CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción.

Cuando se pretende construir piscinas, plantas de tratamiento, pilas de puentes en causes muy torrenciales, pavimentos de hormigón, tuberías de alta presión, etc. se recurre a las probetas testigo y a las especificaciones de la norma EHE para hormigón impermeable.

El laboratorio de hormigón y resistencia de materiales de la UAJMS cuenta con el equipo de permeabilidad y absorción del hormigón, en el cual se realizaron pruebas con las cuales podemos medir la permeabilidad del hormigón mediante el método de penetración de agua a presión.

Donde se comparará con las especificaciones que nos da la norma EHE y ver si cumple como hormigón impermeable, añadiendo un aditivo en concentraciones del 1%, 2%, 3% y 5%, y observar cuánto mejora en la penetración y determinar el costo y rendimiento del aditivo en distintos porcentajes.

1.2. El Problema.

1.2.1. Planteamiento del Problema.

Las estructuras de hormigón, como piscinas, plantas de tratamiento, pilas de puentes en causes muy torrenciales, pavimentos de hormigón y tuberías de alta presión, a menudo enfrentan diversas patologías a lo largo de su vida útil, lo que puede comprometer su funcionalidad y seguridad. Una de las principales causas de estas patologías es la baja calidad de los materiales utilizados en su construcción. La impermeabilidad del hormigón es crucial para evitar daños estructurales y prolongar la durabilidad de estas estructuras. En este contexto, es fundamental evaluar la efectividad de productos específicos diseñados para mejorar la resistencia al agua. Este estudio se centrará en analizar la permeabilidad del hormigón cuando se utiliza el producto SiKaCem Impermeable BO, mediante ensayos realizados en probetas de hormigón.

1.2.2. Formulación del Problema.

¿Cuáles son las principales causas que generan patologías relacionadas con filtraciones de agua en estructuras de hormigón?

¿Qué soluciones efectivas pueden aplicarse para mitigar o subsanar las filtraciones de agua en estas estructuras?

¿Cómo impacta el uso de hormigones no impermeables en la integridad y funcionalidad de estructuras diseñadas para el almacenamiento de agua?

1.2.3. Sistematización del Problema.

Tabla 1.1 Matriz P.C.E.S.

Problema	Causa	Efecto	Solución
Presencia de fisuras en diferentes partes de las estructuras como piscinas, plantas de tratamiento, pilas de puentes en causes muy torrenciales, pavimentos de hormigón y tuberías de alta presión, entre otros.	No considerar todas las posibles cargas durante el diseño estructural. Presencia de nivel freático del suelo donde se fundó la subestructura. La falta del uso de impermeabilizantes en almacenamientos de agua que originen el deterioro del hormigón.	Fisuras en diferentes partes de la estructura. Riesgo de colapso de estructuras en el transcurso del tiempo. Asentamientos en la subestructura debido a la humedad.	Definir a que se debe la causa de la falla y analizar si es posible subsanar las fallas para darle más tiempo de vida útil a la estructura. Investigación de la permeabilidad de un hormigón elaborado de un aditivo impermeabilizante para ver su calidad en laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

1.3. Justificación

1.3.1. Académica.

La actual investigación se justifica para obtener el título profesional de ingeniero civil, ya que profundiza en los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

Además, permite demostrar conocimientos principalmente en el área de estructuras.

1.3.2. Técnica.

Esta investigación busca hacer un análisis comparativo donde se verá cuanto más aumenta la permeabilidad en un hormigón convencional frente a uno con adición de un aditivo impermeabilizante.

Donde se usará los diferentes equipos de la universidad como ser el juego de tamices, balanza, horno de secado, recipientes para determinar peso unitario, cono de peso específico y pisón de compactación, mezcladora de hormigón, equipo de sistema de ensayo de permeabilidad del hormigón y otros.

1.3.3. Social.

La investigación se justifica por conocer los beneficios de un producto industrial y comercial impermeabilizante.

El tema de estudio es importante porque aportaremos más conocimiento sobre una solución a problemas en estructuras de almacenamiento de agua, ya que en cambios de temperatura o lluvias puede ocasionar graves daños a la estructura.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Realizar un análisis de la permeabilidad en el hormigón elaborado con un aditivo impermeabilizante, tomando en cuenta cantidades controladas de adición y evaluando los parámetros físico-mecánicos más importantes del hormigón que podrían verse afectados.

1.4.2. Específicos

- Caracterización de materiales que componen un hormigón.

- Caracterización del aditivo impermeabilizante “Sika CEM Impermeable BO” y sus procedimientos normados de aplicación.
- Dosificar de hormigón H-30 r a/c =0.50 con y sin aditivo. Y posterior vaciado de probetas de prueba, con adiciones de 1%,2%,3% y 5% de aditivo en respecto al contenido de cemento.
- Dosificar de hormigón H-35 r a/c=0.45 con y sin aditivo. Y posterior vaciado de probetas de prueba, con adiciones de 1% y 2% de aditivo en respecto al contenido de cemento.
- Determinación de la permeabilidad en probetas de prueba.
- Determinación de la resistencia a compresión en probetas de prueba.
- Análisis comparativo de la permeabilidad en el hormigón elaborado con aditivo impermeabilizante, tomando en cuenta cantidades controladas de adición y los parámetros físico mecánicos más importantes del hormigón.
- Valoración técnica del uso de aditivo impermeabilizante en el hormigón en conclusiones y recomendaciones.

1.5. Alcance de la Propuesta.

1.5.1. General.

La presente investigación se enfocará en el análisis de la permeabilidad del hormigón al incorporar el aditivo impermeabilizante Sika CEM Impermeable BO. Se estudiarán dos tipos de hormigón con diferentes características de relación agua/cemento (a/c) y porcentajes de aditivo, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma EHE-08.

Hormigón H-30: Con una relación agua/cemento (a/c) de hasta 0.50, se evaluará el efecto de diferentes porcentajes de aditivo (1%, 2%, 3% y 5% en relación al peso del cemento) sobre la permeabilidad y resistencia a compresión del hormigón.

Hormigón H-35: Con una relación agua/cemento (a/c) ≤ 0.45, se analizará el impacto de dos porcentajes de aditivo (1% y 2% en relación al peso del cemento) en las mismas propiedades.

El estudio se llevará a cabo mediante la elaboración y prueba de un total de 176 probetas, distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 1.2 Probetas a realizar H-30 relación a/c =0.50.

% de aditivo	Cantidad de probetas por ensayo H-30 relación a/c =0.50.
0%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
1%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
2%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
3%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
5%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.3 Probetas a realizar H-35 relación a/c =0.45.

% de aditivo	Cantidad de probetas por ensayo H-35 relación a/c =0.45.
0%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
1%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.
2%	10 probetas para determinar resistencia a compresión.
	12 probetas para determinar la permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

El propósito de este estudio es evaluar cómo varía la permeabilidad del hormigón y su resistencia a la compresión en función de los porcentajes de aditivo y la relación agua/cemento. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa sobre la eficacia del aditivo impermeabilizante en la mejora de las propiedades del hormigón frente a la penetración de agua.

1.5.2. Hipótesis.

La aplicación del aditivo impermeabilizante “Sika CEM Impermeable” en hormigón, disminuye su permeabilidad hasta en un 30%, tomando en cuenta un 5% como máximo de inclusión del aditivo.

1.5.3. Resultados a Lograr.

- La caracterización de los agregados mediante la norma ASTM C33.
- La dosificación de probetas cilíndricas de hormigón de 15 cm diámetro y 30 cm de altura para el hormigón patrón H-30 r a/c=0.50 y para los porcentajes del 1%,2%,3% y 5% de aditivo.
- La dosificación de probetas cilíndricas de hormigón de 15 cm diámetro y 30 cm de altura para el hormigón patrón H-35 r a/c=0.45 y para los porcentajes del 1% y 2% de aditivo.
- El ensayo de aire ocluido en el hormigón fresco para el hormigón patrón y con adición de aditivo en porcentajes del 1%,2%, 3% y 5%.
- La resistencia a compresión de la probeta patrón H-30 r a/c =0.50 y con adición de aditivo del 1%,2%,3% y 5 % a un periodo de 28 días.
- La resistencia a compresión de la probeta patrón H-35 r a/c =0.45 y con adición de aditivo del 1% y 2% a un periodo de 28 días.
- El ensayo de permeabilidad en probetas de hormigón patrón H-30 r a/c=0.50 y con el aditivo 1%,2%,3% y 5% para un tiempo de 28 días.
- El ensayo de permeabilidad en probetas de hormigón patrón H-35 r a/c=0.45 y con el aditivo 1% y 2% para un tiempo de 28 días.
- Análisis de resultados del ensayo de aire ocluido en el hormigón fresco.
- Análisis de resultados del ensayo a compresión de las probetas de hormigón.
- Análisis de resultados del ensayo de permeabilidad del hormigón con la norma EN 12390 8 – 2019.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción.

En el desarrollo de la investigación se necesitan conocimientos de los materiales para realizar un hormigón estructural.

Conceptos relacionados con el uso del equipo de la permeabilidad y así poder analizar los resultados.

2.2. Generalidades del Hormigón.

2.2.1. Definición.

El hormigón es una masa heterogénea constituida por agregados, cemento Portland, agua, aire y algunas veces aditivos, que una vez que se ha endurecido tiene la característica de resistir esfuerzos mecánicos, en especialmente los de compresión.

2.2.2. Propiedades Generales.

2.2.2.1. Propiedades del Hormigón Fresco.

"El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en él coexisten tres fases: la sólida (áridos y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire ocluido). A su vez, la fase sólida es heterogénea entre sí, ya que sus granos son de naturaleza y dimensión variables.". (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.55).

2.2.2.1.1. Consistencia.

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos, etc.; el que más influye es la cantidad de agua de amasado.

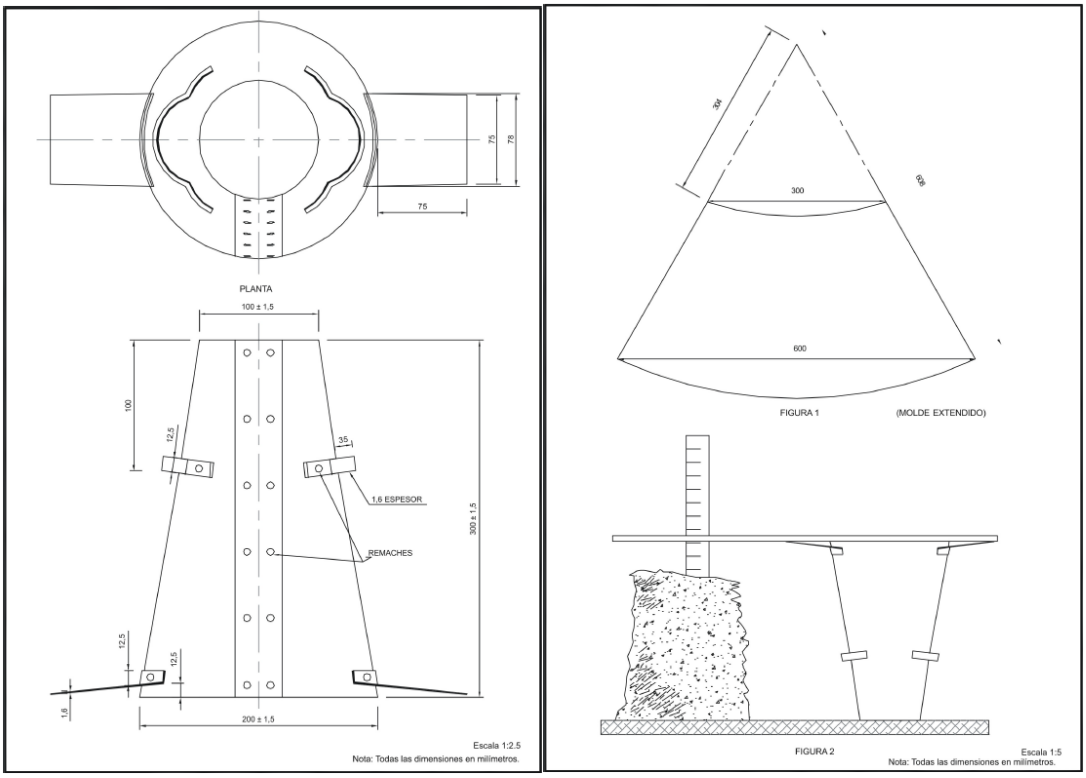
El cono de abrams es un molde troncocónico de 30 cm de altura que se rellena con el hormigón a ensayar. La pérdida de altura experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresando en centímetros, da una medida de su consistencia. (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.55).

