La homogeneidad puede perderse por:

- Segregación que es la separación de los gruesos por una parte y los finos por otra.
- Decantación que es cuando los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida.

Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

2.3.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido

El estado endurecido del hormigón es una fase donde el cemento ha fraguado y ha perdido su plasticidad y formalidad. Hay que prestar especial atención a estas propiedades, ya que determinan su funcionalidad durante su vida útil. Las más importantes son:

2.3.2.1 Resistencia a la compresión

En este tipo de hormigones, la resistencia a la compresión es tan importante como la durabilidad; la importancia de la resistencia a la compresión radica en las funciones estructurales de este material.

La resistencia a la compresión del hormigón se rige por la resistencia e interacción de sus fases que lo componen.

- La resistencia de la pasta hidratada y endurecida (matriz).
- La resistencia de las partículas del agregado.
- La resistencia de la interfase matriz – agregado.

El hormigón es una masa endurecida que por su propia naturaleza es discontinua y heterogénea. El cemento hidratado, es en sí mismo una masa semi cristalina discontinua, con un elevado grado de porosidad, que contiene agua libre y agua no evaporable. Adicionalmente, esta agua libre al exudar y evaporarse, deja micro poros y canales capilares continuos en el gel de cemento, los cuales se convierten posteriormente en medios para el intercambio de humedad en el hormigón y el ambiente que lo rodea. (Portugal Barriga, 2007)

Para comprobar que el hormigón colocado en obra tiene la resistencia requerida, se rellenan con el mismo hormigón unos moldes cilíndricos normalizados y se calcula su resistencia en un laboratorio haciendo ensayos de rotura por compresión. En el proyecto previo de los elementos, la Resistencia especificada (f'_c) del hormigón es aquella que se adopta en todos los cálculos como resistencia a compresión del mismo, y dando por hecho que el hormigón que se ejecutará resistirá ese valor, se dimensionan las medidas de todos los elementos estructurales. Ahora bien, los valores de ensayo que proporcionan las distintas probetas son más o menos dispersos, en forma variable de una obra a otra, según el cuidado y rigor con que se fabrique el hormigón; y esta circunstancia debe tenerse en cuenta al tratar de definir un cierto hormigón por su resistencia.

El problema puede plantearse así: dados n resultados obtenidos al ensayar a compresión simple n probetas cilíndricas 15x30 cm de un mismo hormigón, determinar un valor que sea representativo de la serie y, por consiguiente, del propio hormigón.

Según el proyecto de norma NB 1225001 en 26.12.3 Criterios para la aceptación de probetas curadas en forma estándar, b) el nivel de resistencia de un tipo determinado de hormigón se considera satisfactorio si cumple con: 2) alternativamente, cuando el número de probetas sea menor a 30 se usará el método siguiente:

Ordenar de menor a mayor los resultados de las determinaciones de la resistencia de las N muestras.

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_m \leq \dots \leq x_N$$

Se define como resistencia estimada, la deducida aplicando las siguientes expresiones:

Si $N < 6$ entonces:

$$f'_{c,est} = K_N * x_1$$

Si $N \geq 6$ entonces:

$$f'_{c,est} = 2 \frac{x_1 + x_1 + \dots + x_{m-1}}{m-1} - x_m \geq K_N * x_1$$

donde:

KN= coeficiente de tabla, en función de N y del tipo de instalaciones del lab.

x1= resistencia de la muestra menos resistente

N=número de muestras

m= N/2 si "N" es par o (N-1) /2 si "N" es impar

Para que las probetas sometidas a este control puedan ser aceptada, deberá verificarse:

$$f'_{c,est} \geq f'_c$$

Tabla 3. Valores de coeficiente KN

Uniformidad del hormigón		Excelente	Buena	Regular	Mala
Desviación cuadrática media relativa (δ)		0,10	0,15	0,20	0,25
Número de muestras (N) Según 26.12.1	1	0,836	0,753	0,671	0,589
	2	0,884	0,820	0,753	0,682
	3	0,910	0,859	0,803	0,741
	4	0,928	0,886	0,838	0,784
	5	0,942	0,907	0,867	0,820
	6	0,953	0,924	0,890	0,850
	7	0,962	0,938	0,910	0,877
	8	0,970	0,951	0,928	0,900
	10	0,983	0,972	0,958	0,942
	12	0,993	0,989	0,984	0,976
	14	1,002	1,004	1,005	1,008
	16	1,009	1,016	1,024	1,035
	18	1,016	1,027	1,041	1,059

Fuente: (NB 1225001- Proyecto De Norma Boliviana Del Hormigón Estructural, 2016)

2.3.2.1.1 Factores que intervienen en la resistencia del hormigón

- **Relación agua – material cementoso (A/C)**

Si se altera la mezcla de hormigón con una cantidad diferente de cemento o de agua a la dosificación calculada, la resistencia a la compresión será veré afectada, cuanto más cemento, mayor es el esfuerzo a la compresión soportado, pero, mientras que el agua de amasado añadido sea mayor, la

resistencia será reducida, y viceversa. Para conseguir la relación agua-cemento deseada, se debe controlar la cantidad de agua y cemento en la mezcla del hormigón. (Díaz Villarreal & Terán Escobar, 2023)

- **Contextura de los áridos**

Se relaciona con la cantidad de agua, y la calidad de la pasta o gel de cemento requerida para obtener una cobertura completa de las partículas y una adherencia completa entre el gel de cemento y los áridos. La resistencia del hormigón es afectada por la modificación de la granulometría de los agregados, si esto ocurre, se debe modificar la porción de pasta requerida para preservar el nivel de resistencia y conservar la cobertura total de las partículas. Además, la reducción del tamaño del árido grueso da lugar a un decrecimiento de la cantidad de vacíos y por consiguiente un incremento en la resistencia. (Condor Proaño, 2014)

- **Humedad durante el transcurso del curado**

Es preciso asegurar un adecuado nivel de humedad durante el proceso de endurecimiento del hormigón para lograr un buen curado. Un curado inadecuado puede reducir significativamente la resistencia especificada. Mantener la temperatura y la humedad adecuada es necesario para lograr una resistencia y durabilidad óptima.

Hay varios factores físicos o ambientales que aceleran o retardan la hidratación con el tiempo, como presión, vapor, temperatura, el grado de relación A/C, esto puede aumentar o disminuir la resistencia con respecto al tipo de curado. (Díaz Villarreal & Terán Escobar, 2023)

2.4 Componentes del hormigón

2.4.1 El cemento portland

Se llama cemento Portland, a un cemento hidráulico que se obtiene de la pulverización del producto llamado Clinker, que es producto de la calcinación y hasta el punto de fusión de una mezcla de piedra caliza, arcilla desmenuzada, óxido de hierro y yeso chancado, a una temperatura que ronda entre los 1400°C y 1500°C.

Los cementantes que se utilizan para la fabricación de hormigón son de carácter hidráulico, es decir que tienen la capacidad de fraguar y endurecer al reaccionar químicamente con el agua, aun estando inmersos en ella, esta es la característica que los distingue de los cementantes aéreos, que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

2.4.1.1 Propiedades del cemento

Las propiedades más relevantes del cemento son: la finura, peso específico y resistencia del cemento. Cada parámetro se describe a continuación.

- **Finura del cemento**

La finura de molido del cemento es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento ya que influye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante su fraguado y primer endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0.01 mm por lo que si dichos granos fuesen muy gruesos, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy altos (lo que en general resulta muy perjudicial); el conglomerante resulta ser más susceptible a la meteorización (envejecimiento) tras un almacenamiento prolongado; disminuye su resistencia a las aguas agresivas , Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura , se llega a una situación de compromiso: el cemento Portland debe estar finamente molido pero no en exceso.

- **Peso específico**

El peso específico del cemento es un factor de cierta relevancia en el estudio de las propiedades del mismo, aunque cabe destacar que no es un índice de su calidad, sino por el contrario es usado para el cálculo de peso y volúmenes en una mezcla de hormigón y para deducir otras características del cemento, principalmente. El peso específico de los cementos portland suelen variar muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 3 y 3.15 gr/cm³. (Mario, 2008)

2.4.1.2 Tipos de cemento Portland

Con esta denominación, existen cinco tipos:

- **Cementos Portland, Tipo I**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 95% en masa y de cualquiera de los componentes adicionales definidos en esta norma (NB 011), o mezcla de ellos, en proporción no mayor del 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado, ni los eventos aditivos.

- **Cementos Portland con puzolana, tipo IP**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de Clinker Portland en proporción no menor del 60% ni mayor del 94% en masa, de puzolana natural en proporción no menor del 6% ni mayor del 40% en masa y otros de los componentes adicionales definidos en esta norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que deberá añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

- **Cementos Portland con filler o caliza, tipo IF.**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor del 65% hoy ni mayor del 94% en masa, filler o caliza en proporción no menor del 6% ni mayor del 20% en masa y de otros de los componentes adicionales definidos en esta misma norma, en proporción comprendida entre el 0% y el 5% en masa. Este núcleo hoy no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

- **Cemento Portland con adición de escoria, tipo IS**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor a 65% y no mayor a 94%, escoria en proporción no menor al 6% ni mayor al 35% en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre el 0% y 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

• **Cemento Portland mixto, tipo IM**

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos a base de: Clinker Portland en proporción no menor a 65% y no mayor a 94% y la combinación entre escoria; Filler; Caliza y puzolana en proporciones entre 6% al 35% en masa y de otros componentes adicionales definidos en esta norma en proporción entre el 0% y 5% en masa. Este núcleo no incluye ni el regulador de fraguado (que debe añadirse al mismo en la proporción adecuada), ni los eventos aditivos.

Tabla 4. Clasificación y composición de los cementos

Tipo de cemento			Proporción en masa, en % ¹				
			Componentes principales				Componentes adicionales
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana	Filler	Escoria	
Cemento Portland	Portland	I	95 a 100				0 a 5
	Portland con puzolana ⁴	IP	60 a 94	6 a 40			1 a 5
	Portland con filler calizo ³	IF	65 a 94		6 a 35		2 a 5
	Portland con escoria	IS	65 a 94			6 a 35	3 a 5
	Portland mixto	IM	65 a 94	6 a 35			4 a 5

Fuente: (Norma Boliviana NB 011, 2012)

- En estos valores se excluyen: el regulador de fraguado y los aditivos.
- Los componentes adicionales pueden ser puzolana, hoy filer, caliza o escoria, a menos que sean componentes principales del cemento.
- Para Cementos tipo IF, se debe realizar el control del filler calizo mediante el método del azul de metileno.
- El índice de actividad de la porcelana se debe realizar mediante el método del ensayo de la norma ASTM C311.

2.4.1.3 Cemento Fancesa IP-40

Se clasifica por su composición y resistencia como cemento portland con puzolana tipo IP-40, con categoría resistente mínima de 40 MPa a 28 días en mortero

normalizado. Norma americana ASTM C595, se clasifica como Type IP - Portland-pozzolana cement. Norma europea EN 197-1, corresponde al cemento CEM II/A-P.

Características

Altas resistencias iniciales, menor tiempo de fraguado, hormigones impermeables, resistente a ataques químicos, buena trabajabilidad, hormigones durables, moderada reacción expansiva álcali/agregado.

Campo de aplicación recomendado

Hormigones estructurales de alta resistencia inicial, hormigones para desencofrados rápidos. elementos pre y post tensados, prefabricados de hormigón, hormigones proyectados (Shotcrete). (Fabrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA), s.f.)

Figura 3. Cemento IP-40 superior



Fuente: (Fabrica Nacional de Cemento S.A. (FANCESA), s.f.)

2.4.1.4 Propiedades del cemento fancesa IP-40

Para mayor detalle sobre las características físico-químicas del cemento Portland con puzolana utilizado en esta investigación, así como los resultados completos de los ensayos de laboratorio realizados conforme a las normas vigentes, se remite al lector al ANEXO B, (Reporte de laboratorio para cemento portland con puzolana, 2024).

2.4.2 Los agregados

2.4.2.1 Clasificación de los Agregados

- **Según su tamaño:** <0.002 mm Arcilla, 0.002-0.074 mm Limo, 0.074-4.76 mm Arena, 4.76-19 mm Gravilla, 19.1-50.8 mm Grava, 50.8-152.4 mm Piedra, >152.4 mm Piedra bola.

- **Según su procedencia:** Se clasifica en agregados naturales (ríos, quebradas, canteras). Agregados artificiales (arcilla expandida, escombros, vidrio triturado)
- **Según su densidad:** Ligero (480-1040 kgf/m³), normal (1300-1600 kgf/m³), pesado (3400-7500 kgf/m³).

2.4.2.2 Agregado grueso.

Material pétreo con diámetro superior a 4.76 mm, proveniente de la disgregación natural o mecánica de las rocas y que cumple con los límites establecidos por la norma ASTM C33. Se ha demostrado que la grava triturada produce resistencias mayores que la redondeada. Esto se debe a la trabazón mecánica que se desarrolla en las partículas angulosas.

2.4.2.3 Agregado fino.

Se considera como agregado fino a la arena o piedra natural finamente triturada, de dimensiones reducidas que no supera los 9.5 mm de diámetro según norma ASTM C33.

2.4.3 Agua de amasado

El agua es el elemento por medio del cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes ya que en presencia de ella experimenta reacciones químicas dándole las características de fraguar y endurecer, está relacionada con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del hormigón endurecido.

- El agua de mezclado: Participa en las reacciones químicas de hidratación del cemento dándole la característica de fraguar, y por otra, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra.
- El agua de curado: Se utiliza después de que el concreto ha fraguado y tiene como función la de seguir hidratando el cemento.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del hormigón. La norma NB 637 (ASTM C1602M) permite el uso de agua potable sin practicarle ensayos e incluye métodos para calificar las fuentes de agua no potable.

2.4.4 Aditivos

Los aditivos son productos que se incorporan antes o durante la mezcla de proporciones de materiales; la dosificación del aditivo se puede realizar en relación al peso o volumen del cemento, todo esto con el propósito de obtener un hormigón con características especiales ya que el aditivo modifica ciertas propiedades en el comportamiento del hormigón en su estado fresco y/o en condiciones de trabajo en una forma susceptible de ser prevista y controlada. En la actualidad los aditivos permiten la producción de hormigón con características diferentes a los tradicionales, han dado un creciente impulso a la construcción y se consideran como un nuevo ingrediente, conjuntamente con el cemento, el agua y los agregados. Existen ciertas condiciones o tipos de obras que los hacen indispensables.

Tanto por el Comité 116R del ACI como por la Norma ASTM C125 tienen una definición muy clara de aditivo que hace referencia a un componente del hormigón o mortero distinto de los componentes convencionales (agregados, cemento, agua) que se añade en un pequeño porcentaje del peso de cemento o volumen y que le confiere de características especiales.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

1. Reducción del costo de la elaboración del hormigón.
2. Obtención de ciertas propiedades en el hormigón de manera más efectiva que otras.
3. Mantener la calidad del hormigón durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.

La eficiencia de un aditivo depende de factores como: tipo, marca y cantidad del material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del hormigón. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

2.4.4.1 Clasificación de los aditivos.

Según la norma ASTM C494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para hormigón” los aditivos se clasifican según como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Clasificación de aditivos químicos, según ASTM C494

CLASIFICACIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS, SEGÚN ASTM C-494	
TIPO DE ADITIVO	CARACTERISTICA
Tipo A	Reductor de Agua
Tipo B	Retardante
Tipo C	Acelerante
Tipo D	Reductor de Agua y Retardante
Tipo E	Reductor de Agua y Acelerante
Tipo F	Reductor de Agua de Alto Rango
Tipo G	Reductor de Agua de Alto Rango y Retardante
Tipo S	Aditivos de desempeño específico

Fuente: (ASTM C494, 2024)

2.4.4.2 Aditivo Súperplastificante

Según la Norma ASTM C494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para hormigón” un Aditivo reductor de agua de alto rango (Tipo F) es aquel que reduce la cantidad de agua de mezclado requerida para producir un concreto de una consistencia dada en un 12 % o más, para reducir la relación Agua / Cemento, para disminuir el contenido de cemento y para aumentar el revenimiento.

Los aditivos reductores de agua de alto rango se pueden usar para conferir al hormigón las mismas propiedades obtenidas por los aditivos reductores de agua normales, pero con mayor eficiencia. Cuando los productos químicos usados como reductores de agua de alto rango se usan para producir un hormigón fluido (plástico), normalmente se llaman plastificantes (fluidificantes) o súperplastificantes (superfluidificantes).

El hormigón fluido se define por la ASTM C1017 como un hormigón que tiene un revenimiento mayor que 190 mm (7 1/2 pulg.), pero todavía mantiene sus propiedades cohesivas.

Estos aditivos se adicionan al hormigón de revenimiento y relación agua-cemento de bajo a normal, para producir un hormigón fluido con alto revenimiento (asentamiento), por ejemplo, en hormigones con revenimiento de 75 mm (3 pulg.) el uso de este aditivo permite que se produzca un hormigón con revenimiento de 230 mm (9 pulg.). El hormigón fluido o plástico es un hormigón con consistencia bien fluida, pero trabajable, y que se puede colocar con poca o ninguna vibración o compactación mientras que se lo mantiene prácticamente libre de sangrado (exudación) o segregaciones excesivas. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

Los aditivos superplastificantes pueden ser usados para tres funciones principales:

- **Incrementar la trabajabilidad (Función superplastificante).**

Dada una mezcla de hormigón con un asentamiento, relación agua/cemento, y cantidad de cemento definidos, el aditivo se utiliza para incrementar la trabajabilidad de la mezcla, sin cambiar otra característica del diseño de mezcla, dependiendo de la dosis y tipo de aditivo en la prueba de cono de Abrams, el revenimiento puede ser incrementado de manera considerable.

- **Incrementar la resistencia (Función reductor de agua).**

Dada una mezcla de hormigón con un asentamiento y cantidad de cemento definidos, el aditivo se utiliza para encontrar la cantidad de agua + aditivo que producirá el slump deseado; según la dosis y tipo de aditivo, la reducción de agua puede llegar hasta el orden del 40%, con el consiguiente incremento de resistencia, dada la menor relación agua/cemento; esta función es empleada para producir hormigón de alta resistencia.

- **Reducir la cantidad de cemento.**

Dada una mezcla de hormigón con una relación agua/cemento, asentamiento y cantidad de cemento definidos, el aditivo se usa para reducir la cantidad de

agua, manteniendo constante la relación agua/cemento, con la consiguiente reducción de la cantidad de cemento; esta función ha sido muy empleada, sin embargo no es muy recomendada usarla para reducir al máximo la cantidad de cemento, dada la reducción en la durabilidad del hormigón; si bien puede conseguirse ahorros de hasta el 30% del contenido del cemento, en un análisis de los costos puede ser anti-económico por el mayor uso de aditivo.

Algunas aplicaciones para el hormigón fluido son:

- Vaciado de hormigón en secciones muy delgadas.
- Áreas con poco espaciamiento del acero de refuerzo.
- Vaciado bajo el agua.
- Hormigón bombeado, para reducir la presión de bombeo.
- Áreas donde no se pueden usar los métodos convencionales de consolidación
- Para la reducción de los costos de manejo. (Portugal Barriga, 2007).

2.4.4.3 Efecto en las propiedades del hormigón

El aditivo superplastificante funciona de forma electro-química con las partículas del cemento. Al tener contacto con el cemento, el aditivo hace que las partículas de cemento se carguen negativamente, causando que se repelan entre sí, produciendo un movimiento de plasticidad al tratar de polarizarse con una cantidad mínima de agua presente en la mezcla. Este fenómeno causa que se reduzca el agua de mezclado substancialmente. Como resultado se produce un aumento de la resistencia a temprana y última edad. Se puede obtener resistencias muy altas a temprana edad. Esta alta resistencia puede reducir o eliminar en algunos casos el uso de curado a vapor o por calor en operaciones de prefabricado o pre esforzado.

Es por ello que según la norma ASTM C494 “Especificación normalizada para los aditivos químicos para hormigón”, los aditivos químicos que son del tipo A al tipo G, debido a sus características propias de reducción en el agua de mezclado o de fraguado inicial, según el tipo de aditivo aplicado, se debe comparar una mezcla con dicho aditivo con las de una mezcla de hormigón de control (mezcla de prueba) que

no contenga el aditivo, para observar los resultados de aplicarlo. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

2.4.4.3.1 Incremento en el asentamiento:

El asentamiento del hormigón se incrementa cuando el aditivo superplastificante se añade a la mezcla y ningún otro cambio se hace en la misma. El asentamiento puede incrementarse en forma moderada o importante, dependiendo de qué es lo que se requiere del hormigón. Así, por ejemplo, se puede producir hormigones fluidos con alto nivel de asentamiento y capacidad auto-nivelante, esto es ser capaces de obtener una superficie nivelada con poco esfuerzo adicional en el proceso de colocación, pero sin olvidar que, para una adecuada consolidación del hormigón, alguna compactación deberá siempre ser requerida. (Rivva López, 2002)

2.4.4.4 Características y propiedades del aditivo usado

El aditivo usado es el Sika Viscocrete 5-800, proporcionado por la empresa Sika Bolivia S.A; desarrollado en forma líquida, pertenece a la tercera generación de aditivos superplastificantes para hormigón y mortero. cumple con la Norma ASTM C494, tipo F. La hoja técnica del producto se muestra en el ANEXO C, Hoja técnica Sika Viscocrete 5-800. (Sika., 2019)

2.4.5 Adiciones Minerales

El uso de adiciones minerales en el hormigón, no es una tecnología reciente, Maliowski reporta un viejo ejemplo que data de 5000-4000 años A. C., la cual fue una mezcla de limos y una puzolana natural, los viejos escritos del ingeniero romano Marcus Vitruvius Pollio, reportan cementos hechos por los griegos y romanos, los que describe como de durabilidad superior, él indica que los romanos desarrollaron técnicas superiores mediante el uso de una combinación de limos y puzolanas. Actualmente, el uso de adiciones minerales al hormigón y al cemento, se ha difundido mundialmente, tales como la ceniza volante, el filler calizo y la microsílice, este incremento en el uso de estos materiales se debe principalmente a las mejoradas propiedades del hormigón tanto en estado endurecido como en estado fresco; este incremento de trabajabilidad, durabilidad y según sea el caso de resistencia, hacen

que el uso de adiciones ya sean naturales o artificiales sea muy recomendado para el hormigón. (Cotrina Rojas, 2018)

2.4.5.1 Microsílices

Las microsílices o también conocidas como humo de sílice, son un polvo muy fino, obtenido por decantación del humo de chimeneas de altos hornos de aleaciones metálicas de la industria del ferrosilicón, el cual está compuesto del 90% de dióxido de sílice amorfo, y que tiene propiedades puzolánicas que le permiten reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio para formar un gel con notable incremento en la propiedades positivas del hormigón, especialmente su resistencia en compresión y su durabilidad. (Rivva López, 2002)

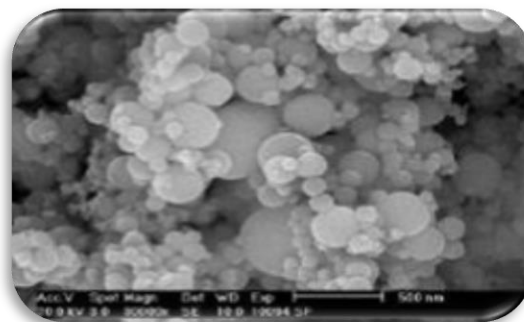
El comité 116 del American Concrete Institute define a la microsilice como a una “Sílice no cristalina muy fina producida por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la fabricación de silicio metálico o ferro silicio”.

Figura 4. Microsílice o Humo de Sílice



Fuente: Elaboración Propia

Figura 5. Partículas de microsílice con microscopio eléctrico

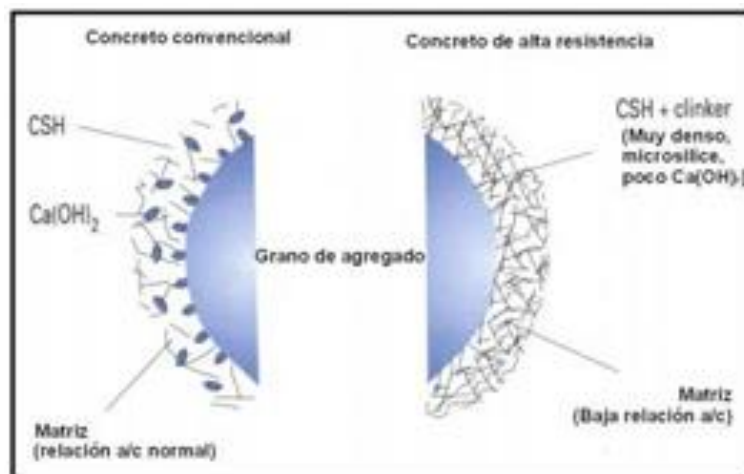


Fuente: (Cotrina Rojas, 2018)

2.4.5.1.1 Mecanismo de acción

La utilización combinada de microsilíce y aditivos superplastificantes contribuye significativamente a mejorar las propiedades del hormigón de alta resistencia, al proporcionar mayor cohesión y reducir la segregación en estado fresco. La microsilíce, cuando se emplea en proporciones adecuadas generalmente entre el 3% y el 10% del contenido de material cementicio, favorece la densificación de la pasta y la reducción de la porosidad. Las adiciones minerales son productos de origen mineral finamente divididos cuya incorporación a la mezcla tiene por finalidad reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio para generar mayor cantidad de gel de silicato de calcio hidratado (Tobermorita), cumpliendo así la Teoría de Féret, que establece una relación inversa entre porosidad y resistencia. (Cotrina Rojas, 2018)

Figura 6. Efecto de la microsilíce en la aureola de transición del agregado, comparación entre un concreto convencional y un concreto de alto desempeño



Fuente: (Cotrina Rojas, 2018)

2.4.5.1.2 Clasificación

La microsilíce es 100 veces más fina que el cemento, por lo que algunas consideraciones en los procesos de transporte, almacenamiento y dispersión deben ser tomadas en cuenta. La diferencia en los procedimientos de puesta en obra está relacionada al tamaño y perfil de las partículas y no afecta el comportamiento químico del material.

Estas diferencias obligan a tener cuidado en el tipo de microsilíce a ser seleccionado para una aplicación específica.

Las principales formas de microsilíce disponibles son:

- Microsilíces no densificadas
- Microsilíces densificadas
- Microsilíces peletizadas
- Lechadas de Microsilíces. (Cotrina Rojas, 2018)

2.4.5.1.3 Empleo en el hormigón

Las Microsilíces fueron inicialmente consideradas como un material de reemplazo del cemento, y en algunas áreas ese es todavía su único uso. En general, parte del cemento puede ser reemplazada por una cantidad menor de microsilíce. Por ejemplo, una parte de microsilíce puede reemplazar tres a cuatro partes de cemento (masa a masa) sin pérdida de resistencia, siempre que el contenido de agua permanezca constante. Muchos investigadores han cuestionado que el reemplazo del cemento por microsilíce puede no afectar otras propiedades del hormigón endurecido que no sean la resistencia. La adición de Microsilíces generalmente incrementa la demanda de agua. Si se desea mantener la misma relación agua-cemento, deberá usarse un aditivo reductor de agua para obtener la trabajabilidad aparente, deberá requerirse usualmente, para hormigones con microsilíce, un asentamiento ligeramente mayor debido al incremento en la cohesión. (Rivva López, 2002)

2.4.5.2 Características y propiedades de la microsilíce usado

La microsilíce usada fue Sika Fume, proporcionado por la empresa Sika Bolivia S.A. se presenta en polvo fino de color gris claro, y cumple con la norma ASTM C1240. Para más detalles la hoja técnica se muestra en el ANEXO D, Hoja Técnica Sika Fume. (Sika, 2019)

2.5 Características que deben reunir los materiales

La elección de materiales para obtener hormigones de alta resistencia depende de muchos factores: resistencia que se desea obtener, medios disponibles para la fabricación y puesta en obra del hormigón, tipo de estructura, disponibilidades económicas, etc. A continuación, se ofrecen algunos datos orientativos.

2.5.1 Cemento

Deben utilizarse cementos de clase resistente, La dosis de cemento suele ser alta, del orden de 450 a 500 kg/m³ de hormigón. La experiencia demuestra que por encima de estos valores se produce una disminución de resistencia cuando se utilizan superplastificantes, amén de producirse los correspondientes incrementos de calor de fraguado, retracción y coste del hormigón. Al ser difícil predecir cuál será el comportamiento de cada uno de los cementos disponibles con los aditivos, es necesario realizar ensayos previos para determinar cuál de ellos resulta más eficaz. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

2.5.2 Aditivos y Adiciones

En cuanto a las adiciones, se emplea la microsílice casi exclusivamente, dada su gran finura y su alto valor puzolánico. Por su elevada superficie específica la microsílice es muy ávida de agua, lo que obliga al empleo simultáneo de un superplastificante. Para hormigones de fck superior a 60 MPa el empleo de microsílice es absolutamente imprescindible. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

Para lograr un hormigón con buenas propiedades tanto en estado fresco como endurecido, se recomienda emplear aditivos y adiciones que sean compatibles entre sí, y que cuenten con respaldo técnico y cumplimiento normativo. En particular, cuando se incorpora humo de sílice como adición mineral, es fundamental controlar la trabajabilidad de la mezcla, debido a la alta finura y demanda de agua de este material.

Ambos productos de preferencia deben pertenecer al mismo sistema del fabricante, lo que garantiza su compatibilidad química y evita interferencias que puedan afectar el fraguado o la resistencia del hormigón. Además, se recomienda verificar que estos productos estén certificados según normas y que su dosificación se realice conforme a las instrucciones técnicas del fabricante y a las condiciones particulares del proyecto.

2.5.3 Agua

Tanto para el amasado como para el curado del hormigón está terminantemente prohibido utilizar aguas de mar o aguas salinas.

2.5.4 Los agregados

Si bien los agregados son los componentes inertes del hormigón, su influencia en las características del hormigón es notable; sin embargo, durante varios años su estudio fue descuidado, debido principalmente, al bajo costo comparativo con el costo del cemento, además de los bajos requerimientos de resistencia, en los cuales los agregados no tienen gran influencia, hoy en día se conoce la influencia del agregado en las propiedades del hormigón tanto en estado fresco y endurecido. En los hormigones de alta resistencia los agregados deben cumplir las normas como la ASTM C33 “Especificaciones para Agregados de hormigón”, además deben reunir los siguientes requisitos.

2.5.4.1 Agregado grueso

El árido grueso debe ser una gravilla inerte que posea como mínimo la misma resistencia que se exige al hormigón, y que tenga una densidad no inferior a 2,6 gr/cm³. Son muy convenientes los áridos de machaqueo procedentes de rocas basálticas, ofitas o incluso calizas si son de buena calidad, siendo deseable que su coeficiente de desgaste en el ensayo de Los Ángeles no sea superior a 20.

El tamaño máximo del árido grueso debe ser de 10 a 12,5 mm, si bien se han empleado con éxito gravillas de 20 milímetros. Tamaños mayores conducen a hormigones de docilidad inadecuada para su correcta colocación en obra y debilitan la interfaz árido-pasta, Cuanto mayor sea la resistencia a la compresión requerida, el tamaño máximo del agregado grueso debe ser el más pequeño. El coeficiente de forma debe ser lo más elevado posible. Es recomendable que el coeficiente de absorción de agua de los áridos sea como máximo del 1 %, dado que valores superiores a este dan lugar a demandas de agua elevadas, con el consiguiente desajuste en el valor de la relación A/C útil. (García Meseguer, Morán Cabré, & Arroyo Portero, 2009)

La forma de agregado grueso también es muy importante desde el punto de vista reológico, durante el proceso de trituración es primordial generar partículas de forma cúbica, en vez de planas y alargadas, ya que estas son débiles y tienden a producir mezclas duras que requieren más agua o aditivo para lograr la trabajabilidad

requerida. Por eso cabe recalcar que, para hormigones de alta resistencia, se considera que el agregado ideal debe ser 100% triturado, de perfil angular y textura rugosa, limpio, duro, resistente, poco absorbente, de preferencia con el menor porcentaje de partículas planas y alargadas. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

Figura 7. Partículas de agregado grueso.



Fuente. Elaboración propia.

2.5.4.2 Agregado fino

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 4.75 mm, generalmente la distribución del tamaño de las partículas de agregado fino ha permanecido dentro de los límites recomendados para hormigón normal por ASTM C33, sin embargo, el agregado fino elegido debe de tener módulo de finura en el rango de 2.7 a 3.0.

Debido a que la calidad del agregado fino para elaborar hormigones de alta resistencia es muy importante, a continuación, se presentan algunas recomendaciones para escoger este tipo de agregado:

- Un agregado fino con un perfil redondeado y una textura suavizada requiere menos agua de mezclado en el hormigón, por esta razón es más recomendable el uso de este tipo de agregado cuando se requiere hormigones con bajas relaciones agua/cemento.

- Las arenas con módulos de finura por debajo de 2.5 dan hormigones con consistencias densas, que los hace difíciles de compactar, por el contrario, las arenas con módulos de finura igual o mayor a 3.0 dan los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y resistencias a la compresión; para hormigones de alta resistencia se recomienda usar arenas con un módulo de finura cercano a 3.0.
- Para hormigones con relaciones agua/cementos bajos las cantidades de materiales cementantes son generalmente altas, por lo que, la granulometría del agregado fino no tiene mucha importancia. (Martínez Interiano, Linares Cáceres, & García Gálvez, 2013)

Figura 8. Partículas de agregado fino proveniente de Rio Tolomosa.



Fuente. Elaboración propia.

2.5.5 Relación agua cemento (A/C)

La relación A/C debe ser muy baja y, por tratarse de hormigones de elevadas resistencias, resulta imprescindible medirla con gran precisión. Por otra parte, si se incorporan adiciones a la masa (microsílice o cenizas volantes), es conveniente referirse a la relación agua / (cemento + adición), ya que las adiciones actúan como un conglomerante más.

Los requisitos para el agua utilizada en la mezcla no son diferentes los del agua utilizada para hormigón normal. Las relaciones agua/cemento en la mezcla se

encuentra en un rango entre los 0.2 y 0.4, lo cual produce hormigones de resistencia a la compresión entre 60 y 130 MPa. (Cotrina Rojas, 2018)

2.6 Diseño de mezclas

Diseñar una mezcla de hormigón consiste en determinar la cantidad de materiales (cemento, agua, agregados y aditivos) que deben emplearse para constituir un volumen unitario de hormigón fresco cuya calidad sea tal que cumpla con los requisitos especificados para la estructura que se pretende fabricar.

Al dosificar un hormigón se tiene que tener en cuenta tres factores fundamentales: la resistencia, la consistencia y el tamaño máximo de los áridos. Estos factores están relacionados con una variable que prácticamente determina las características finales de un hormigón; esta variable es la relación agua/cemento.

Existen varios métodos y reglas para determinar teóricamente las cantidades a mezclar de los componentes del hormigón, los cuales son orientativos, pues se basan en pruebas de laboratorio y de campo.

Antes de dosificar una mezcla, se debe tener conocimiento de la siguiente información:

- Los materiales.
- El elemento a vaciar, tamaño y formas de las estructuras.
- Resistencia a la compresión requerida.
- Condiciones ambientales durante el vaciado.
- Condiciones a la que estará expuesta la estructura

2.6.1 Dosificación ACI-211.1

El Instituto Americano del Hormigón (ACI) presentó, como resultado de extensas investigaciones y fundamentándose en los trabajos experimentales de Abrams, Richard y Talbot, Goldbeck y Gray, un método con resultados aceptables para hormigones con dos agregados, de masa unitaria entre los 2,0 Mg/m³ y los 2,5 Mg/m³ y con requisitos de resistencia menores a 42 Mpa.

El método A.C.I. es un método de dosificación para el diseño de mezclas de hormigón; se basa en medir los materiales (cemento, agua, grava y arena) en peso y/o

volumen, adecuados para el diseño de una mezcla de hormigón en estado fresco como endurecido, garantizando que la mezcla cumpla las características de resistencia del hormigón una vez endurecido. (ACI 211, 2002)

2.6.1.1 Experiencia en diseño de mezclas

Para obtener un hormigón de características aceptables no solo depende de escoger las cantidades adecuadas de cada material, sino también del cuidado que se tenga durante la preparación y el curado de la mezcla. Dicho cuidado está determinado por la experiencia de quien fabrica la mezcla, misma que dependiendo de esta experiencia se ve necesario aumentar el $f'c$.

Según la NSR-98 un hormigón es aceptable si:

- En ensayos individuales el 99% de los resultados de los ensayos a compresión den superiores a $(f'c - 3.5)$ Mpa
- El 99% del promedio de tres ensayos consecutivos de superior a $f'c$.

Caso contrario de no contar con la experiencia para el diseño de mezclas, se debe incrementar el $f'c$ según los valores que indica la Tabla 6.

Tabla 6. Resistencia a compresión media requerida cuando no hay datos disponibles para la desviación estándar

Resistencia especificada la compresión, $f'c$, MPa	Resistencia promedio a la compresión requerida, MPa
Menos de 21	$f'cr = f'c + 7.0$
De 21 a 35	$f'cr = f'c + 8.5$
Más de 35	$f'cr = 1.10 f'c + 5.0$

Fuente: (ACI 211, 2002)

2.6.1.2 Revenimiento

Siempre se debe producir el hormigón para que tenga trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuadas con las condiciones de la obra. La trabajabilidad es la medida de la facilidad o de la dificultad de colocación, consolidación y acabado del hormigón. La consistencia es la habilidad del hormigón de fluir. Plasticidad es la facilidad de moldeo del hormigón.

Tabla 7. Revenimientos recomendados para diferentes tipos de estructuras

Construcción de Concreto	Revenimiento mm (pulg.)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzado	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo	75 (3)	25 (1)

Fuente: (ACI 211, 2002)

2.6.1.3 Estimación la cantidad de agua

El contenido de agua se influencia por un gran número de factores: tamaño, forma y textura del agregado, revenimiento, relación agua/cemento, aditivos y condiciones ambientales. Un aumento del contenido de aire y del tamaño del agregado, una reducción de la relación agua/cemento y del revenimiento o el uso de agregados redondeados, de aditivos reductores de agua o de ceniza volante reducirá la demanda de agua. Por otro lado, el aumento de la temperatura, del contenido de cemento, del revenimiento (asentamiento), de la relación agua/cemento, de la angularidad del agregado y la disminución de la proporción entre el agregado grueso y el agregado fino aumentaran la demanda de agua.

Tabla 8. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*							
	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm**	75 mm**	150 mm**
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Promedio del contenido de aire total recomendado, para el nivel de exposición, porcentaje†								
Exposición blanda	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: (ACI 211, 2002)

2.6.1.4 Estimación del contenido de aire atrapado

El contenido de aire beneficia la manejabilidad y la cohesión de la mezcla. La tabla 8 muestra los valores recomendados para estimar el contenido de aire de la mezcla, teniendo como base las referencias que se especifican en la norma ACI 318.

2.6.1.5 Estimación la relación agua / cemento (A/C)

La relación agua/cemento elegido para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición anticipadas. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua/cemento se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión.

Tabla 9. Dependencia entre la relación A/C y la resistencia compresión

Resistencia a Compresión a los 28 Días, kg/cm ² (MPa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450 (45)	0.38 (0.38)	0.31 (0.30)
400 (40)	0.43 (0.42)	0.34 (0.34)
350 (35)	0.48 (0.47)	0.40 (0.39)
300 (30)	0.55 (0.54)	0.46 (0.45)
250 (25)	0.62 (0.61)	0.53 (0.52)
200 (20)	0.70 (0.69)	0.61 (0.60)
150 (15)	0.80 (0.79)	0.72 (0.70)

Fuente: (ACI 211, 2002)

2.6.1.6 Contenido de cemento (C)

El cálculo de la cantidad de cemento, tiene relación a la cantidad de agua necesaria (Tabla 8) y la relación agua/cemento (Tabla 9) determinados por el diseñador. El contenido de cemento se calcula con la siguiente expresión:

$$C = \frac{A}{A/C}$$

2.6.1.7 Agregados

Dos características de los agregados tienen una influencia importante en el proporcionamiento de las mezclas de hormigón porque afectan la trabajabilidad del hormigón fresco:

- Granulometría (tamaño y distribución de las partículas).

- Naturaleza de las partículas (forma, porosidad, textura de la superficie).

La granulometría también influye en la trabajabilidad y la facilidad de colocación del hormigón. El tamaño máximo del agregado grueso no debe exceder un quinto de la menor dimensión entre los lados de las cimbras (encofrados), ni tampoco, tres cuartos la distancia libre entre las varillas. El volumen de agregado grueso se puede determinar a través de la Tabla 10. Estos volúmenes se basan en agregados en la condición varillados en seco, conforme se describe en ASTM C29.