Tabla 2.1 Consistencia de hormigones.

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

Fuente: Libro de hormigón armado Jiménez Montoya.

Figura 2.1 Método del cono de abrams.



Fuente: Manuales técnicos para el diseño de carreteras.

2.2.2.1.2. Trabajabilidad.

"La trabajabilidad del hormigón se define como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad mezclada de hormigón fresco con una perdida mínima de homogeneidad." (ASTM C125).

2.2.2.1.3. 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 (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) o por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida). (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.56).

2.2.2.2. Propiedades del Hormigón Endurecido.

Las propiedades del hormigón endurecido dependen del peso específico, la compacidad y la permeabilidad.

2.2.2.2.1. Resistencia Mecánica.

Los ensayos principales sobre el hormigón endurecido son los correspondientes a sus resistencias mecánicas, de los que se trata en este apartado. Los métodos de ensayo que se describen a continuación, tienen por objeto obtener las resistencias del hormigón a compresión, a flexotracción y a tracción indirecta, mediante la rotura de probetas fabricadas y conservadas en condiciones normalizadas.

- La forma y dimensiones de las probetas de ensayo deben ser las siguientes: cubos de arista a; cilindros de diámetro a y altura 2a; prismas de arista a y longitud 4a o 5a. La arista a ha de ser mayor que tres veces el tamaño máximo del árido, debiéndose adoptar la serie de valores a = 10, 15, 20, 25 y 30 cm, preferentemente a = 15 cm en el caso de probetas cilíndricas.

- Los moldes de las probetas deben ser rígidos y no absorbentes. Sus caras planas tendrán una tolerancia de ± 0,05 mm y sus ángulos rectos no tendrán variaciones superiores a ± 0,5o. Los moldes deben ser estancos, siendo conveniente untarlos con aceite mineral o cualquier otra sustancia apropiada que no ataque al cemento, con objeto de evitar la adherencia del hormigón.
- La barra de picado del hormigón debe ser rectilínea, de acero, de 16 mm de diámetro y longitud de 60 cm. En sus 25 mm finales será troncocónica y estará rematada en su extremo por un casquete esférico de 6 mm de radio. Está demostrado que, si se emplea una barra recta con su extremo cortado sin redondear, la probeta presenta una resistencia menor.

(Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.73).

2.2.2.2.2. Permeabilidad.

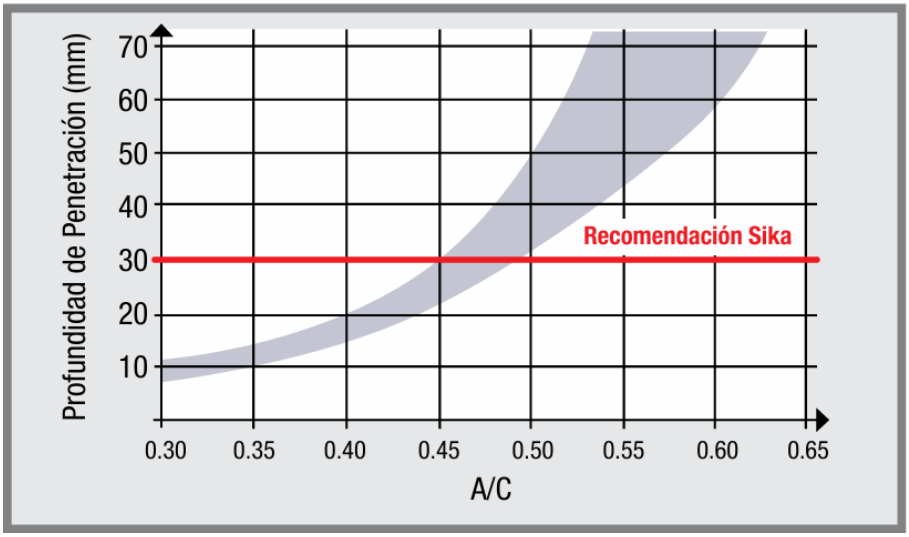
Medir la permeabilidad de un hormigón es un problema difícil que no se ha resuelto satisfactoriamente. Existen diversos métodos, unos dedicados a la permeabilidad bajo presión y otros a la permeabilidad por succión (absorción). Las medidas se efectúan por diferencia de pesada, o por el tiempo requerido para que el agua atraviese de una cara a otra, o por medición de superficie de mancha en una sección obtenida por corte, etc. Pero ningún método proporciona garantía completa, siendo incierta la concordancia entre medidas realizadas según distintos métodos sobre un mismo hormigón. (Álvaro García Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.57).

Tabla 2.2 Profundidad de penetración.

Tipo de hormigón.	**Especificación para la profundidad máxima.**	**Especificaciones para la profundidad media.**
Hormigón en masa o armados.	50 mm	30 mm
Elementos pretensados.	30 mm	20 mm

Fuente: Norma EHE-08 art.37.3.3 (Impermeabilidad del hormigón).

Figura 2.2 Profundidad de penetración vs relación A/C.



Fuente: Sika informaciones técnicas concreto impermeable.

2.2.3. Materiales Componentes del Hormigón.

2.2.3.1. Materiales Cementantes.

Los cementos hidráulicos o resistentes al agua, consisten esencialmente en cemento portland y sus diversas modificaciones.

Se define al cemento portland como cemento hidráulico producido al pulverizar Clinker que consisten esencialmente en silicatos de calcio hidráulico, generalmente que contienen una o más de las formas de sulfato de calcio como una adición en la intermolienda. (ASTM C 150).

2.2.3.2. Tipos del Material o Clasificación de los Agregados.

Como áridos para la confección de hormigones pueden emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exijan al hormigón.

Desde el punto de vista de durabilidad en medios agresivos, deben preferirse los áridos de tipo silíceo (gravas y arenas de río o cantera) y los que provienen de machaqueo de rocas volcánicas (basalto, andesita, etc.) o de calizas sólidas y densas. Las rocas sedimentarias en general (calizas, dolomitas, etc.) y las volcánicas sueltas (pómez,

toba, etc.) deben ser objeto de análisis previo. No deben emplearse áridos que provengan de calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas friables ni porosas. Tampoco deben emplearse áridos que contengan sulfuros oxidables (estos áridos pueden provenir de canteras que presentan vetas de pirrotina, marcasita o ciertas formas de pirita), dado el gran riesgo existente de que tales sulfuros se oxiden a largo plazo, lo que entraña un gran aumento de volumen y la consiguiente fisuración y cuarteamiento del hormigón.

Se denomina grava o árido grueso a la fracción mayor de 5 mm, y arena o árido fino, a la menor de 5 mm. Aparte, es clásico encontrar en cada país y región denominaciones diversas más específicas para la grava, en función del tamaño de las piedras. La arena suele dividirse, a partir de los 2 mm, en arena gruesa y arena fina, llamándose polvo o finos de la arena a la fracción inferior a 0,063 mm. (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran C. & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.25).

2.2.4. Aditivo Impermeabilizante SIKA-CEM Impermeable.

Es un aditivo impermeabilizante y plastificante especialmente indicado para elaborar morteros y hormigones de baja permeabilidad y mayor durabilidad. Actúa como bloqueador de poros.

No contiene cloruro, no es tóxico y no es inflamable.

USOS:

Sika CEM® – Impermeable BO es recomendable para:

- Hormigón altamente impermeable para ser usado en canales, diques, estructuras de fundación, vigas, cisternas, piscinas, sótanos, tanques de agua, cimentaciones, muros, jardineras, etc.
- Cualquier tipo de estructura, cuando se desee impermeabilizar la misma.
- Hormigón de calidad para estructuras enterradas en contacto permanente con el agua.
- Hormigón con excelente acabado y calidad uniforme.
- Fácil aplicación.

VENTAJAS:

- Aumenta la durabilidad y resistencia del H° y mortero en contacto con agua.
- No varía el tiempo de fraguado.
- Extiende manejabilidad de la mezcla, facilitando colocación y vibrado del H°.
- Gran acción impermeabilizante.
- Disminuye la porosidad del hormigón y mortero.
- Aumenta la trabajabilidad de la mezcla.
- Mayor utilización de encofrados.
- Compatible con otros aditivos Sika.

2.2.5. Patologías Estructurales por Filtración.

La filtración de agua es la forma más habitual de producción de daños a causa de humedades. Esta es debida habitualmente a la falta de una adecuada impermeabilización. Se puede dar en muros que mantienen el contacto con el terreno como en: Cubiertas, Juntas de dilatación, En azoteas, Cualquier zona en la que se dé la unión de distintos elementos, etc.

Los daños más habituales producidos por filtración son:

- Desconchados o caída de material en cubiertas, por infiltración de agua en terrazas y tejados.
- Grietas y fisuras en cubiertas, tejados o muros de sótanos.
- Roturas de tuberías y descalce de la de la cimentación que dan paso a fisuras y grietas en la misma.

En definitiva, los daños estructurales por humedades en edificios son uno de los problemas más habituales que afectan tanto a la seguridad como a la estética y habitabilidad de los mismos. Los daños pueden llegar a ser graves y poner en peligro la seguridad del edificio por lo que la actuación temprana es fundamental en este tipo de procesos patológicos estructurales.

https://ingenierosasesores.com/actualidad/danos-estructurales-por-humedades/

2.2.6. Clase de Exposición en el Hormigón.

Tabla 2.3 Clases de exposición relativas a la corrosión.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
no agresiva		I	Ninguno	- interiores de edificios, no sometidos a condensaciones - elementos de hormigón en masa	- elementos estructurales de edificios, incluido los forjados, que estén protegidos de la intemperie
Normal	Humedad alta	IIa	corrosión de origen diferente de los cloruros	- interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones - exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm - elementos enterrados o sumergidos	- elementos estructurales en sótanos no ventilados - cimentaciones - estribos, pilas y tableros de puentes en zonas, sin impermeabilizar con precipitación media anual superior a 600 mm - Tableros de puentes impermeabilizados, en zonas con sales de deshielo y precipitación media anual superior a 600 mm - elementos de hormigón, que se encuentren a la intemperie o en las cubiertas de edificios en zonas con precipitación media anual superior a 600mm - Forjados en cámara sanitaria, o en interiores en cocinas y baños, o en cubierta no protegida
	Humedad media	IIb	corrosión de origen diferente de los cloruros	- exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm	- elementos estructurales en construcciones exteriores protegidas de la lluvia - tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm
Marina	Aérea	IIIa	corrosión por cloruros	- elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar - elemento exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km)	- elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa - puentes en las proximidades de la costa - zonas aéreas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral - instalaciones portuarias
	Sumergida	IIIb	corrosión por cloruros	- elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar	- zonas sumergidas de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral - cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar
	en zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	corrosión por cloruros	- elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas	- zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral - zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea
con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	corrosión por cloruros	- instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino - superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	- piscinas e interiores de los edificios que las albergan. - pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve - estaciones de tratamiento de agua.

Fuente: Norma EHE -08 art 8.2.3.

Tabla 2.4 Clases de exposición relativas a otros procesos distintos a la corrosión.

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Química Agresiva	Débil	Qa	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según tabla 8.2.3.b - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según tabla 8.2.3.b
	media	Qb	ataque químico	- elementos en contacto con agua de mar - elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver tabla 8.2.3.b)	- dolos, bloques y otros elementos para diques - estructuras marinas, en general - instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según tabla 8.2.3b - instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media según tabla 8.2.3.b
	Fuerte	Qc	ataque químico	- elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida (ver tabla 8.2.3.b)	- instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b - instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con tabla 8.2.3.b. - construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad fuerte según tabla 8.2.3b
con heladas	sin sales fundentes	H	ataque hielo-deshielo	- elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental eninvierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5ºC	- construcciones en zonas de alta montaña. - estaciones invernales
	con sales fundentes	F	ataque por sales fundentes	- elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0ºC	- tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña, en las que se utilizan sales fundentes.
Erosión		E	abrasión cavitación	- elementos sometidos a desgaste superficial - elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua	- pilas de puente en cauces muy torrenciales - elementos de diques, pantalanes y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes - pavimentos de hormigón - tuberías de alta presión

Fuente: Norma EHE -08 art 8.2.3.

2.3. Normativas a Utilizar en el Procedimiento Experimental.

La ejecución de procedimientos experimentales en un laboratorio requiere normativas específicas, las cuales son esenciales para asegurar la eficacia de los resultados obtenidos. A continuación, se presenta un compendio de las normas más relevantes que deben considerarse:

2.3.1. Normas Utilizadas en la Investigación.

En la siguiente tabla se verá los ensayos y normas utilizadas en la investigación desde la elaboración hasta el ensayado de las probetas de hormigón.