Tabla 10. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de hormigón (b/bo)

Tamaño máximo nominal del agregado mm (pulg.)	Volumen del agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino*			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (¾)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (½)	0.59	0.57	0.55	0.53
19.00 (¾)	0.66	0.64	0.62	0.60
25.00 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 ½)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: (ACI 211, 2002)

El valor de b/bo multiplicado por el peso unitario compactado (PUC) dará la cantidad de agregado grueso necesario en la mezcla. Con la cantidad de agregado grueso necesario ya determinado se puede calcular por simple aritmética las cantidades faltantes en la mezcla (observar tabla 11).

Tabla 11. Cantidades de los elementos de mezcla

Volumenes absolutos			
Material	Peso (Kg)	Peso específico (Kg/m³)	Volumen (m³)
Agua	W_A	d_a	V_A
Cemento	W_C	d_c	V_C
Grava	W_{ag}	d_{ag}	V_{ag}
Aire	%	***	***
Total			ΣVOL

Fuente: (ACI 211, 2002)

2.7 Normativas a utilizar en el procedimiento experimental.

Para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados, así como para el análisis de propiedades del hormigón en su estado fresco y endurecido, se realizarán basados en el Manual de Carreteras Volumen 4 (Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras. Vol.4 Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigones) y en las normas ASTM, como se detalla a continuación.

Tabla 12. Lista de los ensayos aplicados

Nº	Ensayo	Normas	
1	Metodo para extraer y preparar muestras	H0101	ASTM C-75
2	Metodo para el cuarteo de muestras	H0102	ASTM C-702
3	Metodo para tamizar y determinar la granulometria	H0104	ASTM C-136
4	Contenido total de agua de los aridos por secado	H0107	ASTM C-556
5	Metodo para determinar la densidad aparente	H0108	ASTM C-29
6	Metodo para determinar la densidad real, densidad neta y absorcion de agua de los aridos gruesos	H0109	ASTM C-127
7	Metodo para determinar la densidad real, densidad neta y absorcion de agua de los aridos finos	H01010	ASTM C-128
8	Metodo para detrrminar el desgaste mediante maquina de los angeles	H01011	ASTM C-131
9	Standard Specification for Concrete Aggregates		ASTM C-33
10	Practica estandar para hacer y curar especimenes de prueba de concreto en el laboratorio		ASTM C-192
11	Metodo para extraer muestras de hormigon fresco	H0301	ASTM C-172
12	Metodo para determinar la docilidad mediante el cono de Abrams	H0304	ASTM C-143
13	Metodo de ensaye a la compresion de probetas cubicas y cilindricas	H0307	ASTM C-39

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Descripción de la metodología

Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo experimental, ya que se manipulan directamente dos variables independientes, el porcentaje del aditivo súperplastificante y su combinación con la adición de microsilíce, para observar su efecto sobre la variable dependiente, que es la resistencia a la compresión del hormigón medida a los 7, 14 y 28 días.

Este diseño experimental se fundamenta en la verificación de la hipótesis mediante la observación de resultados medibles, controlando todas las demás variables involucradas en la dosificación (como tipo y cantidad de cemento, agregados, y condiciones de curado).

La investigación cuenta con al menos dos grupos:

- Un grupo control, donde se mantiene una dosificación patrón sin aditivos.
- Un grupo experimental, en el que se modifican los porcentajes de aditivo súperplastificante y la adición de microsilíce.

De esta forma, se asegura un control de las variables independientes, permitiendo evaluar objetivamente su influencia en el comportamiento resistente del hormigón.

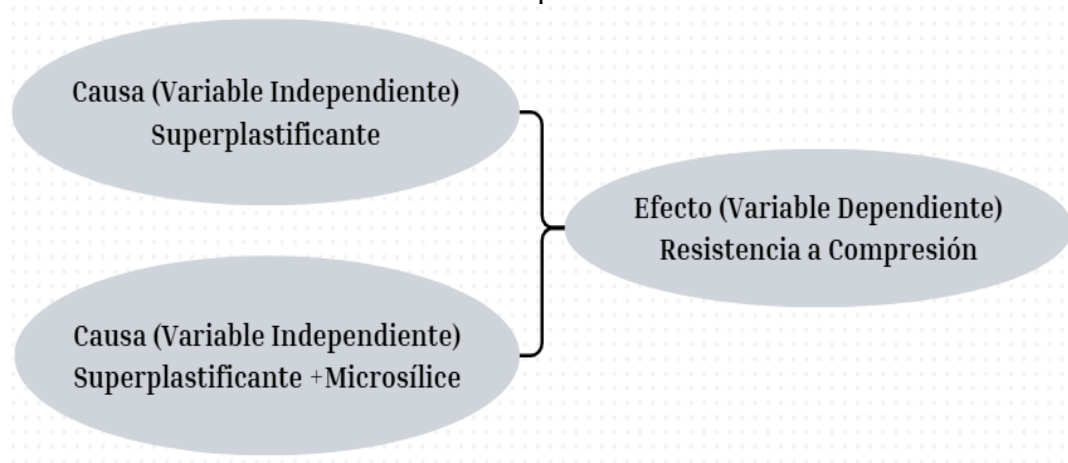
3.1.1 Variables

De acuerdo con el objeto de estudio previamente mencionado, puede identificarse una de las principales características de una investigación de tipo experimental, al hablar de hipótesis y las supuestas causas. En este enfoque, las causas se consideran variables independientes, mientras que los efectos o resultados observables se denominan variables dependientes.

En el presente estudio, las variables independientes están representadas por las dosis del aditivo súperplastificante y su combinación con la adición de microsilíce, las cuales serán manipuladas según los rangos establecidos en los objetivos específicos y conforme a las recomendaciones técnicas del fabricante.

Por su parte, la variable dependiente será la resistencia a compresión del hormigón, cuyos valores serán medidos, comparados y analizados con el propósito de determinar la influencia de los agentes incorporados en el comportamiento resistente del hormigón, y así establecer las cantidades y proporciones para una mezcla de hormigón de alta resistencia.

Figura 9. Relación entre variables independientes y dependientes en el diseño experimental



Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Población y Muestra

Población

Se utilizarán probetas estándar de altura de 30.0 cm y un diámetro de 15.0 cm. Según norma ASTM C470 "Standard Specification Molds For Forming Concrete Test Cylinders". Los moldes deben ser constituidos en la forma de cilindros rectos circulares que se posicionan con su eje cilíndrico vertical y con su tope abierto para recibir el hormigón. Deben ser hechos con materiales que no reaccionen con el hormigón que contengan cemento portland o bien otros cementos hidráulicos. Deben ser no absorbentes, sin fugas, suficientemente resistentes y tenaces, para permitir su uso sin romperse, aplastarse o deformarse. La forma cilíndrica se ha preferido debido a una mayor uniformidad por un efecto menor de la restricción de placas, mejor distribución de los esfuerzos en planos horizontales y menor efecto de pared del agregado grueso en la resistencia.

Muestra

Para calcular el tamaño de la muestra de una población desconocida, en la presente investigación se obtuvo mediante la siguiente fórmula.

Fórmula para calcular el tamaño de muestra infinita:

$$N = \frac{Z^2 \alpha * p * q}{e^2}$$

Donde:

N= Tamaño de la muestra

$Z\alpha$ = Parámetro estadístico que depende el nivel de confianza.

e= Error de estimación máximo aceptado.

p= Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (éxito).

q= (1-p) = Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado.

- Elegimos un grado de confiabilidad del 95% entonces mi valor estandarizado Z= 1.96. (de tabla N° 15)

Tabla15. Valores estandarizados en función del grado de confiabilidad

Grados de confiabilidad (%)	Valor estandarizado (z_α)
99	2,58
95	1,96
90	1,64

Fuente: (QuestionPro., 2024)

- **Asumimos un error máximo de 10%**, es la manera de aceptar que los datos no son absolutamente exactos o precisos. Por lo regular el margen de error puede ser controlado eligiendo una muestra aleatoria y aumentando el tamaño de la muestra, lamentablemente el presupuesto puede llegar a ser un limitante.

Existe una alta probabilidad de que ocurra el evento estudiado adoptamos p=99% por lo tanto su complemento $q=1-p= 1-0.99=0.01$, La elección del valor de p=99% se fundamenta en antecedentes experimentales y trabajos de investigación previas desarrolladas en la región, en las que se lograron

resistencias a compresión superiores a los 50 MPa bajo condiciones similares de dosificación y uso de aditivos. Por tanto, se asumió una alta probabilidad de que las combinaciones propuestas en este estudio alcancen resultados exitosos, permitiendo un diseño muestral más eficiente.

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$N = \frac{1.96^2 * 0.99 * 0.01}{0.10^2} = 3.80 \approx 4$$

Para cada dosificación experimental, se elaborarán 16 probetas cilíndricas, distribuidas de la siguiente manera: 4 probetas serán ensayadas a la edad de 7 días, 4 a los 14 días y 8 a los 28 días. La razón de realizar un mayor número de ensayos a los 28 días radica en que esta edad es la referencia normativa estándar para determinar la resistencia característica del hormigón.

Además, al contar con una mayor cantidad de datos a esta edad, se mejora la confiabilidad estadística del resultado final, permitiendo obtener un promedio más representativo y reducir la dispersión de los valores obtenidos. Si bien los ensayos a edades tempranas permiten analizar la evolución de la resistencia, es a los 28 días donde se establece la comparación principal entre las distintas mezclas, por lo cual se requiere un número mayor de especímenes.

Se realizará 144 probetas en total, 16 probetas patrón con una dosificación para una resistencia especificada de 35 MPa analizando su resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días y 64 probetas con la utilización de aditivo superplastificante en los porcentajes de 0.5%, 1%, 1.5%, y 2% referido al peso del cemento con el fin de analizar su comportamiento y el incremento de la resistencia respecto a un hormigón patrón.

Las 64 probetas restantes serán elaboradas utilizando la adición de microsílice en porcentajes del 2.5%, 5%, 7.5% y 10% en relación al peso del cemento, conjuntamente con el aditivo superplastificante en los porcentajes anteriormente mencionados, Las combinaciones de superplastificante y microsílice se aplicarán de la siguiente manera: 0.5% de superplastificante con 2.5% de microsílice, 1% de

superplastificante con 5% de microsílice, 1.5% de superplastificante con 7.5% de microsílice y 2% de superplastificante con 10% de microsílice.

Tabla 16. Distribución de probetas según tipo de mezcla, contenido de aditivos y edad de ensayo

Grupo	Tipo de mezcla	Superplastificante	Microsílice	Nº total de probetas	Edad del hormigon		
					7 días	14 días	28 días
1	Hormigón patrón	0%	0%	16	4	4	8
2	superplastificante	0.50%	0%	16	4	4	8
		1.00%	0%	16	4	4	8
		1.50%	0%	16	4	4	8
		2.00%	0%	16	4	4	8
3	Superplastificante + Microsílice	0.50%	2.50%	16	4	4	8
		1.00%	5.00%	16	4	4	8
		1.50%	7.50%	16	4	4	8
		2.00%	10.00%	16	4	4	8
TOTAL				144	36	36	72

Fuente: Elaboración propia

3.2 Fase I: Recolección de los materiales

- **Cemento.** - El cemento utilizado en este estudio fue el cemento Portland tipo IP-40 de la marca Fancesa, de producción nacional. Se optó por este tipo de cemento debido a su alta resistencia mecánica, adecuada para la elaboración de hormigones de alta resistencia.
- **Agregado Fino.** – El agregado fino que se utilizó es material natural del lecho del río. Sector con recursos renovable cada año en la comunidad de Tolomosa Grande, Sector ancho donde el río deposita arenas, este material se lo adquirió de una planta de áridos que se encuentra sobre la misma ruta.
- **Agregado Grueso.** - El agregado grueso que se utilizó es proveniente de una planta de arios, el material de esta cantera es Chancado.

Tanto el agregado fino como agregado grueso se obtuvieron de la misma planta de áridos, la cual se encuentra ubicada a 5,5 km aproximadamente de la ciudad de Tarija, en la ruta hacia Tolomosa Grande exactamente en las coordenadas: Latitud 21°34'45.20"S y Longitud 64°45'8.87"O

Figura 11. Lugar de extracción de los agregados



Fuente: Elaboración propia

- **Aditivo superplastificante y adición de microsilice.** – Los productos utilizados en esta investigación, fueron adquiridos a través del distribuidor autorizado PROYECTAR – CASA DEL INGENIERO (Av. España N° 380, entre Delfín Pino y Av. Belgrano, Barrio Fátima, Tarija), representante oficial de Sika Bolivia S.A.
- **Agua.** - Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del hormigón. La norma NB 637 (ASTM C1602M) permite el uso de agua potable sin practicarle ensayos e incluye métodos para calificar las fuentes de agua no potable.

3.3 Fase II Ensayos de caracterización de los materiales en laboratorio

El proceso de cálculo correspondiente a la caracterización de los agregados se presenta en detalle en el ANEXO E: Caracterización de los agregados.

3.3.1 Ensayos de laboratorio de cemento

Continuamente, la empresa Fancesa realiza ensayos de control de calidad, se optó por emplear los valores de sus propiedades, del cemento, conseguidos en la empresa, evitando de esta manera realizar los ensayos requeridos sin el equipo adecuado, (ver ANEXO B, Reporte de laboratorio para cemento portland con puzolana).

3.3.2 Características del Agregado fino

3.3.2.1 Análisis Granulométrico del Agregado Fino

Las muestras provenientes de la planta de áridos, fueron extraídas y preparadas de acuerdo a los métodos de la norma ASTM D75 (Método para extraer y preparar muestras) y ASTM C702 (Método para el cuarteo de muestras)

Procedimiento del ensayo:

El procedimiento realizado con base en la Norma ASTM C136, con los límites recomendados en la Norma ASTM C33.

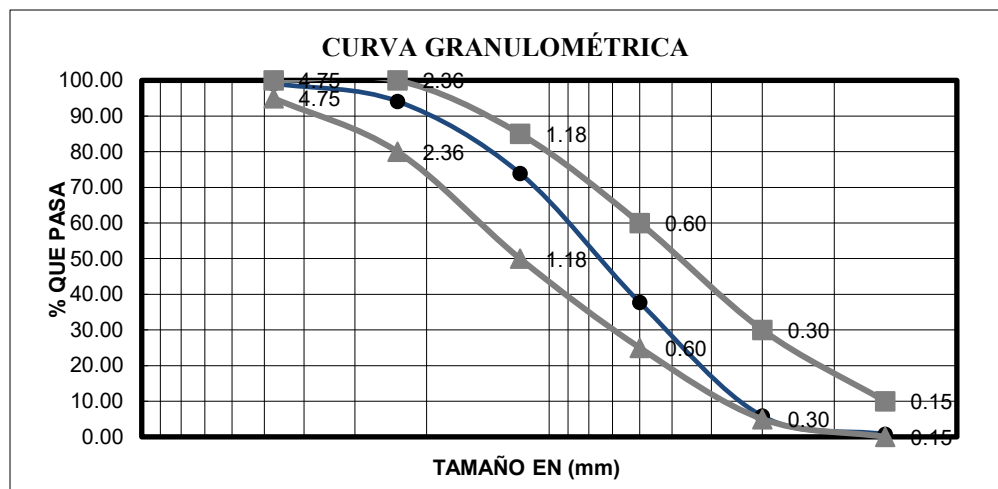
Resultados:

Tabla 13. Resultado promedio del análisis granulométrico del agregado fino y módulo de fineza.

Tamices	Aberturas (mm)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
		% Pasa	% Pasa	% Pasa
N°4	4.75	99.12	99.16	99.52
N°8	2.36	94.14	94.9	95.02
N°16	1.18	73.92	75.62	75.04
N°30	0.6	37.7	39.1	38.18
N°50	0.3	5.8	5.74	5.62
N°100	0.15	0.7	0.62	0.64
MF =		2.89	2.85	2.86
MF _{Promedio} =		2.86		

Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Curva granulométrica y control granulométrico del agregado fino.



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2 Determinación de Peso Unitario Compactado del Agregado Fino

Densidad aparente del árido compactado en la medida que lo contiene, según los procedimientos indicados en este método.

El volumen que se refiere aquí es aquel ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas del agregado

Procedimiento:

El procedimiento de la obtención de estos resultados está según la norma ASTM C29.

Resultados:

Se trabajó con 3 muestras representativas y se obtuvo el promedio como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 14. Resultados de los pesos unitarios compactados del agregado fino

Muestras N°	Peso unitario compactado (g/cm ³)
1	1.60
2	1.60
3	1.59
Promedio	1.60

Fuente: Elaboración propia

3.3.2.3 Peso Específico y Absorción del Agregado Fino

Procedimiento:

El procedimiento para la obtención del peso específico y absorción de la arena se realizó en base a la norma ASTM C128. fueron extraídas y preparadas de acuerdo a los métodos de la norma ASTM D75 y ASTM C702 (Método para el cuarteo de muestras).

A continuación, se presentan los valores de los pesos específicos del agregado fino además de los promedios de los mismos:

Tabla 15. Resultados de pesos específicos del agregado fino y su porcentaje de absorción.

Muestras N°	P.E. A Granel (g/cm ³)	P.E. (SSS) (g/cm ³)	P.E. Aparente (g/cm ³)	Porcentaje de absorcion %
1	2.38	2.47	2.61	3.62
2	2.23	2.31	2.42	3.50
3	2.52	2.61	2.77	3.50
Promedio	2.38	2.46	2.60	3.54

Fuente: Elaboración propia

3.3.3 Características del Agregado Grueso

3.3.3.1 Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

Determinación de la distribución granulométrica estadística de los tamaños de las partículas del agregado grueso.

Procedimiento:

El procedimiento realizado con base en la Norma ASTM C136, con los límites recomendados en la Norma ASTM C33.

Resultados:

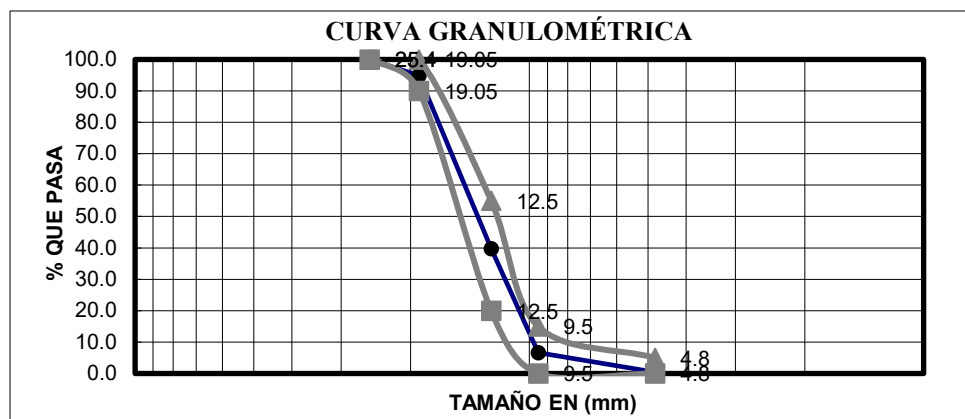
Resultados promedios de 3 ensayos realizados con muestras representativas acorde a los especificado en norma ASTM C136.

Tabla 16. Resultado promedio del análisis granulométrico del agregado grueso

Tamices	Aberturas (mm)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
		% Pasa	% Pasa	% Pasa
1	25	100.00	100.00	100.00
3/4"	19.05	94.89	94.80	94.74
1/2"	12.7	39.76	38.85	38.44
3/8"	9.52	6.61	6.65	6.35
N°4	4.75	0.42	0.30	0.23
Base	***	0.00	0.00	0.00
Tamaño Maximo =		1"		
Tamaño Maximo Nominal =		3/4"		

Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Curva y control granulométrico del Agregado Grueso



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2 Determinación de Peso Unitario Compactado del Agregado Grueso

Procedimiento:

El procedimiento de la obtención de estos resultados está según la norma ASTM C29.

Resultados:

Tabla 17. Resultados de los pesos unitarios del agregado grueso

Muestras N°	Peso unitario compactado (g/cm ³)
1	1.39
2	1.40
3	1.39
Promedio	1.40

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3 Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

Procedimiento:

El procedimiento para la obtención del peso específico y absorción de la Grava se realizó en base a la norma ASTM C128.

A continuación, se presentan los valores de los pesos específicos del agregado grueso, además de los promedios de los mismos:

Resultados:

Tabla 18. Resultados de pesos específicos del agregado grueso y su porcentaje de absorción

Muestras N°	P.E. A Granel (g/cm ³)	P.E. (SSS) (g/cm ³)	P.E. Aparente (g/cm ³)	Porcentaje de absorcion %
1	2.58	2.61	2.67	1.26
2	2.60	2.63	2.68	1.23
3	2.58	2.62	2.67	1.31
Promedio	2.59	2.62	2.67	1.25

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.4 Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles

Procedimiento:

El procedimiento para la obtención de la resistencia al desgaste de la Grava se realizó en base a la norma ASTM C131.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Resultados:

Tabla 19. Resultados ensayo desgaste mediante máquina de los ángeles

Material	Peso inicial	Peso final	% Desgaste
B	5002.1	4060.3	18.83

Fuente: Elaboración propia

3.4 Fase III: Elaboración de la mezcla, curado y ensayo de los hormigones

3.4.1 Dosificación Hormigón patrón

Cuando no hay registro de ensayos de campo disponibles o son insuficientes para el proporcionamiento a través de métodos de experiencia de campo, las proporciones de la mezcla elegidas se deben basar en mezclas de pruebas. Las mezclas de prueba deben utilizar los mismos materiales de la obra.

Los resultados del diseño en estado seco se presentan en la tabla 20. El procedimiento a detalle del cálculo de la dosificación se encuentra en ANEXO F.

Tabla 20. Resultado dosificación de hormigón patrón para 1 m³

Hormigon Patron			
Cemento (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (l)
500.00	857.64	778.10	200.00
Proporciones respecto al cemento			
1.00	1.72	1.56	0.40

Fuente: Elaboración propia

Cabe señalar que, a partir de este punto, los resultados obtenidos de la dosificación patrón serán utilizados como referencia para todas las mezclas evaluadas. En estas dosificaciones se mantendrán constantes las cantidades de cemento, arena y grava, mientras que el contenido de agua variará de manera indirecta, en función de la reducción que se logre con la incorporación del superplastificante y del porcentaje de microsilíce adicionado a la mezcla.

3.4.2 Dosificación con aditivo Superplastificante

Los porcentajes con el cual se trabajará fueron tomados en consideración la recomendación de la ficha técnica ver ANEXO C.

En la siguiente tabla se muestra porcentajes de reducción de agua para diferentes porcentajes de aditivo utilizado.

Tabla 21. Porcentajes de reducción de agua logrado con diferentes % de aditivo superplastificante

Superplastificante			
%	Agua Corregida (l)	Agua Hormigon Patron (l)	% Reduccion Agua
0.5	155.25	200.00	22.37
1.0	119.35		40.32
1.5	109.56		45.22
2.0	106.10		46.95

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de las cantidades de materiales en estado seco, ya corregidas en función de la reducción de agua derivada de la incorporación del aditivo superplastificante.

Tabla 22. Presentación del diseño en estado seco para 1 m³ de Hormigón con diferentes % de aditivo superplastificante

Cemento (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (l)	Superplastificante	
				%	Peso (Kg)
500	857.64	778.10	155.25	0.5	2.5
			119.35	1.0	5
			109.56	1.5	7.5
			106.10	2.0	10

Fuente: Elaboración propia

3.4.3 Dosificación con aditivo Superplastificante y la adición de microsilíce

Los porcentajes con el cual se trabajará fueron tomados en consideración la recomendación de la ficha técnica de ver ANEXO D.

En la siguiente tabla se muestra porcentajes de reducción de agua para diferentes porcentajes de adición de microsilíce en combinación con el aditivo superplastificante.

Tabla 23. Porcentajes de reducción de agua logrado con diferentes % de aditivo superplastificante más adición de microsilíce

Superplastificante + Microsilíce			
%	Agua Corregida (l)	Agua Hormigon Patron (l)	% Reduccion Agua
0.5+2.5	166.62	200.00	16.69
1.0+5.0	129.17		35.41
1.5+7.5	121.77		39.11
2.0+10.0	117.92		41.04

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados de las cantidades de materiales en estado seco, ya corregidas en función de la reducción de agua derivada de la incorporación del aditivo superplastificante y la adición de microsilíce.

Tabla 24. Presentación del diseño en estado seco para 1 m³ de Hormigón con diferentes % de aditivo superplastificante más la adición de microsílíce

Cemento (Kg)	Grava (Kg)	Arena (Kg)	Agua (l)	%	Peso (Kg)	
					Superplastificante	Microsílíce
500	857.64	778.10	166.62	0.5+2.5	2.5	12.5
			129.17	1.0+5.0	5	25
			121.77	1.5+7.5	7.5	37.5
			117.92	2.0+10.0	10	50

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Relación agua-cemento finales (A/C)

En las siguientes tablas se presentan las correcciones realizadas a la relación agua/cemento de las diferentes mezclas estudiadas.

La primera tabla corresponde a las dosificaciones en las que únicamente se incorporó el aditivo superplastificante, mostrando los valores corregidos de agua y cemento empleados, a fin de determinar la relación agua/cemento final en cada caso. La segunda tabla corresponde a las mezclas en las que, además del superplastificante, se incorporó microsílíce, registrando la cantidad adicionada y la variación resultante en la relación agua/material cementoso.

De esta manera, se pueden identificar con claridad los efectos de cada modificación respecto a la dosificación patrón.

Tabla 25. Correcciones de la relación A/C con la incorporación de diferentes % de aditivo superplastificante

Superplastificante			
%	Agua Corregida (l)	Cemento (Kg)	A/C
0.5	155.25	500.00	0.31
1.0	119.35		0.24
1.5	109.56		0.22
2.0	106.10		0.21

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26. Correcciones de la relación A/(C+M) con la incorporación combinada en diferentes % de superplastificante y microsilíce

Superplastificante + Microsilíce				
%	Agua Corregida (l)	Cemento (Kg)	Adición de microsilíce (Kg)	A/(C+M)
0.5+2.5	166.62	500.00	12.50	0.33
1.0+5.0	129.17		25.00	0.25
1.5+7.5	121.77		37.50	0.23
2.0+10.0	117.92		50.00	0.21

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Elaboración de muestras en laboratorio

El procedimiento de elaboración de probetas se hizo según norma ASTM C192 (Practica estándar para hacer y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio). Esta práctica establece requisitos estandarizados para la preparación de materiales, la mezcla de hormigón y la fabricación y curado de especímenes de hormigón en condiciones de laboratorio.

3.4.5.1 Aparatos y equipos

- **Moldes.** - Estos moldes deberán ser de acero o hierro fundido u otro material no absorbente, no reactivo con el hormigón. Los moldes deberán ajustarse a las dimensiones y tolerancias especificadas en la norma ASTM C470. Estos antes de ser usados se debe humedecer con aceite para evitar la adherencia a las paredes de este.
- **Varilla.** - Barra de acero redonda, lisa y recta con un diámetro conforme a las especificaciones ASTM C192.
- **Mazo.** - se utilizará un mazo con una cabeza de goma.
- **Herramientas pequeñas.** - Se proveerán herramientas y artículos tales como palas, cucharas, bandejas mezcladoras, flexo etc.
- **Aparato de asentamiento.** - se ajustará a los requisitos del método de ensayo C-143.

- **Mesclador de hormigón motorizado.** – Debe ser un tambor giratorio, o un mezclador basculante.

3.4.5.2 Muestras

Tamaño de la muestra frente al tamaño agregado: el diámetro de una muestra cilíndrica o la dimensión mínima de la sección transversal de una sección rectangular debe ser al menos tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso. en nuestro caso se utilizarán probetas estándar de Altura de 30.0 cm y un Diámetro de 15.0 cm.

3.4.5.3 Preparación de materiales.

- **Cemento.** - El cemento debe almacenarse en un lugar seco y ventilado, protegido de la humedad ambiental y del contacto con agua. Cuando se conserve en sacos, estos se colocarán sobre tarimas elevadas y separados de las paredes, evitando su exposición directa al sol o la lluvia. Se recomienda apilar un número limitado de sacos, y verificar que no presenten grumos antes de su utilización ya que un manejo inadecuado irá en contra de su buen desempeño dentro de la mezcla, reduciendo la resistencia y durabilidad del hormigón.
- **Agregados.** - Un día antes se debe hacer secar en horno una porción para calcular su contenido de humedad o contenido de agua para hacer correcciones por humedad a la dosificación. En cuanto al agregado grueso (grava) fue secada en un horno y posteriormente enfriado a temperatura ambiente. En cuanto al agregado fino (arena) fue lavada y secada en un horno y posteriormente enfriado a temperatura ambiente ya que presentaba algo de sustancias orgánicas producto del arrastre de árboles por el río.

3.4.5.4 Procedimiento de elaboración de muestras en laboratorio

Una vez realizadas las correcciones por el contenido de humedad, Teniendo ya los componentes listos con sus cantidades respectivas se procede de la siguiente manera.

Figura 12. Materiales pesados para la mezcla



Fuente: Elaboración propia

1. Mezclar el aditivo superplastificante con la mitad del agua destinada a la mezcla.

Figura 13. Mezcla inicial del aditivo superplastificante con la primera mitad del agua

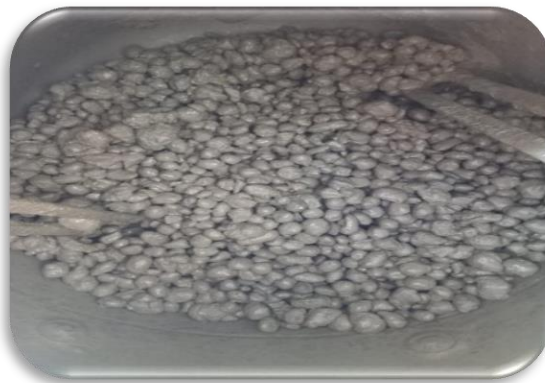


Fuente: Elaboración propia

2. Arranque el mezclador, luego agregar el agregado grueso en su totalidad junto con la mitad del agua previamente mezclada con el superplastificante.
3. Incorporar la mitad del cemento y, a continuación, la mitad del agregado fino.
4. Mezclar brevemente, comprobando que no permanezca material en el fondo del tambor. Este debe colocarse con la inclinación necesaria para favorecer una mezcla uniforme.
5. Añadir la mitad restante del cemento y, a continuación, la mitad restante del agregado fino.
6. La adición de microsilíce deberá incorporarse junto con el cemento, dividiéndola también en dos partes iguales.
7. Incrementar con precaución la mitad restante del agua, ajustando según el requerimiento de la mezcla para obtener la trabajabilidad adecuada; para esto se recomienda usar un aspersor que permita un control fino de la dosificación de agua.

La mezcla, una vez incorporados todos los componentes excepto la mitad restante del agua, presenta un aspecto granular, con partículas sueltas y aglomeradas en forma de pequeños grumos, debido a la ausencia de la totalidad del agua requerida. Este estado indica que los componentes aún no están completamente integrados ni dispersos, mostrando una mezcla inicial antes de alcanzar la fluidez adecuada como muestra en la Figura 14.

Figura 14. Estado inicial de la mezcla antes de agregar la mitad restante del agua



Fuente: Elaboración propia

El agua restante deberá agregarse gradualmente hasta que la mezcla fluya libremente dentro del tambor. Para esto, se realizarán pausas en la mezcladora para observar si este fenómeno ocurre, continuando hasta alcanzar un estado similar al mostrado en la Figura 15.

Figura 15. Estado final de la mezcla con trabajabilidad adecuada.



Fuente: Elaboración propia

- Medir el asentamiento de cada lote de hormigón inmediatamente después de la mezcla de acuerdo con el método de ensayo C-143.

Figura 16. Asentamiento mediante el cono Abrams



Fuente: Elaboración propia

- Colocar el hormigón en los moldes utilizando una cuchara. Mueva la cuchara o paleta alrededor del borde superior del molde a medida que se descarga el hormigón para asegurar una distribución simétrica del hormigón y para

minimizar la segregación del agregado grueso dentro del molde. Distribuir el hormigón mediante el uso de una barra de apisonamiento antes del inicio de la consolidación. Al colocar la capa final, el operador intentará agregar una cantidad de hormigón que llenará exactamente el molde después de la compactación. Como nuestra probeta es de 15.0 cm de diámetro corresponde llenarlo en 3 capas y cada capa 25 golpes. Tal cual indica el método de ensayo ASTM C192.

- Lugar de moldeo: Mueva los especímenes lo más cerca posible al lugar donde se van a almacenar durante las primeras 24 h. Si no es posible moldear los especímenes donde van a ser almacenados, muévalos al lugar de almacenamiento inmediatamente después de ser golpeado. Coloque los moldes sobre una superficie rígida libre de vibraciones y otras perturbaciones. Evite golpear, inclinar o marcar con una cicatriz la superficie de los especímenes cuando mueva los especímenes al lugar de almacenamiento.

Figura 17. Probetas cilíndricas vaciadas con hormigón



Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Curado de probetas cilíndricas de hormigón.

Curado estándar es el que se realiza bajo las condiciones establecidas por la norma, introduciéndolas a la piscina llenas de agua donde fueron sumergidas en su totalidad hasta que se realice el ensayo mecánico de resistencia a la compresión el cual se realizó en 3 diferentes edades de 7, 14 y 28 días en los diferentes hormigones elaborados. Se optó por las edades de 7, 14 y 28 días, ya que son las edades de

control más habituales para ensayos de resistencia a compresión y permiten evaluar tanto la contribución temprana del aditivo superplastificante como a la resistencia final del hormigón.

Figura 18. Curado de probetas por inmersión



Fuente: Elaboración propia

3.4.7 Ensayo de roturas de probetas a Compresión (Falla con almohadillas)

Las pruebas de resistencia a compresión se llevaron a cabo conforme a la norma ASTM C39, sobre probetas cilíndricas estandarizadas, la falla de estas probetas se realiza colocando almohadillas de neopreno en los extremos. Se utilizó una prensa digital de procedencia italiana, la cual cuenta con las siguientes características:

- **Marca del equipo:** ControlsGroup
- **Modelo de equipo:** 1253337002
- **Año de fabricación:** 2013
- **Capacidad de fuerza máxima:** 2000 KN
- **Superficie del pistón:** 31415,9 mm²
- **Golpe del Pistón:** 50 mm
- **Peso de la maquina:** 550 Kg

Los materiales elastoméricos se deforman inicialmente para ajustarse a los extremos de los cilindros y son restringidas lateralmente por placas de acero y anillos metálicos para evitar la deformación lateral excesiva este procedimiento no debe ser utilizado

como una prueba de aceptación del hormigón que tenga una resistencia especificada menor a 10 MPa (100 kg/cm²) o mayor a 85 MPa (850 kg/cm²).

Resumen de procedimiento

El ensayo propiamente dicho se basa en la colocación de las almohadillas en el espécimen. Antes de colocarlas se debe verificar que no tengan grietas o desgastes considerables. Se coloca el retenedor de almohadilla sobre la misma ya colocada en el cilindro. Se debe verificar que el cilindro este alineado en el eje central con la almohadilla, el retenedor y la cabeza de carga de la máquina de ensayo. Se realiza el ensayo de compresión según lo establecido en ASTM C39.

3.4.7.1 Resultados Ensayo de roturas de probetas a Compresión

El ensayo de compresión constituye uno de los procedimientos fundamentales para evaluar el comportamiento mecánico del hormigón endurecido. A través de este ensayo se determina la capacidad de las probetas cilíndricas para resistir cargas axiales. Los datos consignados constituyen la base para el cálculo de esta investigación.

3.4.7.1.1 Hormigón patrón

Tabla 27. Resultado de resistencia a compresión del hormigón patrón

N°	Hormigon patron	Edad	Resistencia
	%	(dias)	(MPa)
1	0.0	7	29.31
2			27.90
3			32.57
4			31.41
5	0.0	14	34.07
6			36.78
7			35.23
8			35.03
9	0.0	28	38.77
10			39.59
11			37.66
12			38.93
13			37.42
14			37.72
15			37.58
16			37.85

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.1.2 Hormigón con aditivo superplastificante

Tabla 28. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (0.5%)

Nº	Hormigon con superplastificante	Edad	Resistencia
	%	(dias)	(MPa)
1	0.5	7	42.32
2			42.83
3			41.79
4			43.02
5		14	44.98
6			44.72
7			43.24
8			44.46
9		28	47.68
10			46.84
11			47.42
12			46.40
13			46.50
14			47.92
15			45.22
16			46.57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (1.0%)

Nº	Hormigon con superplastificante	Edad	Resistencia
	%	(dias)	(MPa)
1	1.0	7	38.28
2			36.94
3			39.56
4			38.43
5		14	46.26
6			52.55
7			45.67
8			47.99
9		28	43.30
10			50.19
11			46.45
12			47.17
13			52.27
14			43.47
15			50.10
16			50.84

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (1.5%)

Nº	Hormigon con superplastificante	Edad (dias)	Resistencia (MPa)
	%		
1	1.5	7	53.25
2			55.21
3			55.14
4			54.88
5		14	58.63
6			60.00
7			56.48
8			58.50
9		28	61.09
10			54.13
11			55.23
12			55.10
13			54.42
14			59.61
15			59.82
16			59.73

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 31. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (2.0%)

Nº	Hormigon con superplastificante	Edad (dias)	Resistencia (MPa)
	%		
1	2.0	7	52.97
2			54.97
3			55.02
4			54.87
5		14	57.06
6			58.43
7			56.71
8			58.70
9		28	57.13
10			57.71
11			58.13
12			58.77
13			61.87
14			56.52
15			59.50
16			60.95

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7.1.3 Hormigón con aditivo superplastificante más la adición de microsilíce

Tabla 32. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (0.5%) + microsilíce (2.5%)

Nº	Hormigon con Superplastificante + Microsilíce	Edad	Resistencia
	%	(dias)	(MPa)
1	0.5+2.5	7	43.80
2			44.29
3			43.75
4			44.17
5		14	46.22
6			44.54
7			46.56
8			46.96
9		28	42.51
10			49.50
11			49.05
12			46.04
13			48.68
14			47.16
15			48.62
16			47.11

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (1.0%) + microsilíce (5.0%)

Nº	Hormigon con Superplastificante + Microsilíce	Edad	Resistencia
	%	(dias)	(MPa)
1	1.0+5.0	7	41.03
2			41.21
3			41.12
4			41.01
5		14	56.04
6			54.08
7			48.07
8			52.73
9		28	57.12
10			57.92
11			57.43
12			58.10
13			57.69
14			57.50
15			58.39
16			57.05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 34. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (1.5%) + microsilíce (7.5%)

Nº	Hormigon con Superplastificante + Microsilíce	Edad	Resistencia
	%	(días)	(MPa)
1	1.5+7.5	7	52.43
2			54.49
3			52.36
4			52.23
5		14	57.84
6			57.77
7			58.70
8			58.59
9		28	56.63
10			62.11
11			60.36
12			58.65
13			61.08
14			56.50
15			61.96
16			56.45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 35. Resultado de resistencia a compresión del hormigón con superplastificante (2.0%) + microsilíce (10.0%)

Nº	Hormigon con Superplastificante + Microsilíce	Edad	Resistencia
	%	(días)	(MPa)
1	2.0+10.0	7	44.73
2			52.71
3			46.52
4			46.47
5		14	61.49
6			62.06
7			57.95
8			54.75
9		28	64.78
10			60.07
11			64.04
12			62.79
13			60.43
14			63.38
15			63.66
16			63.97

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Características físicas y mecánicas de las muestras

4.1.1 Agregados

Agregado fino

Después de haber realizado el ensayo con base en la Norma ASTM C136, con los límites recomendados en la Norma ASTM C33 se puede verificar que el agregado fino cumple con los requisitos de para poder realizar el trabajo de investigación.

El agregado fino con módulo de finura promedio MF=2,86 se encuentra dentro del parámetro establecido en la Norma, ya que se recomienda que el agregado fino elegido debe de tener módulo de finura en el rango de 2.3 a 3.0.

El módulo de finura obtenido clasifica a la arena como gruesa, lo cual resulta favorable para la elaboración de hormigones de alta resistencia, ya que se recomienda que dicho valor sea lo más próximo posible a 3.