Tabla 2.5 Normas en ensayos realizados.

Ensayos realizados	**Normas de los ensayos**
Límites de la curva granulométrica.	ASTM C33.
Granulometría de los agregados.	ASTM C136.
Peso unitario de los agregados.	ASTM C29.
Peso específico y absorción de agua de los áridos gruesos.	ASTM C127.
Peso específico y absorción de agua de los áridos finos.	ASTM C128.
Resistencia promedió requerida a la compresión.	EHE -08.
Proporción de mezclas hormigón.	EHE-08.
Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de H°.	ASTM C192.
Contenido de aire ocluido.	ASTM C231.
Método para determinar la docilidad mediante el cono de Abrams.	ASTM C143.
Profundidad de penetración del agua bajo presión.	EN 12390 8 – 2019.

Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Normativas de la Caracterización de Materiales.

2.3.2.1. Granulometría (ASTM C136).

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos.

Tabla 2.6 Tamaño de la muestra de ensaye de árido grueso.

Absoluto Tamaño máximo Da(mm)	**Masa mínima de la muestra (Kg)**
75	32
63	25
50	20
37.5	16
25.0	10
19	8
12.5	5
9.5	4

Fuente: Norma ASTM C136.

Tabla 2.7 Tamaño de la muestra de ensaye del árido fino.

Tamiz	**% Retenido**	**Masa mínima de la muestra (gr)**
4.75 mm	≤ 5 %	500
2.36 mm	≤ 5%	100

Fuente: Norma ASTM C136.

La granulometría del agregado grueso debe encontrarse dentro de los limites especificados en la siguiente tabla, para cualquiera de los tamaños nominales.

Tabla 2.8 Rango de aberturas usados en la granulometría del agregado grueso.

Numero de Tamaño	Tamaño Nominal (Tamices con abertura cuadrada)	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (abertura cuadrada),% en masa												
		100 mm (4plg)	90 mm (3 1/2 pulg)	75 mm (3 pulg)	63 mm (2 1/2 pulg)	50 mm (2 pulg)	37.5 mm (1 1/2 pulg)	25 mm (1pulg)	19 mm (3/4 pulg)	12.5 mm (1/2 pulg)	9.5 mm (3/8 pulg)	4.75mm (N°4)	2.36mm (N°8)	1,18mm (N°16)
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2	63 a 37.5 mm	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
3	50 a 25 mm	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
357	50 a 4.75 mm	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
4	37.5 a 19 mm	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
467	37.5 a 4.75 mr	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
5	25 a 12.5 mm	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-
56	25 a 9.5 mm	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
57	25 a 4.75 mm	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
6	19 a 9.5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
67	19 a 4.75 mm	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
7	12.5 a 4.75 mr	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
8	9.5 a 2.36 mm	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 5	0 a 5

Fuente: Norma ASTM C33.

La granulometría del agregado fino debe encontrarse dentro de los limites especificados en la siguiente tabla:

Tabla 2.9 Rango de aberturas usadas para la granulometría del agregado fino.

Tamiz	**Porcentaje que pasa, %**
9.5mm (3/8 plg).	100
4.75mm(N°4).	95 a 100
2.36mm(N°8)	80 a 100
1.18mm(N°16)	50 a 85
600µm(N°30)	25 a 60
300µm(N°50)	5 a 30
150µm(N°100)	0 a 10

Fuente: Norma ASTM C33.

2.3.2.2. Peso Unitario (ASTM C29).

Este método establece el procedimiento para determinar el peso específico suelto y compactado de los agregados, lo que nos ayudara en la elaboración de hormigones.

2.3.2.3. Peso Específico y Absorción de Agua del Árido Grueso (ASTM C127).

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos.

2.3.2.4. Peso Específico y Absorción de Agua del Árido Fino (ASTM C128).

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos.

2.3.2.5. Dosificación del Hormigón.

A pesar de que la relación agua/cemento es el factor que más influye en la resistencia del hormigón, no pueden darse valores fijos que relacionen ambas magnitudes porque dependen, además, de otros muchos factores.

En la tabla se incluyen unos valores orientativos de la relación agua/cemento, que no deben superarse, en función de la resistencia del hormigón, del tipo de árido y de la clase de cemento, para unas condiciones de ejecución suficientemente buenas.

La relación agua/cemento debe ser tan baja como sea posible, pero teniendo en cuenta que debe permitir una adecuada trabajabilidad y compactación del hormigón y que debe evitarse, además, el fenómeno de segregación de los áridos gruesos. A veces, para conseguir estas características, es necesario utilizar mayor cantidad de cemento de la estrictamente necesaria, o emplear aditivos adecuados.

Conviene recordar que la resistencia característica, fck, que se consigue en obra es obviamente menor que la resistencia media, fcm, obtenida en los ensayos de laboratorio. (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.37).

Tabla 2.10 Valores orientativos máximos de la relación agua/cemento en función de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días.

Resistencia del hormigón (N/mm²)		*Áridos rodados* [1]		*Áridos machacados* [1]	
característica f_{ck}	media f_{cm}	CEM-I/32,5	CEM-I/42,5	CEM-I/32,5	CEM-I/42,5
20	28	0,55	0,6	0,65	–
25	33	0,5	0,55	0,6	0,65
30	39	0,45	0,5	0,55	0,6
35	44	0,4	0,45	0,5	0,55
40	50	–	0,4	0,45	0,5

Fuente: Libro Hormigón Armado de Jiménez Montoya (Pag 37).

2.3.2.6. Ensayo de Absorción del Hormigón ASTM C1585.

A partir de una probeta con un diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm, se marcará la zona central. Luego seleccionaran los discos centrales, ubicados a 50 mm tanto hacia arriba como hacia abajo, ya que estos representan la parte optima de la muestra.

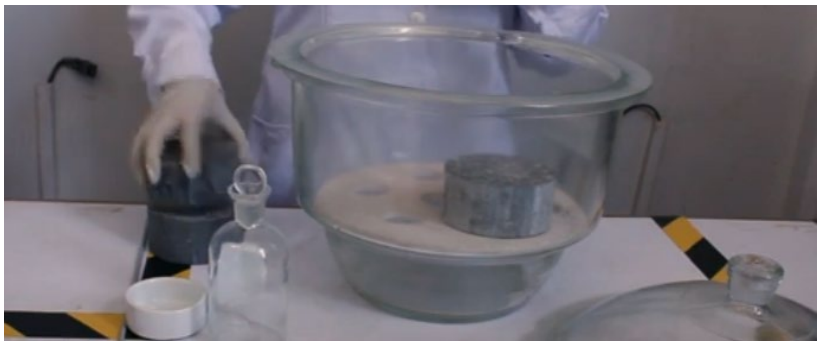
Figura 2.3 Preparación de los discos de hormigón.

Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=_BABE6xL1wQ.

Los discos se introducirán en una cámara de vacío, donde una bomba de aire extraerá todo el aire existente dentro del recipiente herméticamente cerrado. El objetico es igualar la presión interna con la presión atmosférica. Este proceso de desgasificación durara 3 horas, durante las cuales la muestra eliminara cualquier burbuja de aire que contenga.

Dentro de un desecador, combinaremos 20 gr de bromuro de potasio con 25 gr de agua destilada. Luego, seguidamente agitaremos uniformemente para obtener una solución saturada de bromuro de potasio que controlara una humedad relativa del 80%. Posteriormente, colocaremos en el centro del desecador una base agujerada. Esta base evitará el contacto directo con la solución, pero permitirá una purificación más efectiva de los poros en nuestras muestras.

Figura 2.4 Discos de hormigón dentro de un desecador.

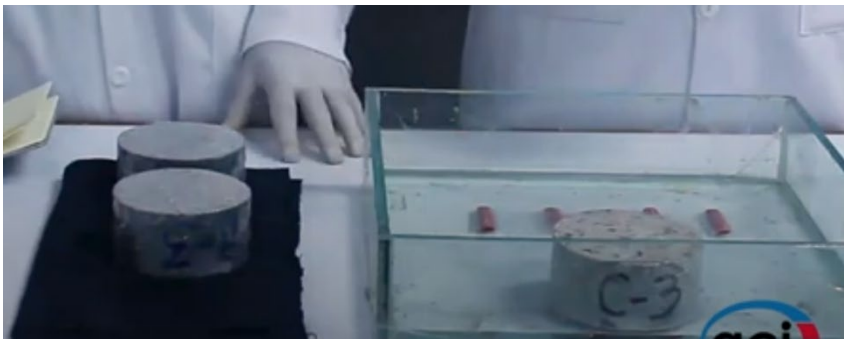


Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=_BABE6xL1wQ

Una vez completado el paso anterior, colocaremos el desecador inmediatamente dentro de una estufa y programaremos la temperatura a 50 °C, dejándola reposar allí durante el periodo de 3 días. Posteriormente, retiraremos el desecador de la estufa colocaremos las probetas dentro de bolsas herméticas, donde reposaran a temperatura ambiente durante un periodo de 15 días. Al cumplirse el tiempo establecido, retiramos las probetas de las bolsas herméticas para proceder a recubrir con cinta de embalaje toda la probeta, excepto la cara que estará expuesta al agua durante el ensayo. Este recubrimiento tiene como objeto evitar la pérdida de masa por evaporación del agua absorbida por la probeta durante el ensayo. Finalmente, pesaremos cada una de las probetas en análisis.

Esta información es crucial ya que servirá como punto de comparación con los otros pesos obtenidos durante el ensayo.

Figura 2.5 Discos de hormigón sometidos al ensayo de absorción.



Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=_BABE6xL1wQ.

Siguiendo con el procedimiento en un recipiente de vidrio colocaremos unos tarugos fijos para tener una mejor visualización del ensayo. Añadiremos suficiente agua para que la probeta se humedezca una altura de 2 mm. Luego, colocamos la probeta dentro del recipiente con agua y controlamos inmediatamente durante 1 minuto. después de eso pesaremos colocando la cara húmeda en la parte superior. Este proceso se repetirá para todas las probetas en análisis, respetando los tiempos establecidos. (norma ASTM C 1585).

Tabla 2.11 Tiempos establecidos para el ensayo de absorción hormigón.

Tiempos Establecidos para el Ensayo de Absorción H°			
1 MINUTO	60 MINUTOS	6 HORAS	5 DIAS
5 MINUTOS	2 HORAS	1 DIA	6 DIAS
10 MINUTOS	3 HORAS	2 DIAS	7 DIAS
20 MINUTOS	4 HORAS	3 DIAS	8 DIAS
30 MINUTOS	5 HORAS	4 DIAS	

Fuente: Norma ASTM C 1585.

2.3.3. Permeabilidad del Hormigón.

La propiedad más influyente es, sin duda, la relación agua/cemento.

Al disminuir ésta, disminuye la permeabilidad: mientras que para una relación agua/cemento igual a 0,5 el factor de permeabilidad es aproximadamente 15, para 0,8 es alrededor de 450, o sea, treinta veces mayor (Alvaro Garcia Meseguer & Francisco Moran Cabre & Juan Carlos Arroyo Portero 2009 P.57).

2.3.3.1. Manual del Equipo de Permeabilidad del Hormigón.

Este instrumento se utiliza para determinar la profundidad de penetración del agua bajo presión en una muestra de hormigón.

Hasta 6 muestras se someten simultáneamente a la penetración de agua a presión en su cara inferior.

La cantidad de agua penetrada también se puede medir a través de las buretas graduadas instaladas en la parte superior del aparato.

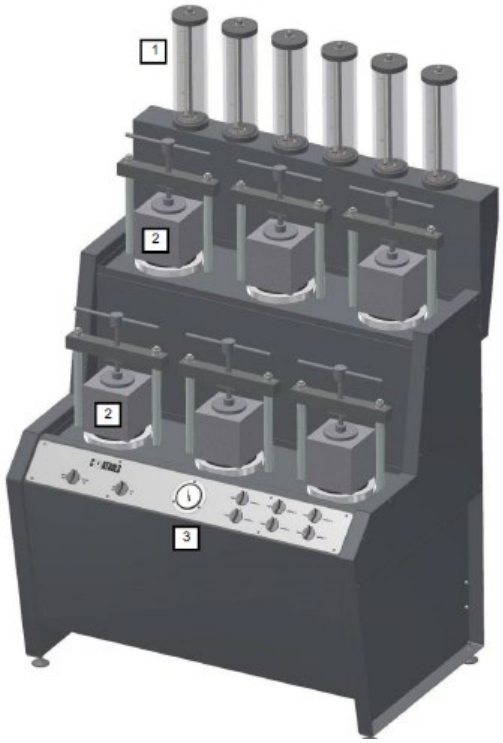
El aparato consta de una robusta estructura de acero con sistema de sujeción, que incorpora el circuito hidráulico, válvulas, manómetros para comprobar la presión del agua y buretas trasparente de medición montadas en la parte superior del aparato.