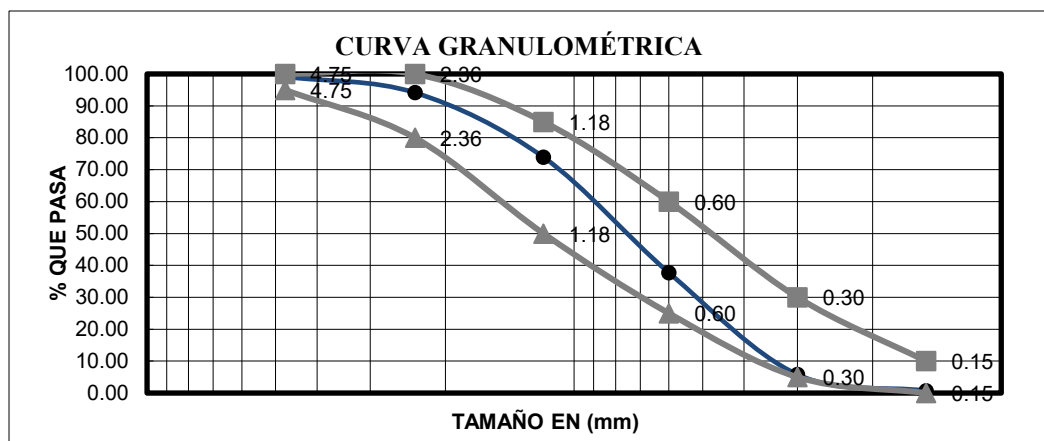
Muestra 1.- Agregado fino planta de áridos Tolomosa

Tabla 36. Análisis granulométrico agregado fino

Peso Total (g)		500.00					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% q. pasa del total	Especificacion ASTM C-33	
Nº4	4.75	4.40	4.40	0.88	99.12	95	100
Nº8	2.36	24.90	29.30	5.86	94.14	80	100
Nº16	1.18	101.10	130.40	26.08	73.92	50	85
Nº30	0.60	181.00	311.40	62.28	37.72	25	60
Nº50	0.30	159.50	470.90	94.18	5.82	5	30
Nº100	0.15	25.50	496.40	99.28	0.72	0	10
BASE		3.50	499.90	99.98	0.02		
SUMA		499.90					
PÉRDIDAS		0.10					
MF =		2.89					

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19. Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 37. Características físicas del agregado fino

Agregado fino (Arena)	
Peso específico (g/cm^3)	2.38
Peso específico con SSS (g/cm^3)	2.46
Peso específico aparente (g/cm^3)	2.60
Peso unitario compactado (g/cm^3)	1.60
Peso unitario suelto (g/cm^3)	1.49
Modulo de finura (g/cm^3)	2.86
Porcentaje de absorcion (%)	3.54

Fuente: Elaboración propia.

Agregado Grueso

Muestra 1.- Agregado grueso planta de áridos Tolomosa

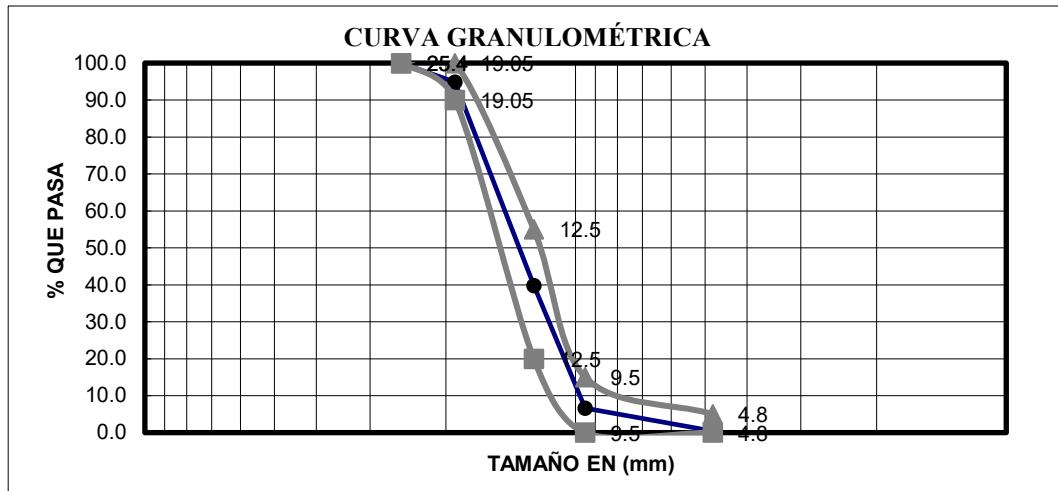
Tabla 38. Análisis granulométrico agregado grueso

Peso Total (g.) =		10000					
Tamiz	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido acumulado		% q. pasa del total	% Que pasa s/g Especif. ASTM	
			(g)	(%)			
1"	25.40	0.00	0.00	0.00	100.0	100	100
3/4"	19.05	510.60	510.60	5.11	94.9	90	100
1/2"	12.50	5513.65	6024.25	60.24	39.8	20	55
3/8"	9.50	3314.50	9338.75	93.39	6.6	0	15
Nº4	4.80	619.25	9958.00	99.58	0.4	0	5
BASE	0	42.00	10000.00	100.00	0.0		
SUMA =		10000.00					
PÉRDIDAS =		0.00					
MF =		6.98					

TAMAÑO MAX : 1"
TAMAÑO MAX NOMINAL = 3/4"

Fuente: Elaboración propia.

Figura 20. Curva granulométrica y control granulométrico



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 39. Características físicas del agregado grueso

Agregado Grueso (Grava)	
Peso específico a granel (g/cm^3)	2.59
Peso específico con SSS(g/cm^3)	2.62
Peso específico aparente (g/cm^3)	2.67
Peso unitario compactado (g/cm^3)	1.40
Peso unitario suelto (g/cm^3)	1.28
Porcentaje de desgaste (%)	18.83
Porcentaje de absorción (%)	1.25

Fuente: Elaboración propia.

Se verifica que la granulometría entra dentro de las bandas granulométricas establecidas en las especificaciones de los agregados para el hormigón como indica la ASTM C33, entonces concluimos que cumple la normativa a cabalidad.

Verificando que contamos con un árido grueso con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ de pulgada, el cual por recomendación es el máximo permitido para la elaboración de este tipo de hormigones.

El peso específico aparente nos arroja un valor de 2.67 g/cm^3 en cual cumple con el valor mínimo que nos recomiendan que debe de tener el agregado que es de 2.6 g/cm^3 .

El porcentaje de absorción nos arroja un valor de 1.25% el cual no está muy alejado del valor máximo que nos recomiendan que es de 1 %, ya que valores más elevados conllevan al desajuste de la relación agua cemento (A/C) útil. Por lo tanto es un valor aceptable para la realización de este trabajo de investigación.

El porcentaje de desgaste obtenido fue de 18,83%, valor que se considera muy favorable para la provisión de gravas de alta calidad. Esto indica que el agregado grueso presenta una excelente resistencia al desgaste, lo que lo hace apto para aplicaciones estructurales exigentes. Según referencias internacionales, para la elaboración de hormigones de alta resistencia, el valor de desgaste no debería superar el 20%, por lo que el resultado obtenido cumple ampliamente con este criterio.

El agregado grueso no presento una cantidad considerable de polvo o material ajeno al mismo; pero aun así al momento de realizar la dosificación se hizo el lavado respectivo a fin de garantizar con mayor precisión resultados confiables.

4.1.2 Hormigón en estado fresco

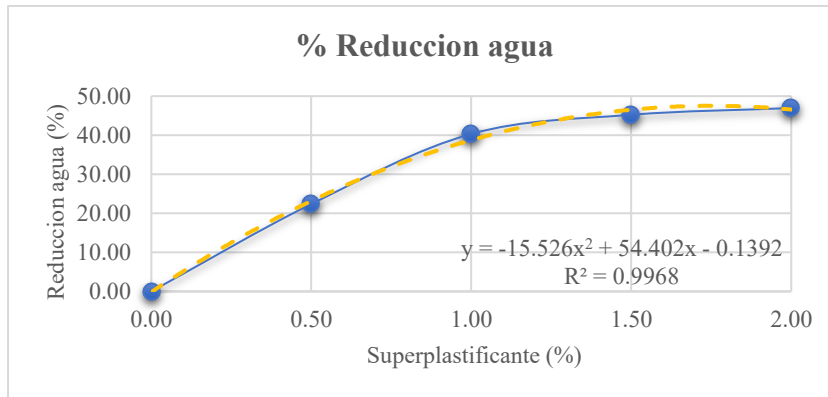
El hormigón de buena trabajabilidad debería fluir lentamente hacia el lugar sin segregación.

Tabla 40. Hormigón en estado fresco aditivo superplastificante

Resultado hormigon en estado fresco superplastificante						
Parametro		Patron	Superplastificante al :			
			0.50%	1.0%.	1.50%	2.00%
Cemento	Kg	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
% Reduccion agua	%	0.00	22.37	40.32	45.22	46.95
Agua	l	200.00	155.25	119.35	109.56	106.10
R=a/c		0.40	0.31	0.24	0.22	0.21
Asentamiento Cono de abrams	cm	8.00	7.50	23.50	23.50	24.50

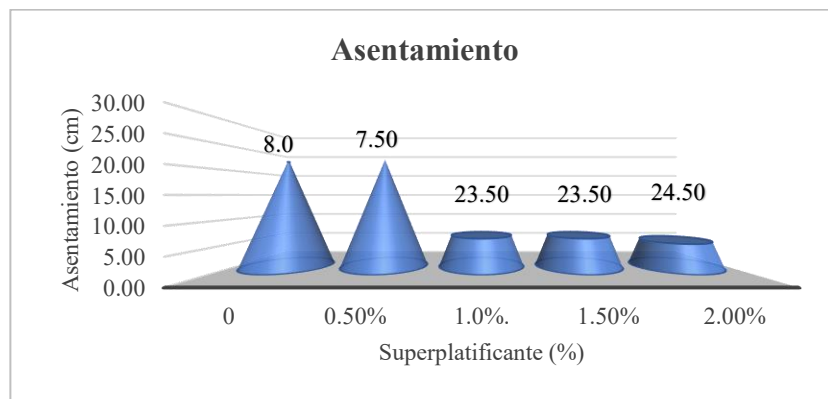
Fuente: Elaboración propia.

Figura 21. Porcentaje de reducción de agua



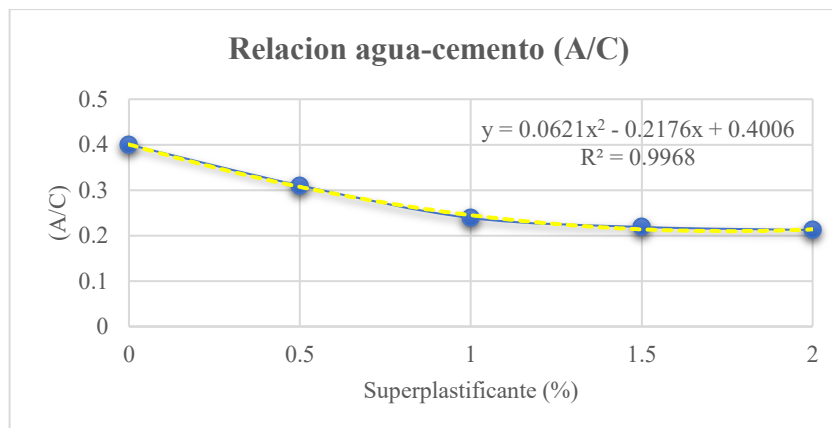
Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Asentamiento cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia.

Figura 23. Relación agua-cemento



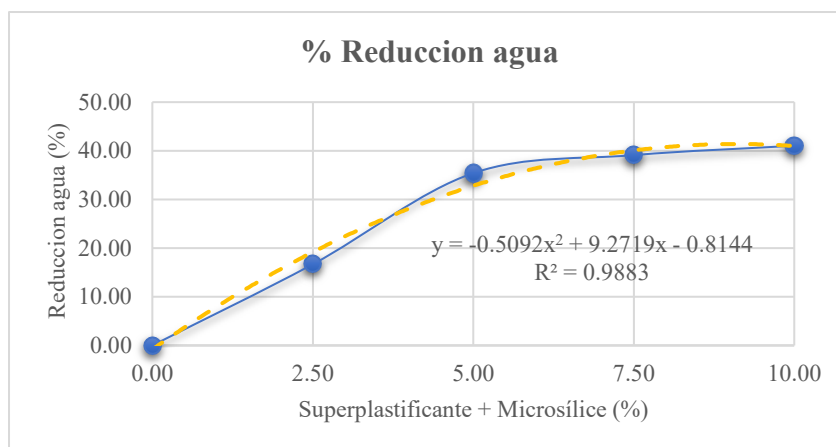
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 41. Hormigón en estado fresco aditivo superplastificante más adición de microsílíce

Resultado hormigon en estado fresco superplastificante + microsílíce						
Parametro		Patron	superplastificante + microsílíce al :			
			0.5%+2.5	1.0%+5.0%	1.5%+7.5%	2.0%+10.0%
Cemento	Kg	500.00	500.00	500.00	500.00	500.00
% Reduccion agua	%	0.00	16.69	35.41	39.11	41.04
Agua	l	200.00	166.62	129.17	121.77	117.92
R=a/c		0.40	0.33	0.25	0.23	0.21
Asentamiento Cono de abrams	cm	8.00	11.00	24.00	25.00	25.00

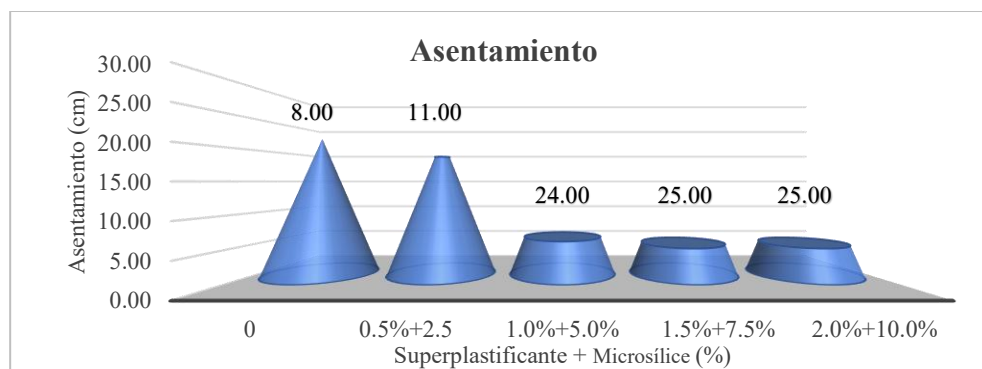
Fuente: Elaboración propia.

Figura 24. Porcentaje de reducción de agua



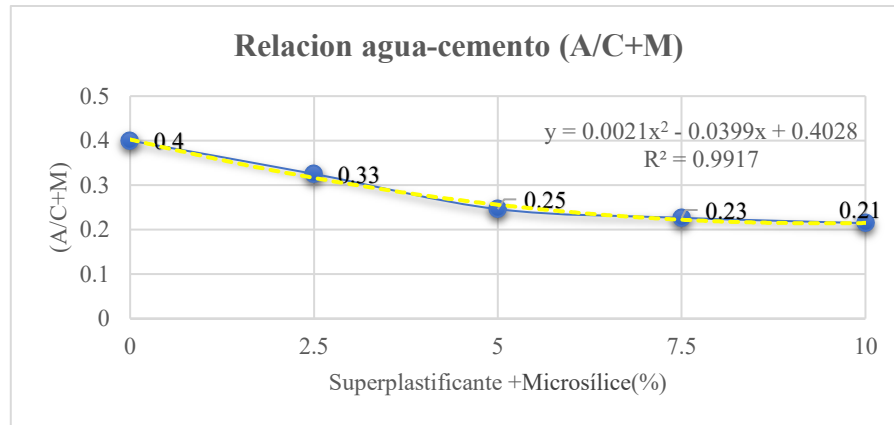
Fuente: Elaboración propia.

Figura 25. Asentamiento cono de Abrams



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Relación agua-cemento



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Hormigón en estado Endurecido

4.1.3.1 Hormigón patrón

Los resultados de resistencia a compresión del hormigón patrón evidenciaron un desempeño satisfactorio, alcanzando la resistencia de diseño a los 28 días.

Se aplicó el criterio para la aceptación de probetas curadas en forma estándar, establecido en el numeral 26.12.3 según el proyecto de norma NB 1225001, el cual se detalla en el ANEXO H.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación experimental desarrollada en laboratorio.

4.1.3.2 Resultado del análisis estadístico de la resistencia a compresión

Para la contrastación se emplearon inicialmente herramientas de estadística descriptiva, considerando los valores promedio de resistencia a compresión obtenidos a los 7, 14 y 28 días de curado. Con estos resultados se elaboraron las gráficas comparativas y se determinó el porcentaje de incremento de resistencia de cada dosificación con respecto a la mezcla patrón, lo que permitió visualizar las tendencias generales de comportamiento.

Posteriormente, con el fin de verificar si los incrementos observados se debieron al efecto real de los aditivos y no al azar, se aplicó un análisis de estadística inferencial mediante la prueba t de Student, comparando la mezcla patrón con cada una de las

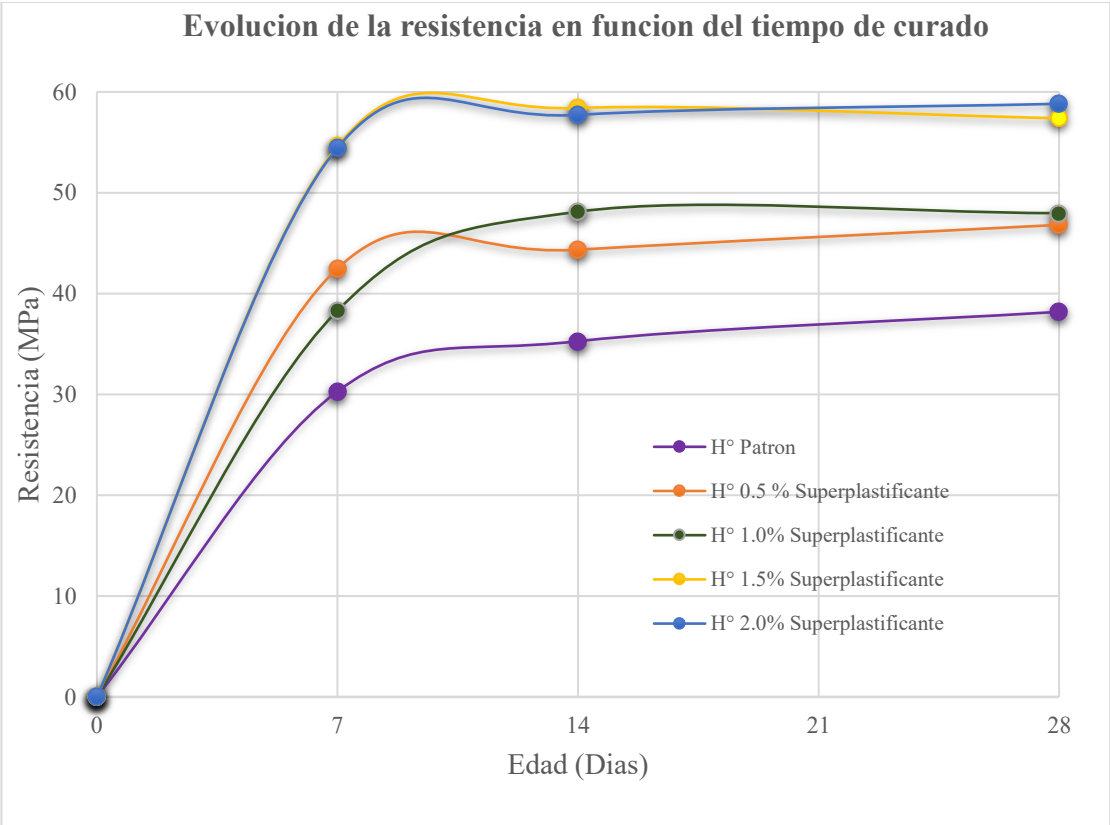
mezclas modificadas. Esta prueba permitió validar la significancia estadística de las diferencias en la resistencia a compresión obtenidas experimentalmente.

Tabla 42. Resistencia a compresión media en función del tiempo de curado del hormigón con superplastificante

Resistencia (MPa)					
Edad (Dias)	Patron	Hormigon con superplastificante			
		0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
7	30.30	42.49	38.30	54.62	54.45
14	35.28	44.35	48.12	58.40	57.72
28	38.19	46.82	47.97	57.39	58.82

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo de curado del hormigón con superplastificante



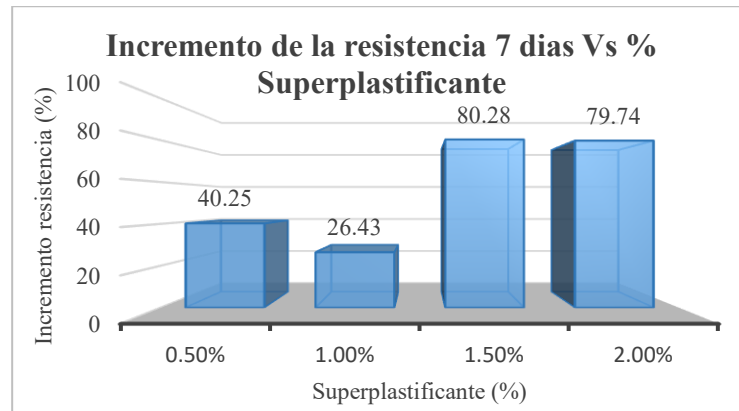
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 43. Incremento de la resistencia a compresión en función tiempo de curado del hormigón con superplastificante

Incremento resistencia (%)				
Edad	Hormigon con superplastificante			
(dias)	0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
7	40.25	26.43	80.28	79.74
14	25.72	36.41	65.55	63.63
28	22.59	25.61	50.27	54.02

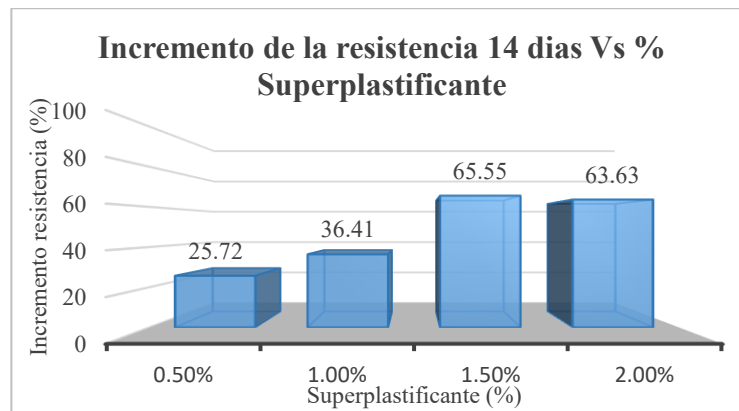
Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Incremento de la resistencia a la edad de 7 días Vs Porcentaje de superplastificante



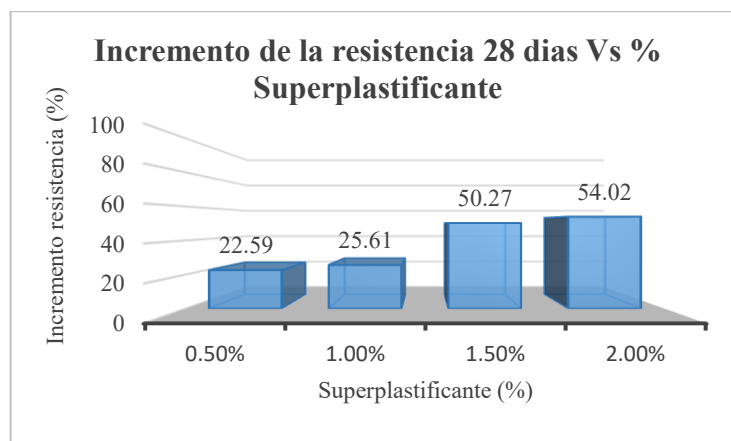
Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Incremento de la resistencia a la edad de 14 días Vs Porcentaje de superplastificante



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Incremento de la resistencia a la edad de 28 días Vs Porcentaje de superplastificante



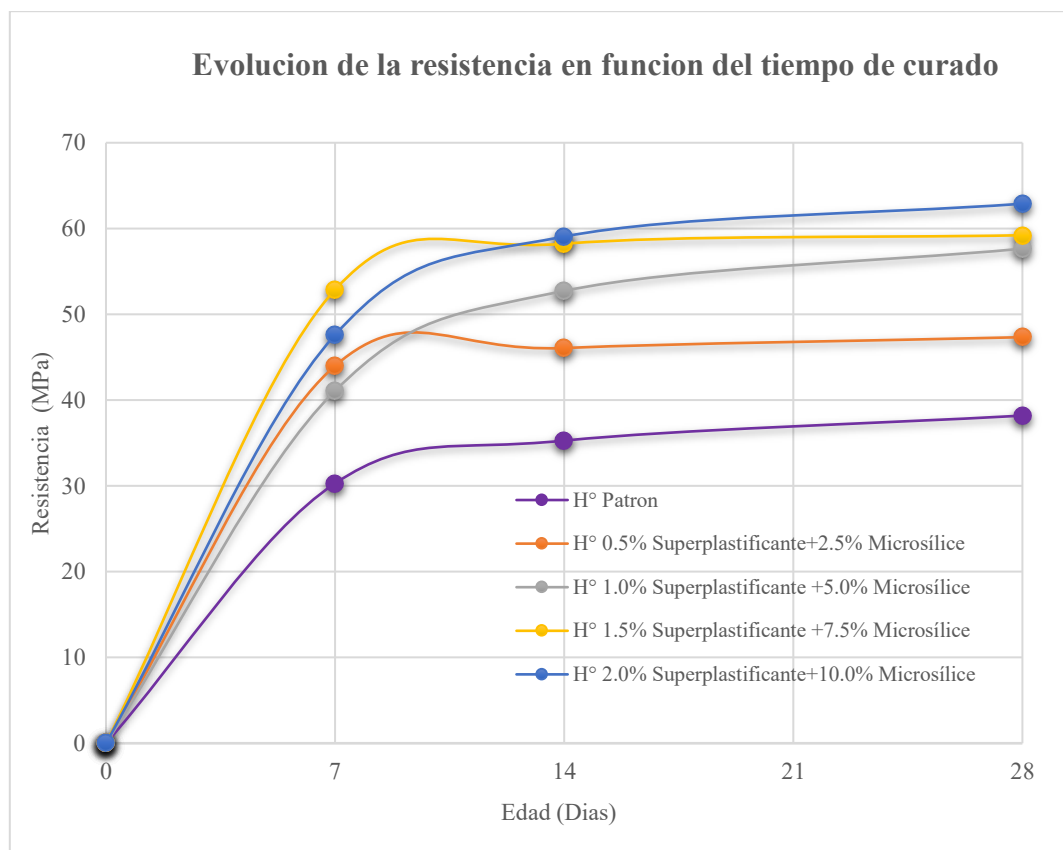
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 44. Resistencia a compresión media en función del tiempo de curado del hormigón con superplastificante más adición de microsílíce

Resistencia (MPa)					
Edad (días)	Patron	Hormigon con Superplastificante + Microsílíce			
		0.5%+2.5%	1.0%+5.0%	1.5%+7.5%	2.0%+10.0%
7	30.30	44.00	41.09	52.88	47.61
14	35.28	46.07	52.73	58.23	59.06
28	38.19	47.33	57.65	59.22	62.89

Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Evolución de la resistencia a compresión en función del tiempo de curado del hormigón con superplastificante más adición de microsílíce



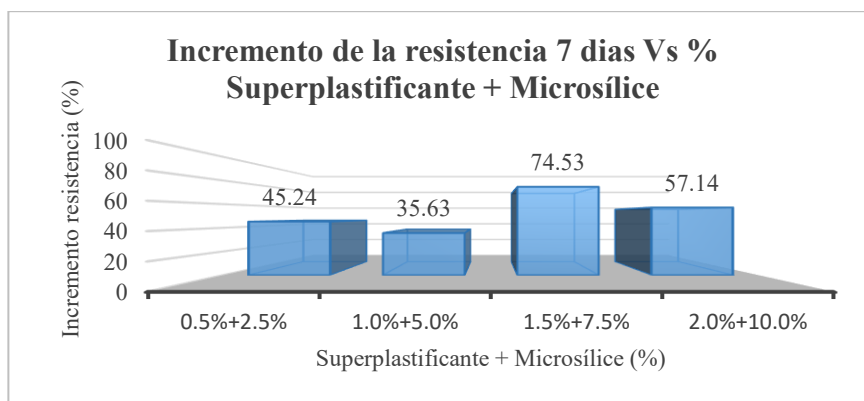
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Incremento de la resistencia a compresión en función tiempo de curado del hormigón con superplastificante más adición de microsílíce

Incremento resistencia (%)				
Edad (dias)	Hormigon con Superplastificante + Microsílíce			
	0.5%+2.5%	1.0%+5.0%	1.5%+7.5%	2.0%+10.0%
7	45.24	35.63	74.53	57.14
14	30.60	49.47	65.05	67.42
28	23.94	50.95	55.05	64.67

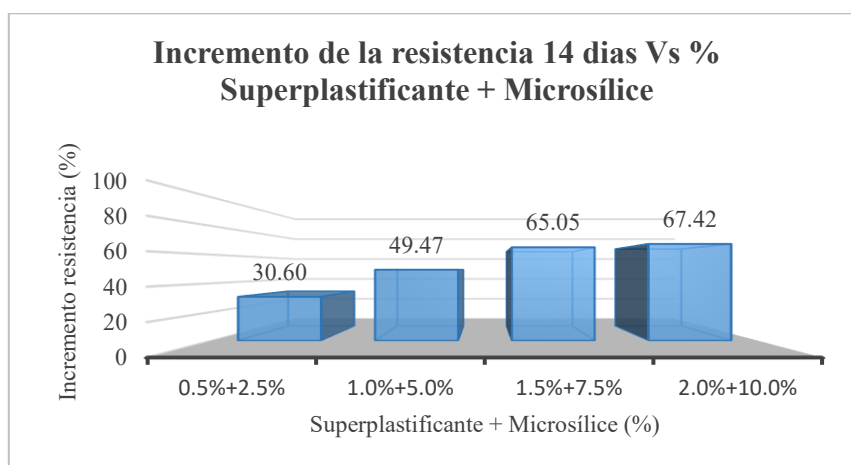
Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Incremento de la resistencia a la edad de 7 días Vs porcentaje de aditivo superplastificante más adición de microsilíce



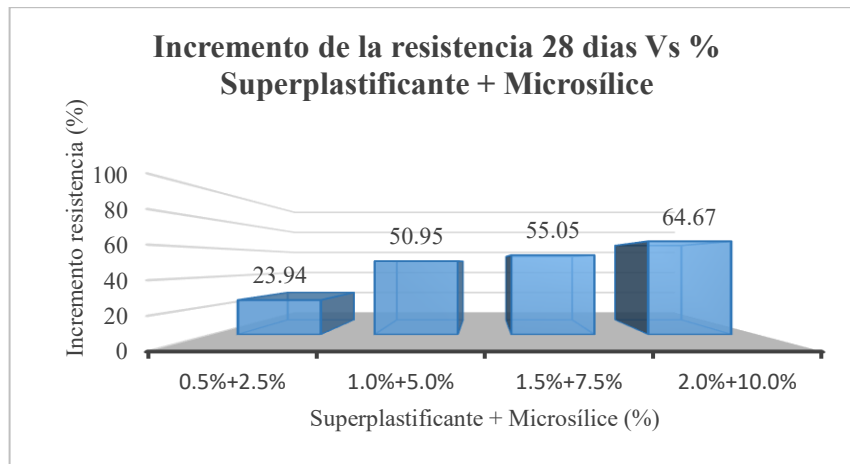
Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Incremento de la resistencia a la edad de 14 días Vs porcentaje de aditivo superplastificante más adición de microsilíce



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Incremento de la resistencia a la edad de 28 días Vs porcentaje de aditivo superplastificante más adición de microsilíce



Fuente: Elaboración propia.

4.2 Evaluación de los resultados

4.2.1 Materiales

4.2.1.1 Cemento

El cemento utilizado (Fancesa) cuenta con certificación de calidad IBNORCA IP-40 y cumple con los requisitos establecidos en la norma boliviana NB 011. Por lo tanto, se considera adecuado para la elaboración de mezclas de hormigón, tanto con la incorporación del aditivo superplastificante como con la adición de microsilíce.

4.2.1.2 Agregados

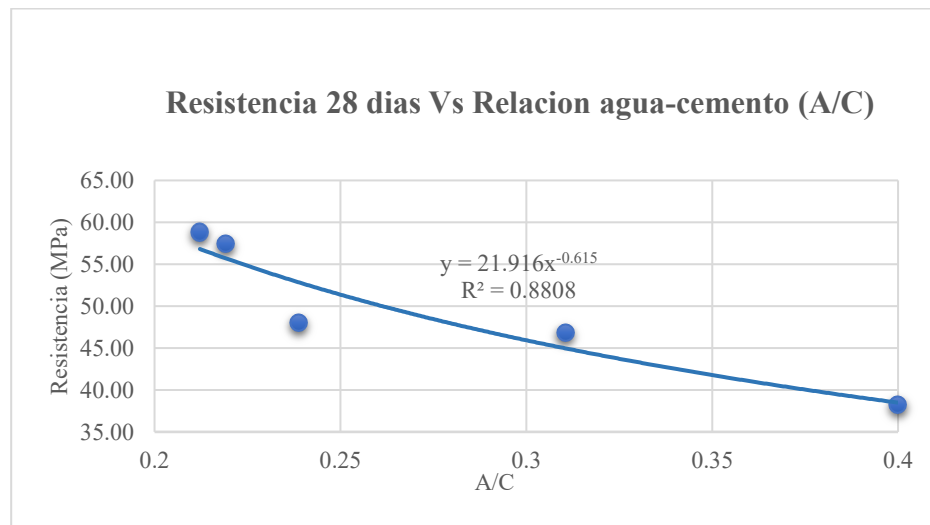
Los agregados empleados se consideran adecuados para los propósitos del estudio, dado que sus propiedades se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C33, la cual especifica los requisitos para agregados utilizados en hormigones estructurales.

4.2.1.3 Aditivo

Al usar aditivos reductores de agua la resistencia mecánica sigue también la ley de Abrams, es decir es proporcional a la relación A/C del hormigón (mayor relación A/C menor resistencia a compresión), por lo que al utilizar aditivos reductores de agua de alto poder obtendremos la máxima resistencia a compresión para un contenido de cemento dado. Los aditivos reductores de alto poder permiten una disminución en la relación A/C notoria.

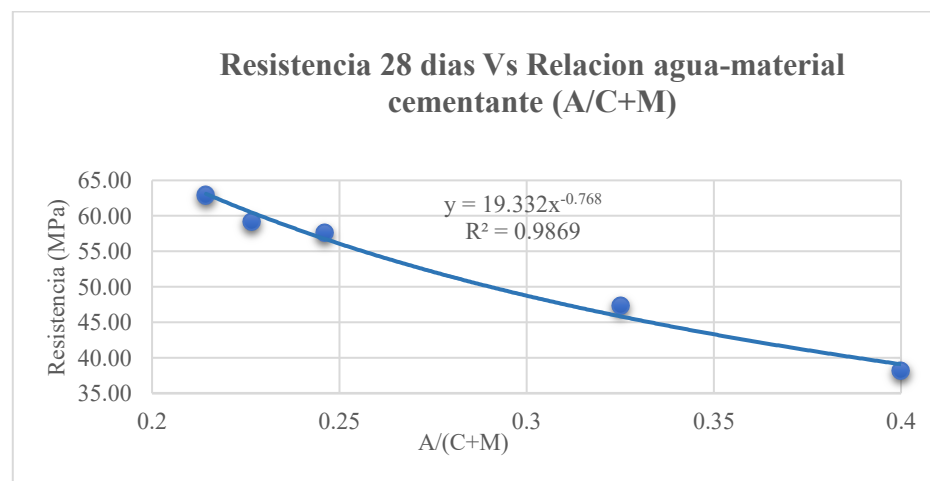
La trabajabilidad también se ve influenciada por la dosificación de cada mezcla. Se utilizó el aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango, está diseñado para cumplir con los requisitos de la norma ASTM C494. También cumple los requisitos establecidos en el proyecto de la norma NB 1225001 – Aditivos. Por lo tanto, se considera adecuado para los propósitos de estudio.

Figura 35. Relación agua-cemento vs Resistencia a compresión modificado con superplastificante



Fuente: Elaboración propia.

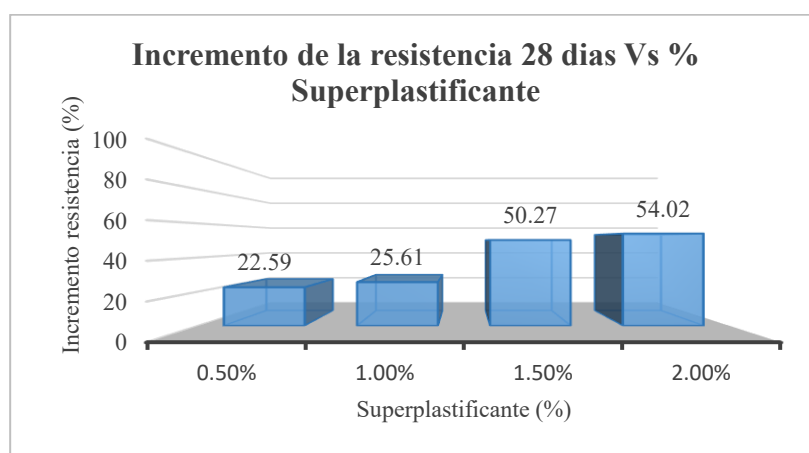
Figura 36. Relación agua-cemento vs Resistencia a compresión modificado con superplastificante más microsilíce



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que la dosificación del aditivo presenta una relación directamente proporcional con la resistencia a compresión: a mayor dosificación, mayor resistencia. En particular, la dosificación al 2 % de aditivo alcanzó una resistencia a compresión a los 28 días 54.02 % mayor que la muestra patrón, mientras que las dosificaciones al 1,5 %, 1 % y 0,5 % mostraron incrementos de 50.27 %, 25.61 % y 22.59 %, respectivamente, como consecuencia del uso del aditivo superplastificante.

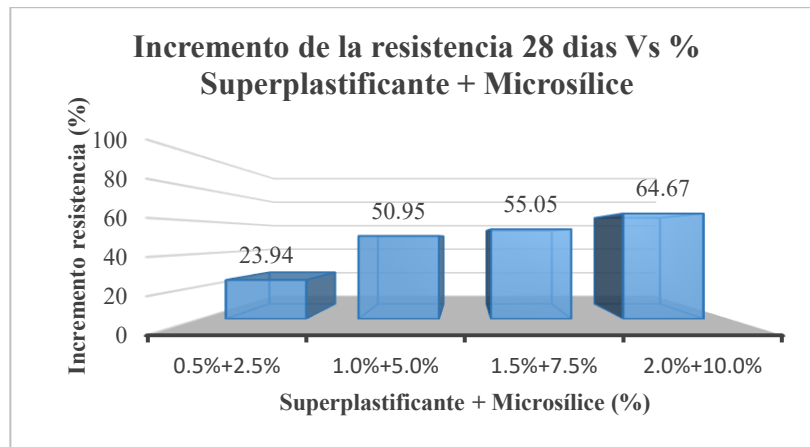
Figura 37. Incremento de la resistencia vs la cantidad de aditivo superplastificante



Fuente: Elaboración propia.

Un efecto similar se observó con la adición de microsílice, en la cual el mayor incremento de resistencia se logró al incorporar un 10 %, alcanzando un 64.67 % más que el hormigón patrón. Las dosificaciones de 7,5 %, 5,0 % y 2,5 % produjeron incrementos de 55.05 %, 50.95 % y 23.94 %, respectivamente.

Figura 38. Incremento de la resistencia vs cantidad de aditivo superplastificante más adición de microsilíce



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Hormigón estado fresco

4.2.2.1 Relación agua cemento

Los resultados muestran que la mezcla patrón presentó la relación agua/cemento más alto. Con la incorporación del superplastificante, esta relación se redujo progresivamente, manteniendo la trabajabilidad con menor contenido de agua, como se puede observar en la Figura 36 y Figura 37.