El manual del equipo está en el (anexo 9).

Preparación de las probetas:

- La muestra debe ser cubica, cilíndrica o prismática con una dimensión mínima de la superficie de la muestra a ensayar no inferior a 150 mm y ninguna dimensión inferior a 100 mm.
- La edad de probetas para ser ensayada debe ser mayor de 28 días y menor de 1 año ya que superior a esta fecha el valor de la penetración del agua ya no es consistente.
- Previo 24 horas antes del ensayo se hará el desecado de las probetas a una temperatura de 50 ± 5 °C y se dejará enfriar a temperatura ambiente.
- Se hará rugosa la cara del ensayo por cepillado o repicado.
- La muestra se aplicará a una presión de 0.5 ± 0.05 MPa durante un tiempo de 72 ± 2 hr. Durante la prueba se observará periódicamente la apariencia de la superficie de la muestra de prueba no expuesta a presión del agua para notar la presencia de agua. Si se observa una fuga, considere la validez del resultado y registre el hecho.
- Al final de un periodo de 72 ± 2 hr, la muestra se divide en dos utilizando un dispositivo de tracción indirecta.
- Donde se examinarán las caras de la muestra rota serán examinadas, se dibujará el perfil de penetración del agua y se registra la profundidad máxima de penetración.

Figura 2.6 Equipo de permeabilidad del hormigón.



Fuente: manual de permeabilidad del hormigón marca controls.

2.4. Análisis Estadístico.

2.4.1. Proceso Estocástico.

Un proceso estocástico es un conjunto de variables aleatorias que depende de un parámetro o de un argumento. En el análisis de series temporales, ese parámetro es el tiempo. Formalmente, se define como una familia de variables aleatorias Y indiciadas por el tiempo, t. Tales que, para cada valor de t, Y tiene una distribución de probabilidad dada.

Tipos de procesos estocásticos.

Existen dos tipos de procesos estocásticos. La diferencia entre los mismos, tiene que ver con predictibilidad de una serie temporal:

- Procesos estocásticos estacionarios: Tiene una serie de características que lo hacen, en cierta manera, predecible.
- Procesos estocásticos no estacionarios: En términos generales, sería impredecible.

2.4.2.1. Procesos Estocásticos no Estacionarios.

Un proceso estocástico no estacionario es aquel cuya distribución de probabilidad varía de forma no constante. Dicho de otra forma, si una serie de números se comporta de forma totalmente caótica, podríamos decir que es aleatorio no estacionario. José Francisco López (1 marzo 2020) Proceso estocástico. https://economipedia.com/definiciones/proceso-estocastico.html.

2.4.3. Método por Distribución T DE STUDENT.

Si $\overline{X}$ es la media de una muestra grande de tamaño n de una población con media μ y varianza σ^2 , entonces el teorema del límite central especifica que $\overline{X} \sim N(\mu, \sigma^2/n)$. La cantidad $(\overline{X}-\mu) /(\sigma/\sqrt{n})$ tiene una distribución normal con media 0 y varianza 1. Además, la desviación estándar muestral s estará cerca de la desviación estándar s poblacional. Por esta razón la cantidad $(\overline{X}-\mu) /(s/\sqrt{n})$ es aproximadamente normal con media 0 y varianza 1, por lo que se pueden buscar las probabilidades relacionadas con esta cantidad en la tabla normal estándar (tabla z). Esto último permite que se calcule intervalos de confianza para diferentes niveles para la media poblacional μ.

¿Qué se puede hacer si $\overline{X}$ es la media de una muestra pequeña? Si éste es pequeño, podría no estar cercano a σ, y $\overline{X}$ puede no ser aproximadamente normal. Si no se sabe nada acerca de la población de la que la muestra pequeña fue extraída, entonces no hay ningún método fácil para calcular intervalos de confianza. Sin embargo, si la población es aproximadamente normal, $\overline{X}$– lo será incluso cuando el tamaño muestral sea pequeño. Lo anterior propicia que aún se puede utilizar la cantidad $(\overline{X} -\mu) / (s/ n)$, pero debido a que s no está necesariamente cercana a s, esta cantidad no tendrá una distribución normal. En su lugar, tiene la distribución T DE STUDENT con n - 1 grados

de libertad, que se denota por $t_n - 1$. El número de grados de libertad para la distribución t es uno menos que el tamaño muestral.

La distribución T DE STUDENT fue descubierta en 1908 por William Sealy Gossett, un estadístico que trabajó en la cervecera Guinness, en Dublín, Irlanda. La dirección de Guinness consideró que el descubrimiento era información privada y prohibió a Gossett que lo publicara. Aun así, él lo publicó, usando el seudónimo "Estudiante". Gossett había hecho ya esto antes.

Resumen.

Sea $X_1, \ldots, X_n$ una muestra pequeña (por ejemplo, n < 30) de una población normal con media. Entonces la cantidad tiene una distribución T DE STUDENT con n - 1 grados de libertad, denotada por $t_n - 1$.

$$\frac{\overline{X} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \qquad \ldots (2.1)$$

Donde: $\overline{X}$=Media de la muestra.
μ=Media poblacional .
s=Desviación estándar.
n=Tamaño de la muestra.

Cuando n es grande, la distribución de la cantidad $(\overline{X} - \mu) / (s/\sqrt{n})$ es muy cercana a la curva normal, de esta forma la curva normal puede usarse en lugar de la T DE STUDENT. (William Navidi 2006 P.321).

2.4.3.1. Intervalos de Confianza para la Diferencia entre dos Medias con Pequeñas Muestras.

La distribución T DE STUDENT se puede utilizar en algunos casos donde ambos tamaños muestrales son pequeños, por lo que no es aplicable el teorema del límite

central. Si ambas poblaciones son normales, la distribución T DE STUDENT se puede utilizar para calcular un intervalo de confianza para la diferencia entre las dos medias poblacionales.

El método es similar al que se presenta en la sección 5.4 para el caso donde las muestras son grandes, excepto que el puntaje z se sustituye con un valor de la distribución T DE STUDENT.

El número de grados de libertad a usar para esta distribución está dado por:

$$v = \frac{\left(\frac{s_x^2}{n_x} + \frac{s_Y^2}{n_Y}\right)^2}{\frac{(s_x^2/n_x)^2}{n_x - 1} + \frac{(s_Y^2/n_Y)^2}{n_Y - 1}} \quad \ldots (2.2)$$

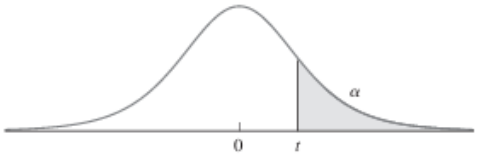
Donde: ν = Grados de libertad

s_x^2 y s_y^2 = Varianzas de las muestras

nx y ny = Tamaños de las muestras

De la tabla t se encuentra que t. Se utiliza la expresión para encontrar que el intervalo de confianza. (William Navidi 2006 P.321).

Tabla 2.12 Puntos porcentuales superiores para la distribución T DE STUDENT.



	α								
ν	0.40	0.25	0.10	0.05	0.025	0.01	0.005	0.001	0.0005
1	0.325	1.000	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309	636.619
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327	31.599
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485	3.768
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435	3.707
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396	3.659
30	0.256	0.683	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385	3.646
35	0.255	0.682	1.306	1.690	2.030	2.438	2.724	3.340	3.591
40	0.255	0.681	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307	3.551
60	0.254	0.679	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.232	3.460
120	0.254	0.677	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617	3.160	3.373
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090	3.291

Fuente: Libro de estadística para ingenieros y científicos William Navidi.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Características de los Materiales Componentes.

3.1.1. Criterios de Selección de Banco de Materiales.

Se llevo a cabo un muestreo de los diferentes bancos de materiales situados en la ciudad de Tarija.

Para la investigación, se seleccionaron los agregados provenientes de la planta trituradora los cuales, según los ensayos de laboratorio realizados cumplen con las especificaciones establecidas por las normas ASTM.

Figura 3.1 Zona de muestreo chancadora.

Fuente: Elaboración propia.

La planta de acopio de agregados de la chancadora está situada en la carretera bermejo, frente a cruce con Ancón Grande.

El agregado grueso está constituido por gravilla chancada con un tamaño máximo nominal de 3/4 pulgada, mientras que el agregado fino está formado por arena chancada.

Figura 3.2 Obtención de la muestra del Agregados.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Criterios de Selección del Cemento Hidráulico.

El cemento que se utilizó para la investigación fue el que se usa más en nuestro medio, el Cemento El Puente IP30, donde es de producción nacional que cumple con las especificaciones de la NB y la ABC; La fábrica del cemento se encuentra en el departamento de Tarija, Bolivia.

Figura 3.3 Fábrica de cemento el puente.

Fuente: Soboce .com.

3.1.3. Criterios de Selección del Aditivo Impermeabilizante.

Para la investigación se seleccionó el aditivo Sika CEM impermeable BO debido a sus destacadas propiedades impermeabilizante y plastificante. Este aditivo es ampliamente utilizado en Bolivia y especialmente formulado para la elaboración de morteros y hormigones de baja permeabilidad y alta durabilidad.

Entre sus características, no contiene cloruro, no es toxico y no es inflamable.

USOS:

- Hormigón altamente impermeable para ser usado en canales, diques, estructuras de fundación, vigas, cisternas, piscinas, sótanos, tanques de agua, cimentaciones, muros, jardineras, etc.
- Cualquier tipo de estructura, cuando se desee impermeabilizar la misma.
- Hormigón para estructuras enterradas, contacto permanente con agua.
- Hormigón con excelente acabado y calidad uniforme.

VENTAJAS:

- Aumenta durabilidad y resistencia del H° y mortero en contacto con agua.
- No varía el tiempo de fraguado.
- Extiende manejabilidad de la mezcla, facilitando colocación y vibrado del H°.
- Gran acción impermeabilizante.
- Disminuye la porosidad del hormigón y mortero.
- Aumenta la trabajabilidad de la mezcla.

ALMACENAMIENTO:

- Mantener en sitio fresco y bajo techo, conservando el producto en el envase original bien cerrado.

TIEMPO DE VIDA ÚTIL:

- 12 meses desde la fecha de fabricación.

PRESENTACIÓN:

- Botella 1kg.
- Bidón 5 kg.
- Tineta 20 kg.
- Tambor 200kg.

CONSUMO/DOSIS:

- Dosis entre 2% a 3% referido al peso de cemento (1kg a 1.5kg por bolsa de cemento de 50 kg).

MÉTODO DE APLICACIÓN:

- Sikacem-impermeable BO viene listo para usar, agregándose al agua de mezcla.
- Mezclar los materiales componentes del hormigón o mortero con parte del agua de mezclado, incorpore el contenido del sikacem-impermeable BO al pastón y complete con la menor cantidad de agua hasta lograr la fluidez requerida.
- Para asegurar la homogeneidad del hormigón o mortero se recomienda mezclar durante 3 minutos adicionales luego de incorporar todos los materiales componentes a la mezcladora.
- Para mejorar el desempeño de morteros y hormigones se recomienda mantener la dosificación y proporción de los materiales componentes.
- Cuidar que se cumplan las correctas condiciones de elaboración, colocación, compactación y curado.
- El desempeño de los aditivos puede variar si se modifican los materiales componentes o sus cantidades.

PRECAUCIONES Y LIMITACIONES:

- Sikacem-impermeable BO exige la aplicación de las normas conocidas para la elaboración del hormigón. Para elaborar un hormigón impermeable importante:
- Trabajar con una granulometría correcta, observar especialmente el contenido suficiente de finos.
- Utilizar la suficiente cantidad de cemento.

- Realizar un completo mezclado, consolidación y curado del hormigón.
- Evitar grietas.
- Tratar las juntas frías con materiales o métodos adecuados.

Adicionalmente, se consideran otros aditivos de la línea de productos, como el Sika WT-100 y el Sika WT-240 P, que ofrecen resultados superiores, aunque a un costo mayor:

SIKA WT-100

DESCRIPCION DEL PRODUCTO:

Sika WT-100 es un aditivo liquido diseñado para impermeabilizar el hormigón, reduciendo su impermeabilidad y absorción de agua.