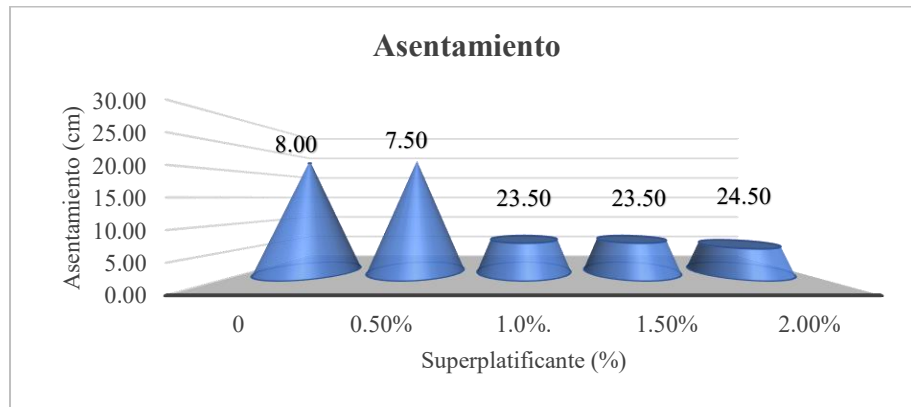
En el caso de las mezclas con microsilíce, la relación calculada ya no corresponde estrictamente a agua/cemento, sino a agua/material cementante (agua dividida entre cemento + microsilíce). Bajo este criterio, se observó que los valores se mantuvieron similares a los obtenidos únicamente con superplastificante, dado que la microsilíce, por su alta finura, incrementa la demanda de agua. No obstante, el efecto dispersante del superplastificante evitó aumentos significativos, manteniendo relaciones estables. En conclusión, el empleo de superplastificante redujo la relación A/C de referencia, mientras que al adicionar microsilíce los valores de (A/C+M) permanecieron cercanos, a pesar de la demanda de agua adicional.

4.2.2.2 Asentamiento

A medida que se incrementa el porcentaje de aditivo superplastificante en la mezcla, se hace más difícil medir el asentamiento utilizando el cono de Abrams, ya que la

mezcla tiende a fluir lentamente una vez que se retira el cono. Por esta razón, es necesario esperar a que la mezcla se detenga por completo para poder registrar el asentamiento, el cual puede alcanzar valores de hasta 25.0 cm cuando se utilizan porcentajes de aditivo superiores al 0.5%. En cambio, con el porcentaje mínimo recomendado según la ficha técnica 0.5%, aún es posible controlar el asentamiento de forma más precisa.

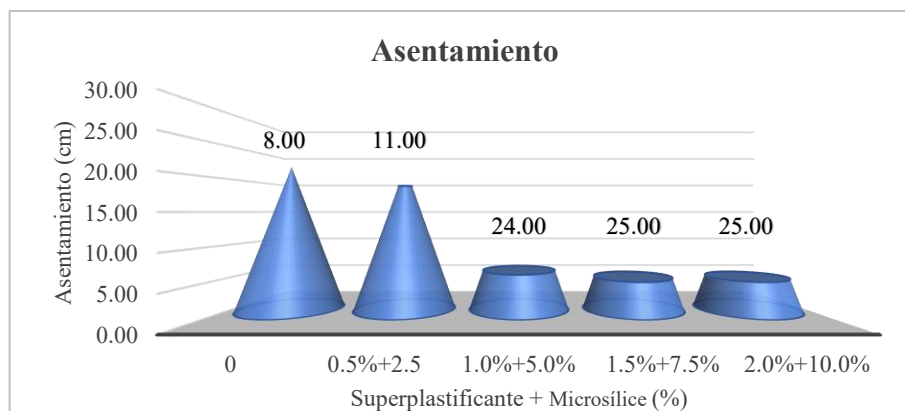
Figura 39. Incremento del asentamiento Vs % Superplastificante



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, en mezclas donde se incorpora microsilíce junto con el superplastificante, no se observó un cambio significativo en el comportamiento del asentamiento respecto a mezclas que contienen solo superplastificante, salvo por un ligero aumento en la demanda de agua. Esto sugiere que, en las condiciones evaluadas, la microsilíce no afecta sustancialmente la fluidez inicial de la mezcla, pero si aporta la densificación del hormigón.

Figura 40. Incremento del asentamiento Vs % Superplastificante más microsílíce



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.3 Trabajabilidad y consistencia

Estos parámetros fueron ajustados mediante la aplicación de diferentes porcentajes de aditivo superplastificante. La mezcla patrón presentó una trabajabilidad muy buena; sin embargo, esta tiende a volverse regular o más difícil de controlar cuando se utilizan porcentajes de superplastificante superiores al 0,5 %. Este comportamiento se asocia a la naturaleza tixotrópica del hormigón fresco: cuando la mezcla permanece en reposo, se comporta como una masa rígida, pero al ser sometida a movimiento o vibración, fluye con facilidad, recuperando posteriormente cierta rigidez al volver al estado de reposo.

Este mismo comportamiento fue observado tanto en mezclas con solo superplastificante como en aquellas que también incorporan microsílíce, lo que indica que la presencia de microsílíce no altera significativamente la tixotropía del sistema, aunque sí incrementa ligeramente la demanda de agua para alcanzar una consistencia similar.

4.2.2.4 Cohesión

Durante el proceso de amasado se pudo identificar que las mezclas modificadas tanto con superplastificante y con microsílíce presentar una cohesión excesiva, formando una masa prácticamente inseparable. Este comportamiento, si bien evita la segregación, puede dificultar la correcta trabajabilidad de la mezcla y limitar su facilidad de colocación.

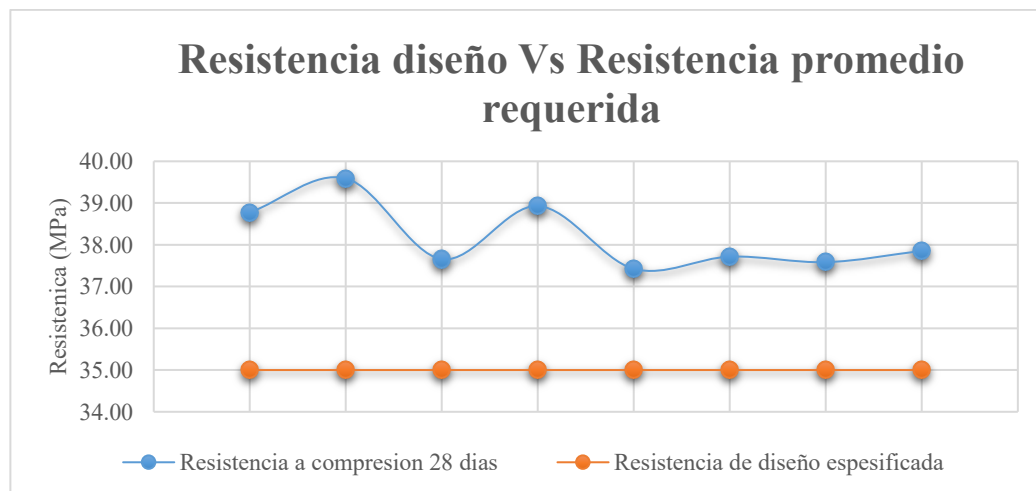
Se identificó que, en las dosificaciones con contenidos de superplastificante iguales o superiores al 1 %, tanto en mezclas sin microsilíce como en aquellas con microsilíce, la masa fresca presentaba un comportamiento particular. Durante el llenado de moldes, el hormigón tendía a fluir y acomodarse con relativa facilidad; sin embargo, al permanecer en reposo, la mezcla se convertía en una masa muy cohesiva y compacta, difícil de manipular con herramientas manuales como la cuchara. Este comportamiento refleja que, aunque la acción del aditivo favoreció la fluidez inicial, la trabajabilidad general no fue elevada debido al exceso de cohesión generado en estas proporciones.

4.2.3 Hormigón endurecido

A los 28 días, la mezcla patrón alcanzó una resistencia promedio superior a 35 MPa, cumpliendo con el valor de diseño establecido. Tal como se observa en la Figura 42, todos los resultados individuales se encuentran por encima de la línea de referencia de 35 MPa, lo que indica que el hormigón patrón desarrolló adecuadamente su resistencia.

Además, el coeficiente de variación calculado se clasifica como “Muy buena” según el (ACI 214R, 2011), lo que confirma la consistencia y confiabilidad de los resultados obtenidos.

Figura 41. Resistencia a compresión de la mezcla patrón a los 28 días



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de resistencia a compresión promedio a 7, 14 y 28 días muestran que varias mezclas modificadas superaron el incremento esperado del 40 % planteado en la hipótesis respecto a la mezcla patrón (H35). En particular:

- Las mezclas con solo superplastificante al 1.5 % y 2.0 % alcanzaron incrementos superiores al 40 %, demostrando que a partir de estas proporciones el aditivo químico tiene un efecto significativo sobre la resistencia. Figura 38.
- De manera similar, las mezclas con superplastificante más microsílice al 7.5 % y 10.0 % también superaron el 40 %, verificándose que ambos aditivos son compatibles, dado que no se observó disminución en la resistencia, sino más bien un ligero incremento en la misma. Figura 39.

Por su parte, las mezclas con menores porcentajes de superplastificante o microsílice presentaron aumentos menores, aunque aún positivos respecto al patrón.

En conclusión, las mezclas con 1.5 % y 2.0 % de aditivo superplastificante solo como combinado con microsílice, cumplieron y superaron el incremento del 40 % propuesto en la hipótesis, validando experimentalmente la estrategia de dosificación adoptada.

4.3 Análisis de costos

4.3.1 Cemento

Para el aumento de resistencia se usó la misma cantidad de cemento y tipo de cemento para todos los hormigones elaborados, por lo que este material no sufre variaciones.

4.3.2 Agregados

Se emplearon cantidades idénticas de agregado fino y grueso en todas las mezclas de hormigón, tanto en las formuladas con aditivo superplastificante como en las combinadas con microsílice; por lo tanto, estos materiales no influyen en el análisis comparativo de costos.

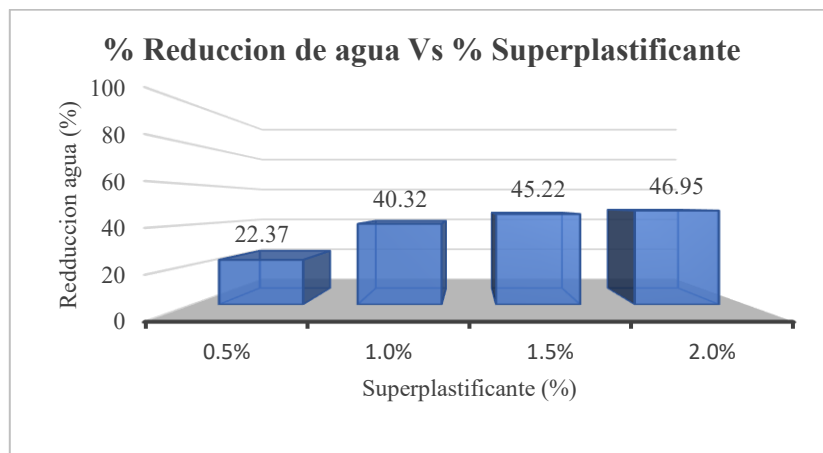
4.3.3 Aditivo

La dosificación de los aditivos se realizó siguiendo las recomendaciones de sus fichas técnicas respectivas y en concordancia con lo establecido en los objetivos específicos de la investigación.

4.3.4 Agua

La incorporación del aditivo superplastificante permitió alcanzar reducciones significativas en la cantidad de agua requerida respecto al hormigón patrón, con valores de 22.37 %, 40.32 %, 45.22 % y 46.95 %, mostrando una tendencia creciente conforme se incrementaba la dosificación del aditivo. Este comportamiento confirma la eficacia del superplastificante como reductor de agua de alto rango, optimizando la relación agua/material cementicio y favoreciendo el desarrollo de mayores resistencias mecánicas.

Figura 42. Reducción de la demanda de agua Vs cantidad de superplastificante

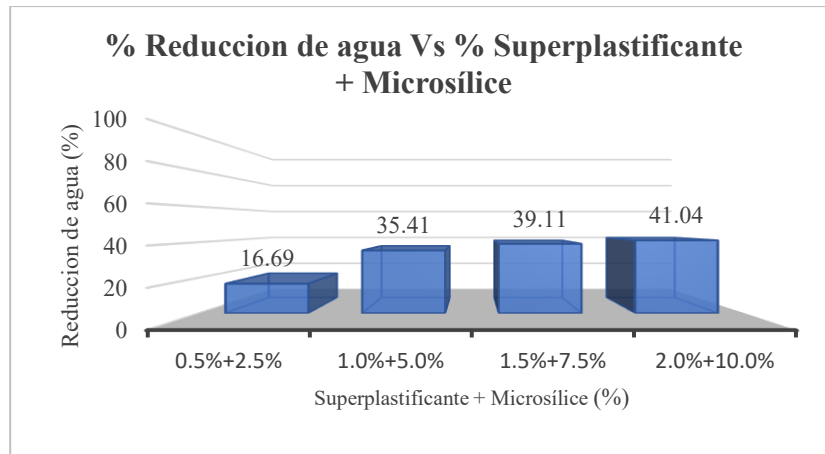


Fuente: Elaboración propia

Al combinar el superplastificante con la microsílice, los porcentajes de reducción de agua fueron de 16.69 %, 35.41 %, 39.11 % y 41.04 %. Los valores más bajos observados en los niveles iniciales se deben a que la microsílice, al ser un material en polvo muy fino, aumenta la cantidad de material cementante en la mezcla, lo que incrementa la demanda de agua inicial para lograr la trabajabilidad deseada. A pesar de ello, se mantiene una clara tendencia de reducción de agua conforme se incrementa la dosificación del aditivo superplastificante, indicando que la microsílice

no solo contribuye a la resistencia y durabilidad del hormigón, sino que también permite conservar el efecto reductor de agua del superplastificante en niveles significativos.

Figura 43. Reducción de la demanda de agua Vs cantidad de superplastificante más microsílíce



Fuente: Elaboración propia

4.3.5 Hormigón

Para propósitos del análisis de costos, se evaluaron la incidencia del uso del aditivo y aditivo más adición, cantidad cemento y el costo del hormigón. para ver a más detalles ver ANEXO J.

Tabla 46. Precio de materiales elementales

Material	Unidad	Precio (Bs)
Cemento	Kg	1.2
Arena	m3	100
Grava	m3	110
Agua	l	0.06
Aditivo	l	90
Adicion	Kg	25

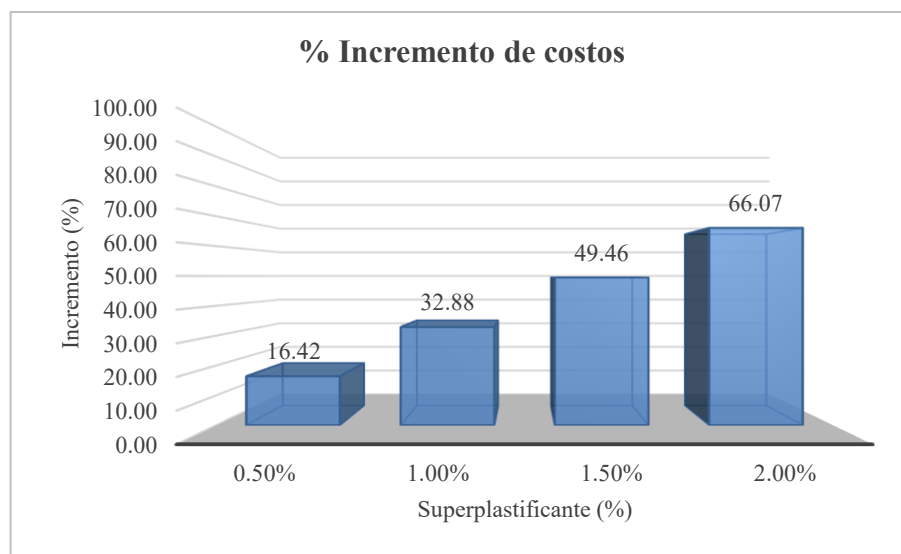
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47. Análisis de costos de hormigón con aditivo superplastificante

Parametro	Patron	Hormigon con superplastificante al			
		0.50%	1.00%	1.50%	2.00%
Total de materiales	677.18	899.50	1122.34	1346.75	1571.55
Total mano de obra	621.45	621.45	621.45	621.45	621.45
Total herramineta y equipo	55.07	55.07	55.07	55.07	55.07
Gastos generales (10%)	135.37	157.60	179.89	202.33	224.81
Utilidad (10%)	148.91	173.36	197.87	222.56	247.29
Impuestos (3.09%)	50.61	58.93	67.26	75.65	84.05
TOTAL	1688.59	1965.91	2243.88	2523.81	2804.21
% incremento	0.00	16.42	32.88	49.46	66.07

Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Incremento de costos para 1m³ de hormigón con aditivo superplastificante



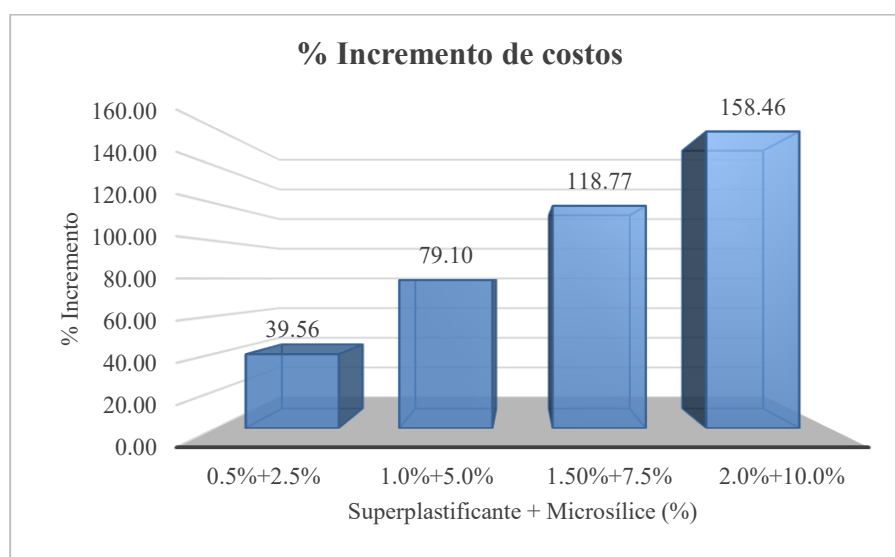
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 48. Análisis de costos de hormigón con aditivo superplastificante más adición de microsilíce

Parametro	Patron	Hormigon con superplastificante + microsilíce al			
		0.5%+2.5%	1.0%+5.0%	1.50%+7.5%	2.0%+10.0%
Total de materiales	677.18	1212.68	1747.93	2284.99	2822.26
Total mano de obra	621.45	621.45	621.45	621.45	621.45
Total herramineta y equipo	55.07	55.07	55.07	55.07	55.07
Gastos generales (10%)	135.37	188.92	242.45	296.15	349.88
Utilidad (10%)	148.91	207.81	266.69	325.77	384.87
Impuestos (3.09%)	50.61	70.64	90.65	110.73	130.82
TOTAL	1688.59	2356.57	3024.23	3694.15	4364.33
% incremento	0.00	39.56	79.10	118.77	158.46

Fuente: Elaboración propia.

Figura 45. Incremento de costos para 1m³ de hormigón con aditivo superplastificante más adición de microsilíce



Fuente: Elaboración propia.

4.4 Contratación de hipótesis

El desarrollo de la presente investigación permitió evidenciar que la incorporación del aditivo superplastificante y su combinación con la adición de microsilíce en un

hormigón convencional de 35 MPa cumplió con las expectativas planteadas en la hipótesis, superando en varios casos el incremento del 40 % previsto.

Los resultados obtenidos, en comparación con el hormigón patrón sin aditivo, fueron los siguientes:

Tabla 49. Porcentajes de incremento de la resistencia respecto al hormigón patrón

Superplastificante		Hipotesis ≥ 40 %	Superplastificante + Microsílice		Hipotesis ≥ 40 %
%	% de Incremento Resistencia		%	% de Incremento Resistencia	
0.50	22.59	No cumple	0.50	23.94	No cumple
1.00	25.61	No cumple	1.00	50.95	Cumple
1.50	50.27	Cumple	1.50	55.05	Cumple
2.00	54.02	Cumple	2.00	64.67	Cumple

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados demuestran que las combinaciones con 1,5 % y 2,0 % de superplastificante, tanto utilizadas de forma individual como en conjunto con microsílice, superaron ampliamente el incremento del 40 % establecido en la hipótesis. Por lo tanto, se confirma que dichas dosificaciones son las más eficientes para alcanzar un hormigón de alta resistencia (HAR), conforme a los criterios establecidos por la norma ACI 211.1. Si bien no todas las mezclas evaluadas alcanzaron dicho incremento, los resultados permiten validar parcialmente la hipótesis, demostrando que los aditivos pueden incrementar significativamente la resistencia del hormigón según la dosificación aplicada.