USOS:

Sika WT-100 está especialmente formulado para producir hormigón impermeable de alta calidad. El hormigón tratado con Sika WT 100 forma parte del sistema de impermeabilización de hormigón Sika. Se utiliza principalmente en las siguientes aplicaciones: cimentaciones, estacionamientos, plantas industriales, túneles, piscinas, estructuras contenedoras de agua, presas (diques), estructuras de plantas de tratamiento de agua servidas y partes subterráneas de edificios comerciales.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS:

- Reduce la absorción de agua
- Reduce la penetración de agua bajo presión.

INFORMACION TECNICA:

Guía de hormigonado:

Para asegurar la calidad del hormigón al utilizar Sika® WT-100, es esencial seguir las normas y reglas generales de preparación. Es imprescindible realizar pruebas de laboratorio antes del hormigonado en el sitio, especialmente cuando se emplea un nuevo diseño de mezcla o nuevos componentes.

El uso de aditivos no exime de la necesidad de un adecuado curado del hormigón. Al contrario, los mejores resultados se obtienen siguiendo todas las medidas de curado necesarias.

Diseño de mezcla de hormigón:

Para hormigón impermeable. -El diseño de la mezcla de hormigón dependerá de los requerimientos locales y/o reglamentos locales para los sistemas de hormigón impermeable.

Para hormigón impermeable Sika. - Sika WT-100 ha sido formulado para ser usado en hormigones con un contenido mínimo de cementante de 350 kg/m3 y una máxima relación a/c de 0.45.

Ensayos. – Se recomienda siempre realizar ensayos de laboratorio para evaluar y confirmar la trabajabilidad real del hormigón.

INFORMACION DE APLICACIÓN:

Dosificación recomendada. – 1 - 3% de Sika WT -100 por peso del cemento.

La dosis exacta debe determinarse mediante ensayos previos con los materiales a utilizar en la obra.

SIKA WT -240 P (Aditivo impermeabilizante por cristalización para H° y mortero)

DESCRIPCION:

Sika WT-240 P es un aditivo en polvo hidrofílico que impermeabiliza por cristalización, reduciendo la permeabilidad del hormigón o mortero y promoviendo la capacidad de autosellado de micro fisuras.

USOS:

Sika WT-240 P está formulado específicamente para producir hormigón de alta calidad con baja permeabilidad.

Este aditivo puede emplearse en cualquier estructura impermeable, tanto subterránea como en superficie o sobre el nivel del suelo, incluyendo:

Cimentaciones, estacionamientos, plantas de servicio, túneles, puentes, piscinas, tanques de agua, represas, embalses, estructuras de tratamiento de aguas servidas, instalaciones comerciales subterráneas (centros comerciales, estacionamientos, estaciones de metro), estructuras de contención secundaria, pozos de elevador, sótanos, parques acuáticos y garajes subterráneos.

CARACTERISTICAS/VENTAJAS:

Sika WT -240 P es un aditivo reductor de permeabilidad de base cristalina añadido a la planta. Sika WT 240 P usa una combinación única de ingredientes activos, estos materiales activos forman materiales insolubles a través de la estructura de poros y capilares del hormigón y sellan el hormigón permanentemente contra la penetración de agua y otros líquidos.

Adicionalmente la fórmula especial y los ingredientes de Sika WT 240 P promueven las propiedades de autosellado del hormigón y mejoran su habilidad para sellar fisuras. Estos materiales activos forman materiales insolubles a través de la estructura de poros y capilares del hormigón y sellan el hormigón permanentemente contra la penetración de agua y otros líquidos. Adicionalmente la formula especial y los ingredientes de Sika WT-240 P promueven las propiedades de autosellado del hormigón y mejoran su habilidad para sellar fisuras, lo que resulta en una capacidad reducida del hormigón para conducir el flujo del agua.

El uso de Sika WT- 240 P en una aplicación de hormigón puede resultar en:

Menor costo de construcción en comparación con los tipos tradicionales de impermeabilización.

El uso simple en un solo paso reduce el tiempo de aplicación y el proceso de construcción más rápido.

- Reduce la absorción del agua.
- Impermeabilización uniforme en todo el volumen de hormigón.
- Resistencia mejorada contra la presión hidrostática.

- Eliminación de riesgos relacionados con daños en la superficie durante el proceso de construcción.
- Capacidad para sellar grietas de hormigón de hasta 0.40 mm.
- Realza las propiedades de autosellado del hormigón.
- Mejora la resistencia al ataque químico.
- Reduce la transmisión de vapor.

INFORME DE APLICACIÓN.

Recomendación de dosificación. -Dosificar entre 1.0% al 2.0% del peso del material cementante. Se puede usar una dosis superior o inferior a la recomendada. La dosis optima se debe determinar mediante ensayos con los materiales y en las condiciones de la obra.

3.2. Metodología de Investigación para la Realización de la Mezcla.

Todos los ensayos se realizaron de acuerdo al manual de laboratorio de hormigón que la misma se basa en las normas ASTM.

3.2.1. Forma y Dimensiones de las Muestras.

Se detalló el procedimiento empleado para la elaboración de las diversas muestras, que consistieron en probetas cilíndricas con un diámetro de 15 cm y una altura de 30 cm, utilizadas en los ensayos.

3.2.2. Numero de Especímenes y Pruebas.

Se fabricaron un total de 176 probetas cilíndricas.

De estas, 10 especímenes fueron preparados para medir la resistencia de compresión a los 28 días, mientras que 12 especímenes se utilizaron para realizar ensayos de permeabilidad, tanto para el hormigón patrón como para el hormigón con aditivo.

3.2.3. Análisis de Porcentajes de Aplicación del Aditivo Impermeabilizante.

Los porcentajes utilizados en la investigación fueron del 1%, 2%, 3% y 5% en relación con el peso del cemento para el hormigón H-28. Para el hormigón H-35, se emplearon los porcentajes del 1% y 2% respecto al peso del cemento.

3.2.4. Caracterización de Materiales.

3.2.4.1. Granulometría de Agregados (ASTM C136).

Figura 3.4 Ensayos de granulometría de los agregados.

Fuente: Elaboración propia.

El ensayo tiene como objetivo determinar la distribución de los tamaños de las partículas del agregado fino y grueso los cálculos están en el (anexo 2), por medio de tamices de abertura cuadrada ordenados en forma decreciente. Estos porcentajes retenidos se calcularán tanto los parciales como acumulados, en cada malla, para poder graficar los valores y ver si está en los límites permitidos por la norma ASTM C33.

La malla que se usan en el hormigón para el agregado grueso según la ASTM va desde aberturas 2 1⁄2, 2, 1 1⁄2, 1, 3⁄4, 1⁄2, 3⁄8 pulgadas, N°4. En agregados finos desde N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100.

El material que pasa por la malla N°100 se llama fino y corresponde a impurezas, limos y arcillas, por lo cual no se recomienda más del 5% según ASTM C33 en el material caso contrario se deberá hacer el lavado del mismo.

Retenido acumulada arena.

$$Ret.acum = \sum Peso\ Ret\left({}^{3}/_{8} + N°4 \dots\dots\dots + base\right) \quad \dots (3.1)$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret.acum}{WM}\right) * 100\% \quad \ldots(3.2)$$

Donde:

%Ret=Porcentaje de retención.

Ret.acum=Retenido acumulado.

WM=Peso total de la muestra.

Retenido acumulada grava.

$$Ret.acum = \sum Peso\ Ret\left(2\ {}^{1}/_{2}, \ldots\ldots\ldots + base\right) \quad \ldots(3.3)$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret.acum}{WM}\right) * 100\% \quad \ldots(3.4)$$

Donde:

%Ret=Porcentaje de retención.

Ret.acum=Retenido acumulado.

WM=Peso total de la muestra.

% que pasa del total.

$$\%Pasa = 100\% - \%Ret \quad \ldots(3.5)$$

Donde:

%Pasa=Porcentaje que llega a pasar por cada uno de los tamices del total.

%Ret=Porcentaje de retención.

Módulo de finura de la arena.

$$MF = \sum \frac{\%Ret(N°4,8,16,30,50,100)}{100} \quad \ldots(3.6)$$

Donde:

MF=-Modulo de finura.

∑(%Ret)=Sumatoria de los porcentajes retenidos en las mallas (4,8,16,30,50,100).

Contenido de humedad.

$$\%humedad = \left[\frac{(Wh - Ws)}{Ws}\right] * 100\% \quad \ldots (3.7)$$

%Humedad=Contenido de agua en porcentaje.

Wh=Peso húmedo de la muestra (humedad de banco).

Ws=Peso seco de la muestra (secado en horno a 105°C).

Tamaño del agregado.

El tamaño del agregado es el tamaño mínimo del tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra.

3.2.4.2. Peso Unitario de Agregados (ASTM C29).

Este método estableció el procedimiento donde se determinó el peso específico suelto y compactado de los áridos, lo que nos ayudó en la elaboración de hormigones.

Para ello se usó recipientes cilíndricos de material no poroso de volumen conocido. Según el tamaño de los áridos utilizados en los ensayos.

Los resultados obtenidos de la muestra (anexo 2) ensayada del material son los siguientes:

Tabla 3.1 Resultados del peso unitario agregados.

	Peso unitario suelto (gr/cm3)	Peso unitario compactado (gr/cm3)
Gravilla	1.447	1.580
Arena	1.619	1.706

Fuente: Elaboración propia.

$$PUs = \frac{Ws}{Vol} \quad \ldots (3.8)$$

Donde:

Pus=Peso unitario suelto.

Ws=Peso de la muestra suelta.

Vol=Volumen del molde.

$$PUc = \frac{Wc}{Vol} \quad \ldots (3.9)$$

Donde:

Pus=Peso unitario suelto.

Wc=Peso de la muestra compactada.

Vol=Volumen del molde.

3.2.4.3. Peso Específico y Absorción del Árido Grueso (ASTM C 127).

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos gruesos que se encuentra (anexo 2).

Para este ensayo se midió el peso específico de la gravilla chancada con un tamaño máximo de 1". En el ensayo se lavó 17 kg de gravilla para eliminar los polvos u otras sustancias adheridas a la superficie.

Se sumergió en agua por un periodo de 24 hrs como mínimo y se secaron con paños superficialmente donde se pesó 3 muestras de 5 kilogramos, con lo que se determinó la muestra en estado de saturación superficialmente seca (S.S.S).

Después se colocó la muestra en el canastillo metálico donde se pesaron con la balanza su peso sumergido en el agua.

Figura 3.5 Pesaje del peso sumergido.

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo del peso específico con las fórmulas siguientes:

Peso específico a granel.

$$GE = \frac{A}{B - C} \quad \ldots (3.10)$$

Donde:

A=Peso de la muestra seca.

B=Peso de la muestra en la condición saturada superficialmente seca.

C= Peso de la muestra sumergida.

Cálculo del porcentaje de absorción.

Peso específico en condición saturada, superficialmente seca.

$$GE\ sss = \frac{B}{B - C} \quad \ldots (3.11)$$

Donde:

A=Peso de la muestra seca.

B=Peso de la muestra en la condición saturada superficialmente seca.

C= Peso de la muestra sumergida.

Cálculo del porcentaje de absorción.

Peso específico aparente.

$$GE\ a = \frac{A}{A - C} \quad \ldots (3.12)$$

Donde:

A=Peso de la muestra seca.

B=Peso de la muestra en la condición saturada superficialmente seca.

C= Peso de la muestra sumergida.

Cálculo del porcentaje de absorción.

$$Absorcion, \% = \left[\frac{B - A}{A}\right] * 100 \quad \ldots (3.13)$$

Donde:

A=Peso de la muestra seca.

B=Peso de la muestra en la condición saturada superficialmente seca.

3.2.4.4. Peso Específico y Absorción Árido Fino (ASTM C 128).

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en áridos finos que se encuentra (anexo 2).

Para el ensayo se lavará 3 kg de arena para eliminar los polvos u otras sustancias adheridas a la superficie.

La arena se sumergirá en agua por un periodo mínimo de 24 horas. Luego se secará con la ayuda de una fuente y secadoras. Durante este proceso, se removerá la arena con una espátula una vez que este superficialmente seca. Posteriormente se procederá a realizar el ensayo con el cono y pisón dando 3 capas de 25 golpes cada una.

Después se tomará 3 muestras de 500 gr cada una, las cuales se colocarán en matraces que se llenarán hasta los 500 ml con agua. Posteriormente se pesarán. Luego, las

muestras se colocarán en bandejas y se dejará secar en el horno por 24 horas. Finalmente se pesará la muestra seca.

Figura 3.6 Procedimiento de la determinación peso específico de la arena.

Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos se los realiza utilizando las siguientes ecuaciones:

$$Peso\ especifico\ a\ granel = \frac{A}{V - W} \quad \ldots (3.14)$$

$$Peso\ especifico(SSS) = \frac{500}{V - W} \quad \ldots (3.15)$$

$$Peso\ especifico\ aparente = \frac{500 - A}{(V - W) - (500 - A)} \quad \ldots (3.16)$$

$$\%\ de\ Absorcion = \frac{B - A}{A} * 100 \quad \ldots (3.17)$$

Donde:

A=Peso en el aire de la muestra secada al horno.

B=Peso de la muestra saturada con superficie seca.

V=Volumen del matraz en ml.

W=Peso de agua agregado al matraz.

3.2.5. Dosificación del Hormigón.

Se caracterizaron los agregados y se llevó a cabo el cálculo de dosificación, el cual se presenta en el (anexo 3). Este cálculo fue realizado para las resistencias H-30 con una relación a/c de 0.50 y H-35 con una relación a/c de 0.45.

Tabla 3.2 Resultados de la dosificación de H-30 r a/c =0.50.

Ingrediente	Peso Húmedo Patrón	Peso Húmedo 1% aditivo	Peso Húmedo 2% aditivo	Peso Húmedo 3% aditivo	Peso Húmedo 5% aditivo
	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3
Cemento	442.71	442.71	442.71	442.71	442.71
Agua	221.35	221.35	221.35	221.35	221.35
Grava	1126.84	1126.84	1126.84	1126.84	1126.84
Arena	625.84	625.84	625.84	625.84	625.84
Aditivo		4.4	8.9	13.3	22.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Resultados de la dosificación de H-35 r a/c =0.45.

Ingrediente	Peso Húmedo Patrón	Peso Húmedo 1% aditivo	Peso Húmedo 2% aditivo
	Kg/m3	Kg/m3	Kg/m3
Cemento	515.74	515.74	515.74
Agua	231.21	231.21	231.21
Grava	1104.29	1104.29	1104.29
Arena	613.56	613.56	613.56
Aditivo		5.2	10.3

Fuente: Elaboración propia.

3.2.6. Procedimiento de Vaciado de Especímenes.

En primer lugar, se realizó el pesado del material para la dosificación calculada, es decir, hormigón sin aditivo, a modo de comparación con los hormigones con aditivo impermeabilizante del 1%, 2%, 3% y 5%.

Se realizo el lavado del agregado fino utilizado para la dosificación, ya que más del 5% se retenían en la base de la granulometría.

Se colocó gran parte del agua y el agregado grueso en la mezcladora, segundos después de haberse saturado, se introdujo la arena y el cemento, seguido del agua restante para fluidificar la mezcla y esta se homogeneizarla.

Figura 3.7 Dosificación de mezclas.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de transcurrir un par de minutos en la mezcla, se comenzó con el ensayo de consistencia o ensayo de desplazamiento de cono.

Figura 3.8 Asentamiento de mezcla.

Fuente: Elaboración propia.

Se necesitó que los moldes debieron ser limpiados y cubiertos en su interior de líquido (aceite sucio) para evitar que el hormigón se adhiera a las paredes de los moldes.

Teniendo los moldes y el hormigón listo, se procedió al llenado de los especímenes de la siguiente forma. Los moldes se llenaron en tres capas, dando a cada capa 25 golpes con una varilla de punta redonda de 5/8" y alrededor de 15 golpes con un martillo de goma en los 4 lados cardinales del cilindro. Después de terminar la última capa, se enrasó la superficie con la misma varilla para que quede lisa y uniforme.

Los moldes se colocaron en un lugar donde no fueron movidos durante un periodo de 24 horas después de ser llenados.

El hormigón se dejó fraguar durante 24 horas antes de proceder con el desmoldeo de los cilindros de prueba, los cuales fueron sometidos a un proceso de curado durante 28 días.

Hormigón con aditivo impermeabilizante.

Las mezclas se prepararon siguiendo las recomendaciones del fabricante del aditivo y se realizaron pruebas con dosis ligeramente superiores para observar el efecto sobre el asentamiento del material. Se midió el asentamiento generado al añadir el aditivo para evaluar el impacto en la dosificación calculada.

Se siguió el mismo procedimiento del hormigón patrón con la diferencia que cuando se echó lo último del agua de mezclado se disolvió con el aditivo impermeabilizante.

Se redujo la cantidad de agua para para alcanzar asentamiento de diseño calculado.

3.2.7. Medición del Asentamiento en las Mezclas.

Se realizó la medición del asentamiento empleando el método del cono de Abrams con el fin de mejorar el control de la mezcla esta detallado en el (anexo 7). Se tomaron tres muestras por cada dosificación para los hormigones H-30 r a/c =0.50 y H-35 r a/c=0.45. El análisis reveló una variación significativa en el asentamiento; a medida que aumentaba la cantidad de aditivo impermeabilizante, la mezcla adquiría una mayor fluidez.

3.2.8. Contenido de Aire Ocluido (ASTM C 231).

Esta prueba se realizó para determinar la cantidad de aire ocluido que genera en un hormigón con y sin aditivos para comparar cuanto hace variar esta propiedad en el hormigón.

Figura 3.9 Preparación para el uso del equipo de aire ocluido.

Fuente: Elaboración propia.

Primero se remojo el interior del tazón y se colocó en una superficie plana, nivelada y firme, se llenó el recipiente en tres capas donde se dieron 25 golpes con una varilla de 5/8 de pulgada además de 15 golpes con un mazo de goma alrededor del molde.

Figura 3.10 Preparación del molde de aire ocluido.

Fuente: Elaboración propia.

Se enrasó el hormigón con la regla y luego con una tela de franela, se limpió el exceso de mezcla del borde del recipiente, se humedeció el interior de la cubierta antes de acoplarla con la mordaza a la base sujetando dos a la vez y en cruz.

Se cerró la llave de aire. Luego se introdujo la cámara y el tazón donde se abrió la llave de purga de la cubierta, donde se procedió a inyectar agua por la llave de purga, mientras se mueve y golpea el medidor para asegurar que todo el aire sea expulsado.

Cerrar la válvula de escape de aire comprimido y bombeo aire comprimido dentro de la cámara hasta que el manómetro indico la presión inicial, esperando unos segundos para que el aire comprimido llegue a una temperatura normal y se estabilice la lectura de presión.

Figura 3.11 Uso del equipo de aire ocluido.

Fuente: Elaboración propia.

Sé cero la llave de válvula de aire principal y se abrió las llaves de aire principal y de purga para descargar la presión, antes de remover la cubierta.

Los resultados obtenidos del ensayo de contenido de aire ocluido se encuentran en él (anexo 6).

3.2.9. Curado de las Muestras.

Luego del proceso de fraguado del hormigón, Se procederá a saturar con agua, con el fin de hidratar las partículas de cemento con el fin de conseguir su máxima eficiencia del hormigón.

Donde se trasladó a la piscina de curado, en la que se sumergió durante el periodo necesario para el curado.

Figura 3.12 Curado de probetas de hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Metodología de Pruebas al Hormigón.

Se llevará a cabo un análisis de la resistencia a compresión del hormigón a través de pruebas mecánicas, así como también se evaluará su capacidad para resistir la penetración del agua mediante pruebas de permeabilidad.

3.3.1. Pruebas Mecánicas.

Se realizó la rotura de las probetas cilíndricas a los 28 días del vaciado. Se utilizo un total de 10 probetas para el grupo sin aditivo y para los grupos con variantes de impermeabilizante. Las probetas tenían dimensiones estándar de 152 mm de diámetro y 304 mm de altura y estaban visualmente en buenas condiciones (sin cangrejeras, lisas, cara superior e inferior paralela y con área uniforme). La rotura se realizó con una prensa hidráulica semiautomática (marca Controls) a una velocidad constante de 0.250

MPA/s, sensibilidad de 0.15 KN. Además, se utilizaron retenedores con neoprenos (marca Controls), que consta de dos bases metálicas inferior y superior donde entran en ellas una lámina de shore A-50 para 10 a 40 MPa, proporcionando una confiabilidad de 95%.

Figura 3.13 Equipo necesario para la rotura de probetas compresión.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.1. Características Físicas y Mecánicas de los Materiales.

Los ensayos de rotura realizados en las 80 probetas mostraron que la fractura se produjo por corte, como resultado de la compresión aplicada durante el ensayo. Los hormigones diseñados para resistencias H-30 r a/c=0.50 y H-35 r a/c=0.45 tienden a fracturarse bajo estas condiciones en la prensa hidráulica.

Figura 3.14 Rotura de probeta a compresión por cortante.

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Prueba de Permeabilidad en el Hormigón.

El ensayo de permeabilidad mide la resistencia del hormigón frente a la penetración del agua bajo presión.

Después del curado del H° a los 28 días, se comenzó a preparar la probeta de ensayo:

Se realizó el secado de la probeta durante 24 horas previas al ensayo en un horno a una temperatura de 50 ± 5°C. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Se raspó la parte que se expondrá a la presión del agua y luego se selló alrededor del área de ensayo con sikaflex-401 para evitar filtraciones por la parte de debajo de la muestra.

Figura 3.15 Preparación de las probetas para el ensayo de permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

La probeta fue colocada en las posiciones de prueba, asegurándose de que la junta quede cubierta por la cara inferior de la muestra. Luego, se aseguró firmemente en su lugar bloqueando el mango de sujeción.

Se llenaron todas las buretas de los ensayos del equipo hasta los 1.5 litros y se aplicó la presión de agua de (0.5 ∓ 0.05) MPa durante (72 ∓ 2) horas. Durante la prueba se observaron periódicamente las buretas para ver el agua que penetraba en el ensayo y se

registró la apariencia de las superficies de la muestra de prueba no expuesta a la presión del agua para notar la presencia de agua. Si se observa una fuga, se debe considerar la validez del resultado y registrar el hecho.

Figura 3.16 Ensayo de probetas en el equipo de permeabilidad del hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

Se ensayó la muestra con la prensa semiautomática, donde se realizó la ruptura por tracción indirecta, se obtuvo la cara expuesta al agua.

Figura 3.17 Ensayo de tracción indirecta.

Fuente :Elaboracion propia.

Despues de dividir la probeta, se procede a medir la profundidad máxima de penetración utilizando un flexómetro.

Figura 3.18 Medicion de la profundidad maxima de penetracion del agua .

Fuente: Elaboración propia.

Además, con la ayuda de un papel, se trazará el perfil de la profundidad media del agua, y posteriormente, se calculará la profundidad media de penetración mediante cálculos realizados en el laboratorio.

Figura 3.19 Medición de la profundidad media de penetración del agua.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados del ensayo de permeabilidad de las probetas (anexo 5).

3.3.3. Prueba de Filtración en el Hormigón.

La prueba de filtración del hormigón se realizó con la lectura de todas las buretas de los ensayos del equipo hasta los 1.5 litros y se aplicó la presión de agua de (0.5 ∓ 0.05)

MPa durante (72 ∓ 2) horas esta detallado (anexo 5). Durante la prueba se observaron periódicamente las buretas para ver el agua que penetraba en el ensayo.

Figura 3.20 Ensayo de probetas en el equipo de permeabilidad del hormigón.

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Resultados de Ensayo al Hormigón.

4.1.1. Permeabilidad del Hormigón; H-30 r a/c=0.50.

Para el ensayo de permeabilidad de las probetas se realizaron 12 ensayos para el Hormigón patrón H-30 r a/c = 0.50 y 12 pruebas adicionales para de uno de los porcentajes de aditivo 1%,2%,3% y 5%. Los detalles de estos ensayos están especificados en el (anexo 5).

Tabla 4.1 Ensayo de permeabilidad de probetas H-30 r a/c=0.50 mayores de 28 días profundidad máxima de penetración.

Probetas	0% de aditivo (cm)	1% de aditivo(cm)	2% de aditivo (cm)	3% de aditivo (cm)	5% de aditivo (cm)
P1	7.0	5.6	6.1	6.3	6.4
P2	7.0	6.2	5.5	6.2	6.2
P3	7.6	5.7	5.8	6.3	6.2
P4	7.5	5.8	5.9	6.4	6.0
P5	7.3	6.1	5.4	6.1	6.3
P6	7.6	5.9	5.6	6.0	6.5
P7	7.2	5.5	6.0	6.1	6.2
P8	7.0	6.0	5.8	6.3	6.3
P9	7.3	5.8	5.7	6.2	6.6
P10	7.1	5.9	5.5	6.0	6.0
P11	7.3	6.0	5.7	6.0	6.4
P12	7.4	5.9	5.6	6.2	6.1
Promedio	7.3	5.9	5.7	6.2	6.3

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las indicaciones del manual del equipo de permeabilidad, se calculó el promedio tanto de la máxima profundidad de penetración como de la penetración media a partir de los ensayos realizados.