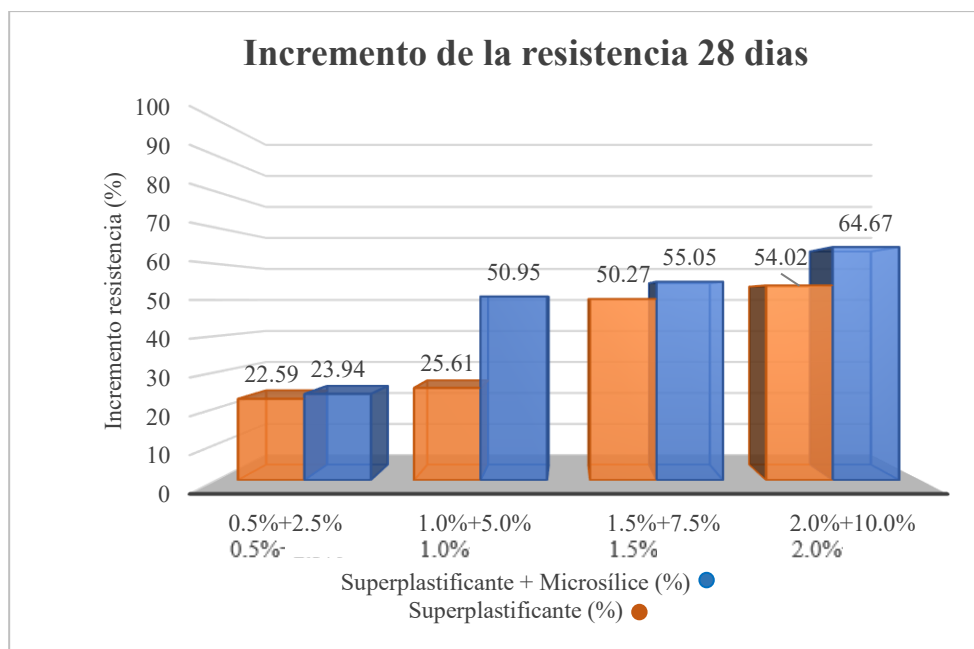
CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Una vez finalizados todos los ensayos de resistencia a compresión, se concluye que la aplicación del aditivo superplastificante, tanto de manera individual como en combinación con la adición de microsilíce, incrementa significativamente la resistencia a compresión del hormigón en comparación con un hormigón convencional. El comportamiento observado es directamente proporcional: a mayores porcentajes de aditivo y de microsilíce, se obtiene una mayor resistencia a compresión.

Figura 46. Incrementos de resistencia a los 28 días con superplastificante

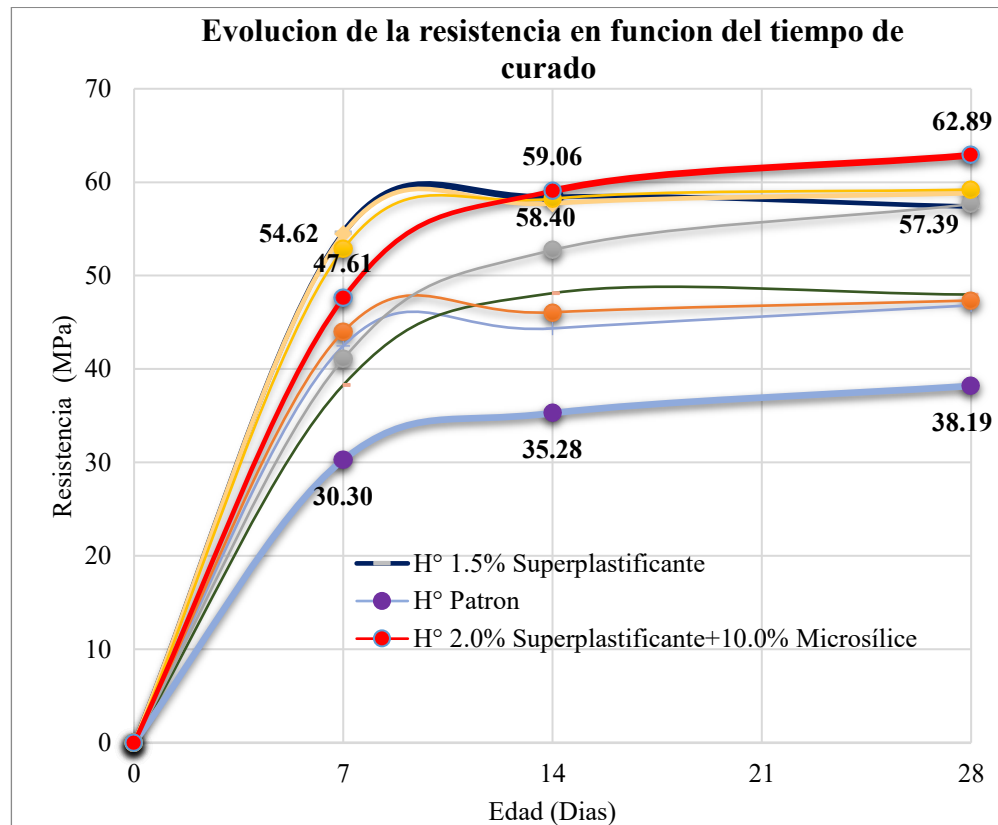


Fuente: Elaboración propia

- La mezcla que incorporó una dosificación de 2.0 % de superplastificante y 10.0 % de microsilíce, en relación al peso del cemento, alcanzó la mayor resistencia a compresión a los 28 días, con un valor promedio de 62.89 MPa como se observa en la figura 48, lo que representa un incremento del 64.67 %

respecto al hormigón patrón. Por lo tanto, esta combinación se identifica como la mezcla más efectiva del estudio.

Figura 47. Evolución de la resistencia en función del tiempo de curado

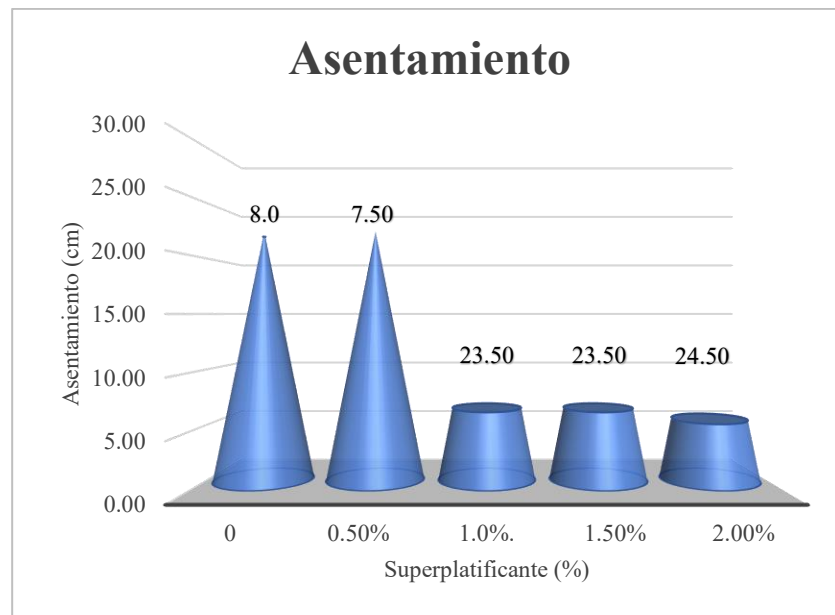


Fuente: Elaboración propia

- La mezcla con 1.5 % de superplastificante obtuvo la mayor resistencia inicial a los 7 días, registrando un valor promedio de 54.62 MPa, como se aprecia en la figura 48. Este resultado representa un incremento del 80.28 % en comparación con el hormigón patrón, lo que demuestra un efecto significativamente favorable del aditivo en el desarrollo temprano de la resistencia mecánica.
- La mezcla patrón presentó la menor resistencia a compresión en todas las edades evaluadas, lo que confirma la mejora mecánica aportada por los aditivos incorporados. Este comportamiento puede observarse claramente en la figura 48.

- La incorporación del aditivo superplastificante mejoró significativamente la trabajabilidad de las mezclas, generando una mayor fluidez sin pérdida de cohesión y permitiendo alcanzar asentamientos elevados. Esta condición facilitó una compactación adecuada y contribuyó a obtener resistencias mecánicas superiores. Asimismo, la tendencia de alta trabajabilidad no se vio afectada al combinar el superplastificante con el microsílíce, manteniéndose los elevados asentamientos en todas las combinaciones evaluadas, lo que evidencia la adecuada compatibilidad entre ambos aditivos.

Figura 48. Incremento del asentamiento Vs % Superplastificante

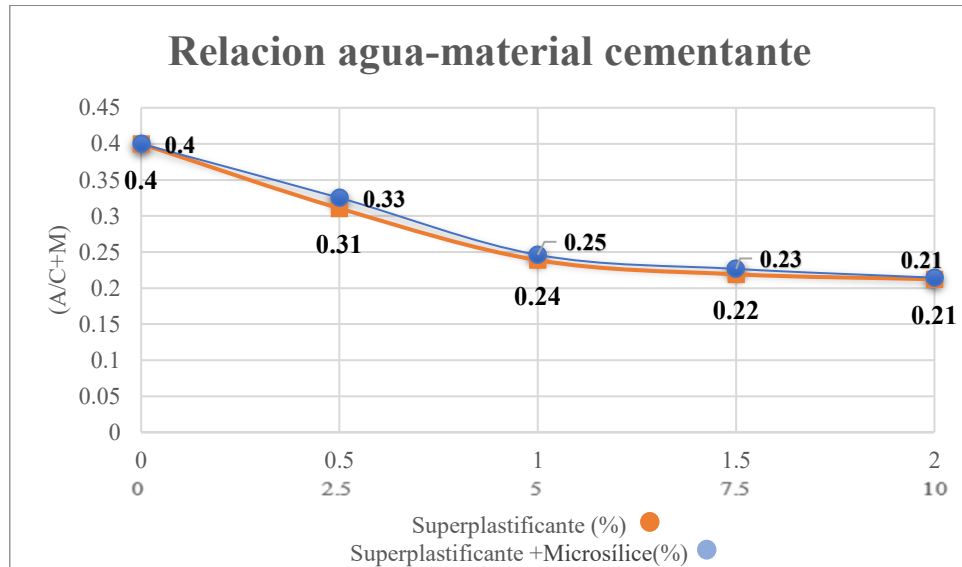


Fuente: Elaboración propia

- La relación agua/cemento se redujo en función del contenido de superplastificante, permitiendo mantener mezclas más fluidas con menor cantidad de agua. En las dosificaciones que incluyeron microsílíce, la relación agua/cemento también se mantuvo por debajo de la mezcla patrón, pese a la mayor demanda de agua asociada a la finura de este material. Por ello, el incremento obtenido en la resistencia a compresión se atribuye tanto al efecto individual del superplastificante como a la combinación de este con la

microsílice, cuyo comportamiento puzolánico densifica la matriz del hormigón.

Figura 49. Relación agua-material cementante corregida



Fuente: Elaboración propia

- Los materiales utilizados en el estudio fueron adecuados y cumplen con los requerimientos establecidos en las normas aplicables. El agregado fino presentó un módulo de finura dentro de los rangos aceptados, mientras que el agregado grueso cumplió con los criterios de granulometría y porcentaje de desgaste establecidos. Asimismo, el superplastificante y la microsílice cumplen con las normas de control vigentes, lo que garantiza su idoneidad para la elaboración de hormigones de alta resistencia.
- La dosificación en peso correspondiente a la mezcla más efectiva para la elaboración de 1 m³ de hormigón de alta resistencia fue la siguiente:

Cemento: 500.0 kg

Grava: 857.64 kg

Arena: 778.10 kg

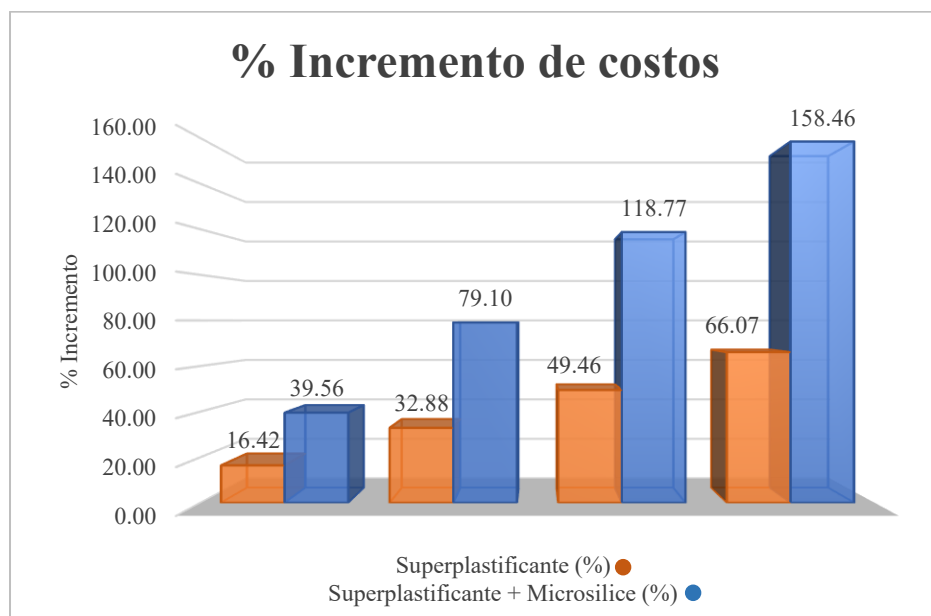
Agua: 117.92 L

Superplastificante: 10.0 kg

Microsílice: 50.0 kg

- Las dosificaciones modificadas demostraron que el costo del hormigón aumenta de manera directamente proporcional al incremento del porcentaje de superplastificante y microsilíce incorporados. La combinación de ambos aditivos generó los incrementos económicos más significativos debido al mayor costo asociado a la microsilíce. En conjunto, estos resultados reflejan que mejorar el desempeño mecánico del hormigón implica un incremento económico proporcional, cuya magnitud depende de la dosificación utilizada.

Figura 50. Incremento de costos



Fuente: Elaboración propia

- La fabricación de hormigones de alta resistencia resulta más costosa que la del hormigón convencional debido a la incorporación de superplastificantes y microsilíce. Sin embargo, este incremento económico se compensa con el beneficio técnico de obtener resistencias tempranas y tardías más elevadas. Este comportamiento ofrece la posibilidad de optimizar o reducir las secciones estructurales sin comprometer la seguridad ni el desempeño.
- Los resultados obtenidos demuestran que es técnicamente viable producir hormigón de alta resistencia mediante la inclusión controlada de

superplastificante y microsílíce, siempre que se mantenga un control adecuado de la calidad de los materiales y de las dosificaciones empleadas.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda verificar que el cemento y los materiales cementantes estén completamente libres de grumos antes de la elaboración de las mezclas de hormigón, especialmente en época lluviosa. La elevada humedad ambiental puede iniciar procesos de hidratación no deseados, disminuyendo el desempeño del cemento y afectando la calidad del hormigón producido.
- Se recomienda realizar una selección rigurosa de los materiales pétreos, asegurando que estén libres de residuos orgánicos y que cumplan con los tamaños máximos nominales establecidos. Los agregados constituyen el componente principal del hormigón y son determinantes en su capacidad para alcanzar su resistencia máxima; por ello, su adecuada calidad y clasificación garantizan una mezcla homogénea y un comportamiento mecánico confiable.
- Se recomienda trabajar con áridos de menor tamaño máximo nominal, dado que, aunque el uso de un tamaño nominal de 3/4" produjo resultados satisfactorios, el empleo de agregados de menor tamaño puede mejorar la eficiencia, homogeneidad y desempeño de las mezclas de hormigón de alta resistencia.
- Se recomienda secar los materiales utilizados en los ensayos en horno durante 24 horas, eliminando totalmente la humedad residual y asegurando que el agua incorporada corresponda únicamente a la dosificación establecida. Asimismo, es fundamental evitar el uso de agregados con exceso de humedad, ya que una cantidad de agua no contemplada puede alterar la relación agua/cemento efectivo, comprometer la acción del superplastificante e incrementar el riesgo de segregación o pérdida de cohesión.
- Se recomienda seguir estrictamente el procedimiento de mezclado descrito en el capítulo 3, ya que este método demostró ser efectivo y reproducible para la

obtención de hormigón de alta resistencia. Mantener este procedimiento garantiza resultados consistentes y de calidad.

- Se recomienda efectuar ensayos preliminares para evaluar el comportamiento del superplastificante y de la microsílíce en combinación con los materiales disponibles, incluyendo variaciones en la marca de cemento y en las características de los agregados. Los hormigones de alta resistencia son especialmente sensibles a estos cambios, y las pruebas previas permiten ajustar la dosificación y asegurar un desempeño estable de la mezcla.
- Se recomienda implementar protocolos estrictos de control de calidad durante el mezclado, transporte, colocación y curado del hormigón, debido a que el hormigón de alta resistencia es altamente sensible a variaciones en tiempos de manipulación, temperatura y procedimientos de colocación. Un control riguroso asegura que las propiedades obtenidas en laboratorio puedan reproducirse adecuadamente en obra.
- Se recomienda aplicar métodos de curado intensivo y controlado, especialmente durante las primeras edades, debido a que el hormigón de alta resistencia desarrolla gran parte de su microestructura en las primeras horas. Mantener condiciones adecuadas de humedad y temperatura es fundamental para garantizar el desarrollo completo de la resistencia y mejorar su durabilidad.
- Se recomienda para futuras investigaciones aplicar un método de curado que sea replicable en obra, considerando que no es posible sumergir los elementos estructurales como se hace en laboratorio. En condiciones reales de construcción, deben emplearse métodos como el curado mediante membranas líquidas, mantas húmedas, aspersión continua o recubrimientos impermeables que aseguren la conservación de la humedad superficial. La correcta implementación de estos métodos permite alcanzar el desarrollo adecuado de la resistencia y garantiza el desempeño esperado del hormigón de alta resistencia.

- Se recomienda emplear protección personal adecuada durante la preparación de las mezclas, debido a que tanto el superplastificante como la microsílice pueden representar riesgos para la salud. La microsílice puede generar partículas respirables peligrosas, mientras que los aditivos químicos pueden causar irritaciones; por ello, es indispensable utilizar mascarillas, guantes, gafas y ropa de protección.
- Se recomienda extremar las medidas de seguridad al realizar los ensayos de compresión, ya que los cilindros de hormigón de alta resistencia pueden fallar de manera súbita y explosiva. Para evitar accidentes, se deben cubrir o proteger los laterales del cilindro mediante barreras o pantallas de seguridad, evitando la exposición del personal a posibles fragmentos proyectados.
- Se recomienda que los estudios futuros no limiten la evaluación de la resistencia del hormigón a los 28 días, sino que se extiendan a edades mayores, ya que el hormigón continúa ganando resistencia más allá de ese periodo, lo que permitiría obtener una caracterización más completa de su comportamiento.
- Se recomienda realizar dosificaciones con superplastificante diseñadas para alcanzar un asentamiento igual al del hormigón patrón, con el objetivo de determinar la reducción real de agua que proporciona el aditivo para un mismo nivel de trabajabilidad.
- Se recomienda evaluar la reducción del contenido de cemento manteniendo la resistencia del hormigón, mediante la incorporación de superplastificante y su combinación con microsílice. Este análisis permitirá cuantificar la disminución de cemento, así como su impacto en el costo final del hormigón.
- Se recomienda continuar investigando el comportamiento físico-mecánico del hormigón de alta resistencia utilizando otros aditivos disponibles en el mercado, así como agregados provenientes de canteras importantes de la región de Tarija, con el fin de ampliar y validar su desempeño bajo diferentes condiciones locales.

- Se recomienda realizar un análisis técnico–económico integral aplicado al diseño estructural, comparando el costo total y la conveniencia del hormigón de alta resistencia frente al hormigón convencional. Este análisis debe considerar no solo la resistencia a compresión, sino también las propiedades adicionales del hormigón de alta resistencia, como su menor relación agua/cemento, mayor densidad, menor permeabilidad y las posibles optimizaciones en el diseño estructural, especialmente en la reducción de secciones y cantidad de acero.
- Se recomienda dar continuidad y promover este tipo de investigaciones, ya que contribuyen significativamente al fortalecimiento de los diseños estructurales locales e incentivan el uso del hormigón de alta resistencia en el medio. La generación de mayor evidencia experimental impulsa la innovación y favorece el desarrollo de estructuras más eficientes, seguras y competitivas en la región.