Tabla 4.2 Análisis estadístico del ensayo de permeabilidad de probetas H-30 r a/c=0.50 mayores de 28 días profundidad máxima de penetración.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo	3% de aditivo	5% de aditivo
Promedio (cm)	7.3	5.9	5.7	6.2	6.3
Desviacion estandar (cm)	0.22	0.20	0.21	0.14	0.19
Tamaño Muestra	12	12	12	12	12
Varianza (cm^2)	0.0493	0.0406	0.0452	0.0184	0.0352
t student		16.27	17.56	14.64	12.02
Grados de libertad (v)		21.80	21.96	18.21	21.40
Grados de libertad (v)		22	22	18	21
Nivel confianza (α)		0.05	0.05	0.05	0.05
t student calculado		16.27	17.56	14.64	12.02
Valor critico t		1.717	1.717	1.734	1.721
t calc>t crit		OK	OK	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

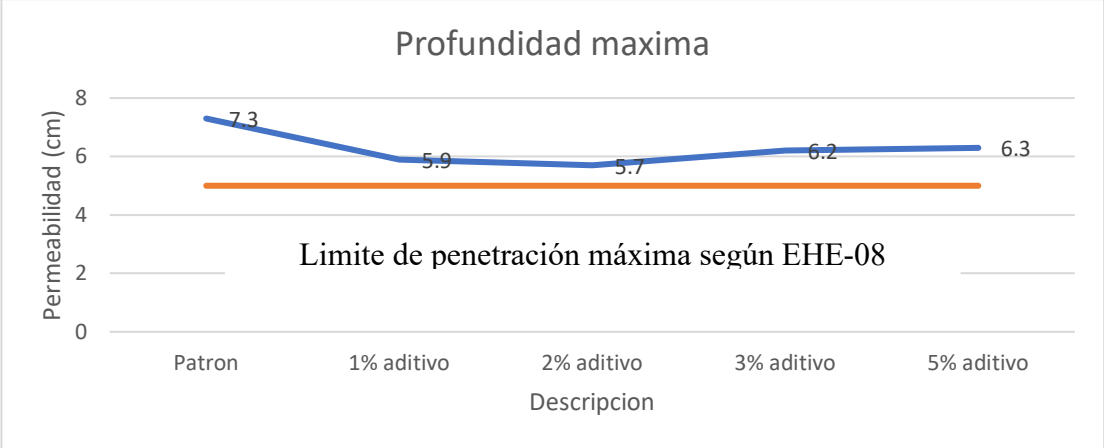
Se realizó un análisis estadístico de la profundidad máxima de penetración utilizando el método de T DE STUDENT para el hormigón H-30 r a/c=0.50 con aditivos en concentraciones del 1%, 2%, 3% y 5%. Se formularon dos hipótesis para este estudio:

Hipótesis nula: El aditivo no tiene efecto sobre la permeabilidad del hormigón, es decir, las medias de permeabilidad entre los grupos no presentan diferencias significativas.

Hipótesis alternativa: El aditivo reduce la permeabilidad del hormigón.

En conclusión, dado que el valor absoluto del estadístico t calculado es superior al valor crítico obtenido de la tabla, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia significativa en la permeabilidad entre las mezclas de hormigón con aditivo y las sin aditivo.

Figura 4.1.Resultados de la profundidad máxima de penetración del H-30 r a/c=0.50.



Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico, se observa que ninguna de las probetas alcanzó el límite máximo de profundidad de penetración del agua especificado por la norma EHE-08.

Tabla 4.3 Ensayo de permeabilidad de probetas H-30 r a/c=0.50 mayores de 28 días profundidad media de penetración.

Probetas	0% de aditivo (cm)	1% de aditivo(cm)	2% de aditivo (cm)	3% de aditivo (cm)	5% de aditivo (cm)
P1	5.1	3.0	2.6	3.9	3.9
P2	5.1	3.6	3.0	3.9	3.9
P3	5.5	3.0	3.0	3.9	3.9
P4	5.5	3.0	3.5	3.5	3.5
P5	5.1	3.5	3.0	3.9	3.9
P6	5.5	3.5	3.0	3.5	3.9
P7	5.2	3.0	3.0	3.5	3.9
P8	5.6	3.5	2.6	3.9	3.5
P9	5.3	3.5	2.6	3.9	3.9
P10	5.7	3.0	3.0	3.5	3.9
P11	5.3	2.6	2.6	3.5	3.5
P12	5.2	3.0	2.6	3.9	3.9
Promedio	5.3	3.2	2.9	3.7	3.8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.4 Análisis estadístico del ensayo de permeabilidad de probetas H-30 r a/c=0.50 mayores de 28 días profundidad media de penetración.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo	3% de aditivo	5% de aditivo
Promedio (cm)	5.3	3.2	2.9	3.7	3.8
Desviacion estandar (cm)	0.23	0.30	0.28	0.22	0.19
Tamaño Muestra	12	12	12	12	12
Varianza (cm^2)	0.0524	0.0894	0.0795	0.0490	0.0378
T DE STUDENT		19.87	23.47	17.70	17.95
Grados de libertad (v)		20.60	21.11	21.98	21.44
Grados de libertad (v)		21	21	22	21
Nivel confianza (α)		0.05	0.05	0.05	0.05
T DE STUDENT calculado		19.87	23.47	17.70	17.95
Valor critico t		1.721	1.721	1.717	1.721
t calc>t crit		OK	OK	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

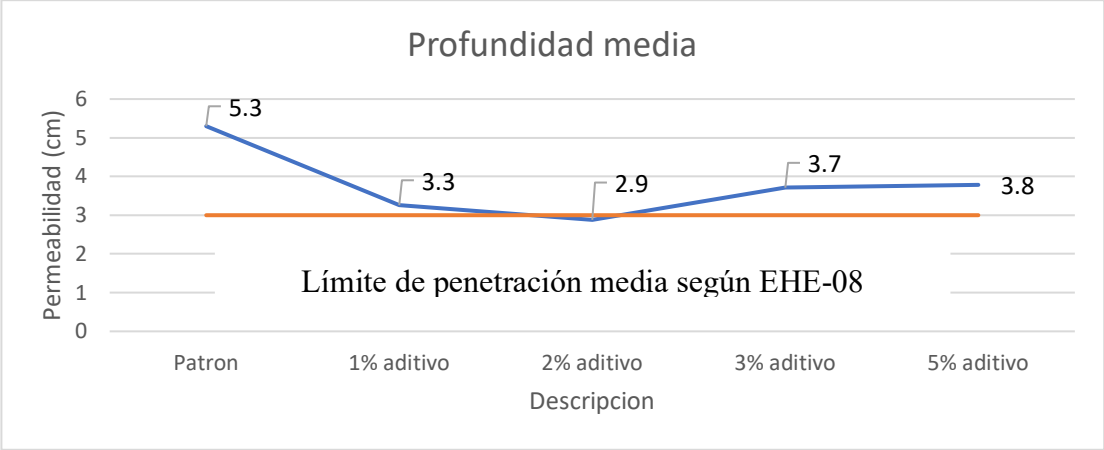
Se llevó a cabo un análisis estadístico de la profundidad media de penetración utilizando el método de T DE STUDENT para el hormigón H-30 r a/c=0.50 con aditivos en concentraciones del 1%, 2%, 3% y 5%. Se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: El aditivo no tiene efecto sobre la permeabilidad del hormigón, es decir, las medias de permeabilidad entre los grupos no presentan diferencias significativas.

Hipótesis alternativa: El aditivo reduce la permeabilidad del hormigón.

En conclusión, dado que el valor absoluto del estadístico t calculado es mayor que el valor crítico de la tabla, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia significativa en la permeabilidad entre las mezclas de hormigón con aditivo y las sin aditivo.

Figura 4.2 Resultados de la profundidad media de penetración del hormigón H-30 r a/c=0.50.



Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico, se observa que las probetas con un 2% de aditivo alcanzaron el límite especificado por la norma EHE-08 para la profundidad media de penetración. Además, el gráfico muestra que el aditivo contribuye a mejorar la resistencia del hormigón, logrando una profundidad de penetración superior a los 10 mm.

4.1.2. Permeabilidad del Hormigón; H-35 r a/c=0.45.

Para el ensayo de permeabilidad de las probetas se realizaron 12 ensayos para el Hormigón patrón H-35 r a/c = 0.45 y 12 pruebas para las mezclas con aditivos al 1% y al 2%. Los detalles de estos ensayos se encuentran en el (anexo 5).

Tabla 4.5 Ensayo de permeabilidad de probetas H-35 r a/c = 0.45 mayores de 28 días profundidad máxima de penetración.

Probetas	0% de aditivo (cm)	1% de aditivo(cm)	2% de aditivo (cm)
P1	5.8	5.0	4.5
P2	5.7	4.5	4.8
P3	5.9	4.7	4.6
P4	5.7	4.7	4.7
P5	5.8	4.8	4.4
P6	6.1	4.8	4.7
P7	5.9	4.7	4.7
P8	5.8	4.5	4.6
P9	5.7	4.8	4.4
P10	5.9	5.0	4.8
P11	5.8	4.6	4.5
P12	6.0	4.8	4.6
Promedio	5.8	4.7	4.6

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con las indicaciones del manual del equipo de permeabilidad, se calculó el promedio tanto de la máxima profundidad de penetración como de la penetración media a partir de los ensayos realizados.

Tabla 4.6 Análisis estadístico del ensayo de permeabilidad de probetas H-35 r a/c = 0.45 mayores de 28 días profundidad máxima de penetración.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo
Promedio (cm)	5.8	4.7	4.6
Desviacion estandar (cm)	0.12	0.16	0.14
Tamaño Muestra	12	12	12
Varianza (cm^2)	0.0154	0.0263	0.0190
T DE STUDENT		18.67	23.04
Grados de libertad (v)		20.59	21.76
Grados de libertad (v)		21	22
Nivel confianza (α)		0.05	0.05
T DE STUDENT calculado		18.67	23.04
Valor critico t		1.721	1.717
t calc>t crit		OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

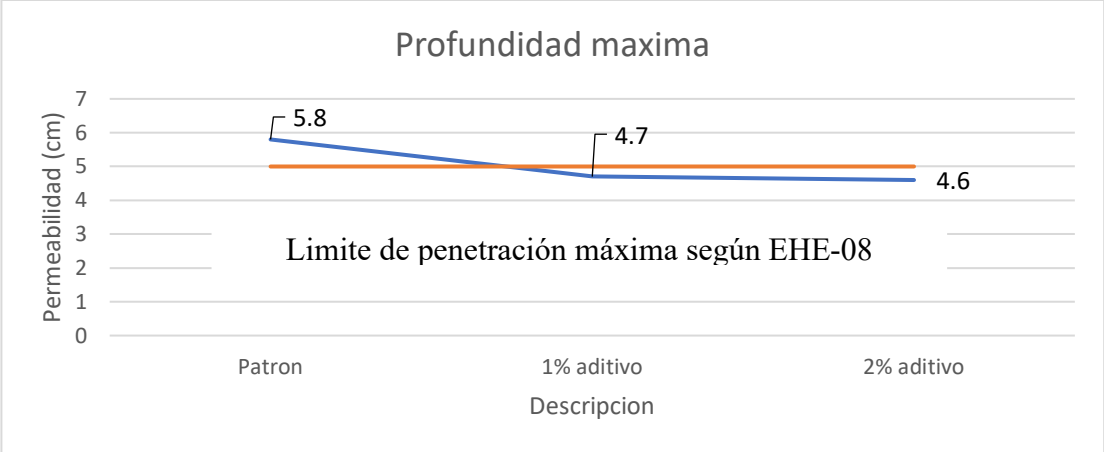
Se realizó un análisis estadístico de la profundidad máxima de penetración utilizando el método de T DE STUDENT para el hormigón H-35 r a/c = 0.45 con aditivos al 1% y al 2%. Se establecieron las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: El aditivo no tiene efecto sobre la permeabilidad del hormigón, es decir, las medias de permeabilidad entre los grupos son iguales.

Hipótesis alternativa: El aditivo reduce la permeabilidad del hormigón.

En conclusión, dado que el valor absoluto del estadístico t calculado es mayor que el valor crítico de la tabla, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia significativa en la permeabilidad entre mezclas.

Figura 4.3 Resultados de la profundidad máxima de penetración del hormigón H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.7 Ensayo de permeabilidad de probetas H-35 r a/c = 0.45 mayores de 28 días profundidad media de penetración.

Probetas	0% de aditivo (cm)	1% de aditivo(cm)	2% de aditivo (cm)
P1	3.5	2.6	1.7
P2	3.5	2.2	1.7
P3	3.5	2.2	2.2
P4	3.5	2.2	1.7
P5	3.1	2.2	1.7
P6	3.1	2.2	1.7
P7	3.5	2.2	2.2
P8	3.5	2.6	1.7
P9	3.1	2.2	1.7
P10	3.1	2.6	2.2
P11	3.1	2.2	1.7
P12	3.5	2.6	2.2
Promedio	3.3	2.3	1.9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.8 Análisis estadístico del ensayo de permeabilidad de probetas H-35 r a/c = 0.45 mayores de 28 días profundidad media de penetración.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo
Promedio (cm)	3.3	2.3	1.9
Desviacion estandar (cm)	0.19	0.19	0.21
Tamaño Muestra	12	12	12
Varianza (cm^2)	0.0363	0.0380	0.0448
T DE STUDENT		12.45	17.42
Grados de libertad (v)		21.99	21.76
Grados de libertad (v)		22	22
Nivel confianza (α)		0.05	0.05
T DE STUDENT calculado		12.45	17.42
Valor critico t		1.717	1.717
t calc>t crit		OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

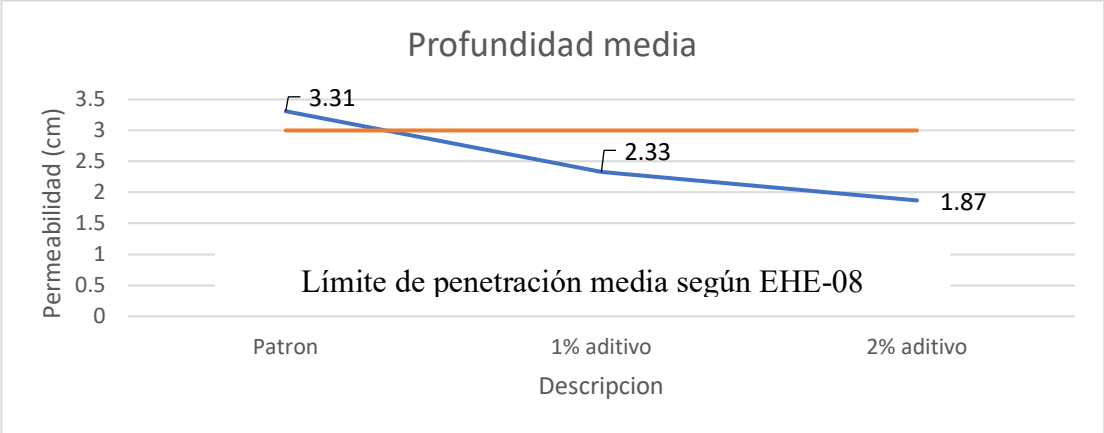
Se llevó a cabo un análisis estadístico de la profundidad media de penetración utilizando el método de T DE STUDENT para el hormigón H-35 r a/c = 0.45 con aditivos al 1% y al 2%. Se formularon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: El aditivo no tiene efecto sobre la permeabilidad del hormigón, es decir, las medias de permeabilidad entre los grupos son iguales.

Hipótesis alternativa: El aditivo reduce la permeabilidad del hormigón.

En conclusión, dado que el valor absoluto del estadístico t calculado es mayor que el valor crítico de la tabla, se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que existe una diferencia significativa en la permeabilidad entre las mezclas de hormigón.

Figura 4.4
Resultados de la profundidad media de penetración del hormigón H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

Según el gráfico, se observa que las probetas con aditivos del 1% y del 2% alcanzaron el límite especificado por la norma EHE-08. Sin embargo, para cumplir con el requerimiento mínimo del fabricante para hormigones impermeabilizantes, se necesita una relación agua/cemento (A/C) menor de 0.45 lo que no es posible porque la norma nos dice que con A/C menor afecta a la trabajabilidad ocasionando que la mezcla no sea homogénea. Además, se evidencia que el aditivo contribuye a mejorar la resistencia del hormigón, logrando una profundidad de penetración superior a los 10 mm.

4.1.3. Filtración de Agua en el Hormigón.

Se sometieron 60 probetas de hormigón H-30 r a/c = 0.50, con adiciones de aditivo en concentraciones del 1%, 2%, 3% y 5%, a un ensayo de filtración. Las probetas fueron expuestas a una presión de (0.5 ± 0.05) MPa durante (72 ± 2) horas. Los resultados de este ensayo se detallan en el Anexo 5.

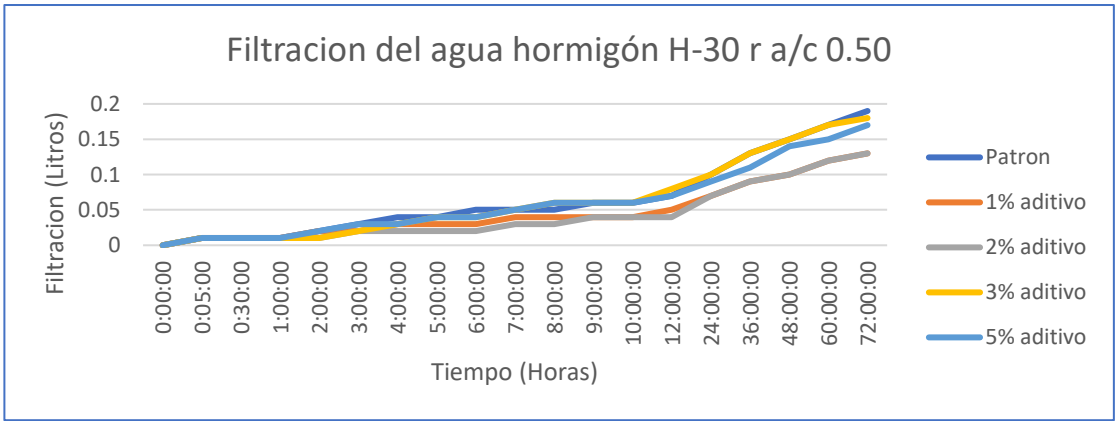
Tabla 4.9 Ensayo de filtración de agua en probetas H-30 r a/c=0.50.

Tiempo (Hrs)	Patron (L)	1% aditivo (L)	2% aditivo (L)	3% aditivo (L)	5% aditivo (L)
0:00:00	0	0	0	0	0
0:05:00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0:30:00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1:00:00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2:00:00	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02
3:00:00	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
4:00:00	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03
5:00:00	0.04	0.03	0.02	0.04	0.04
6:00:00	0.05	0.03	0.02	0.04	0.04
7:00:00	0.05	0.04	0.03	0.05	0.05
8:00:00	0.05	0.04	0.03	0.06	0.06
9:00:00	0.06	0.04	0.04	0.06	0.06
10:00:00	0.06	0.04	0.04	0.06	0.06
12:00:00	0.07	0.05	0.04	0.08	0.07
24:00:00	0.1	0.07	0.07	0.10	0.09
36:00:00	0.13	0.09	0.09	0.13	0.11
48:00:00	0.15	0.1	0.1	0.15	0.14
60:00:00	0.17	0.12	0.12	0.17	0.15
72:00:00	0.19	0.13	0.13	0.18	0.17

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con las buretas de 1.5 litros indican que la filtración mínima de agua se observó en el hormigón con aditivos al 1% y al 2%, con una cantidad de 0.12 litros en un período de 72 horas, bajo una presión de 0.5 MPa.

Figura 4.5 Resultados de la filtración del agua en el tiempo probetas H-30 r a/c = 0.50.



Fuente: Elaboración propia

Se sometieron 36 probetas de hormigón H-35 r a/c=0.45, con adiciones de aditivo al 1% y al 2%, a un ensayo de filtración bajo una presión de (0.5 ± 0.05) MPa durante (72 ± 2) horas.

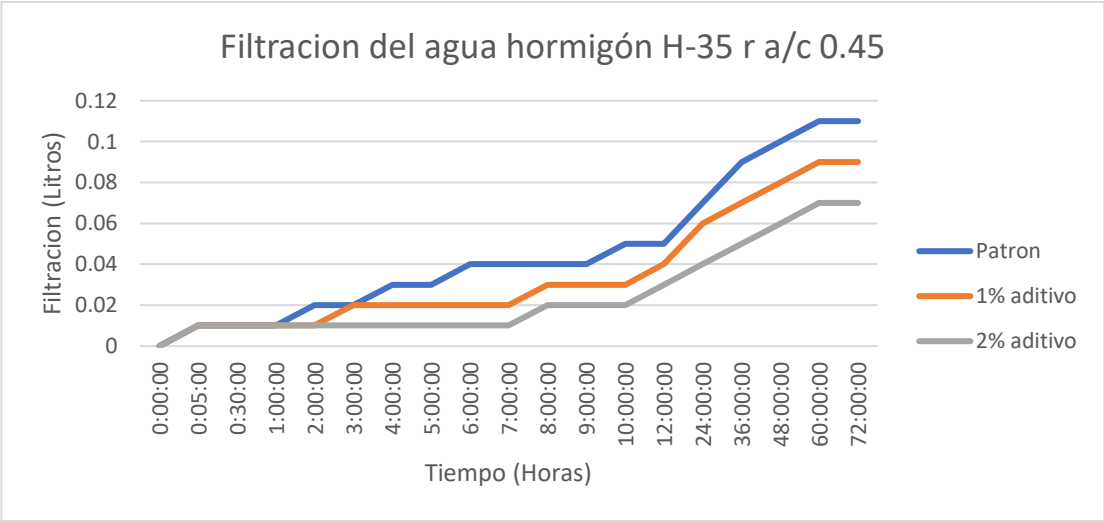
Tabla 4.10 Ensayo de filtración de agua en probetas H-35 r a/c=0.45.

Tiempo (Hrs)	Patron (L)	1% aditivo (L)	2% aditivo (L)
0:00:00	0	0	0
0:05:00	0.01	0.01	0.01
0:30:00	0.01	0.01	0.01
1:00:00	0.01	0.01	0.01
2:00:00	0.02	0.01	0.01
3:00:00	0.02	0.02	0.01
4:00:00	0.03	0.02	0.01
5:00:00	0.03	0.02	0.01
6:00:00	0.04	0.02	0.01
7:00:00	0.04	0.02	0.01
8:00:00	0.04	0.03	0.02
9:00:00	0.04	0.03	0.02
10:00:00	0.05	0.03	0.02
12:00:00	0.05	0.04	0.03
24:00:00	0.07	0.06	0.04
36:00:00	0.09	0.07	0.05
48:00:00	0.1	0.08	0.06
60:00:00	0.11	0.09	0.07
72:00:00	0.11	0.09	0.07

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos con las buretas de 1.5 litros indican que la filtración de agua mínima se observó en el hormigón con aditivo al 1%, con 0.09 litros, y al 2%, con 0.07 litros, durante un período de 72 horas bajo una presión de 0.5 MPa.

Figura 4.6 Resultados de la filtración del agua en el tiempo probetas H-35 r a/c 0.45.



Fuente: Elaboración propia

4.1.4. Resistencia Mecánica del Hormigón.

Se calculó la resistencia a compresión de 80 probetas a los 28 días y se evaluó la confiabilidad de los resultados de acuerdo método T DE STUDENT. Los datos de las dosificaciones se presentan en el (Anexo 4).

Tabla 4.11 Resumen de rotura de probetas H-30 r a/c=0.50 a los 28 días.

Probetas	Patron (MPa)	1% aditivo (MPa)	2% aditivo (MPa)	3% aditivo (MPa)	5% aditivo (MPa)
P1	35.78	36.85	32.14	28.89	30.56
P2	36.08	37.04	32.18	28.99	30.92
P3	36.26	37.18	32.37	29.55	30.95
P4	36.48	37.35	32.51	29.78	31.24
P5	36.58	37.56	32.76	30.06	31.38
P6	36.76	37.79	33.02	30.07	31.70
P7	36.99	37.91	33.41	30.08	31.77
P8	37.11	38.07	33.50	30.36	32.01
P9	37.45	38.25	33.54	30.60	32.28
P10	37.63	38.53	33.88	30.99	32.52

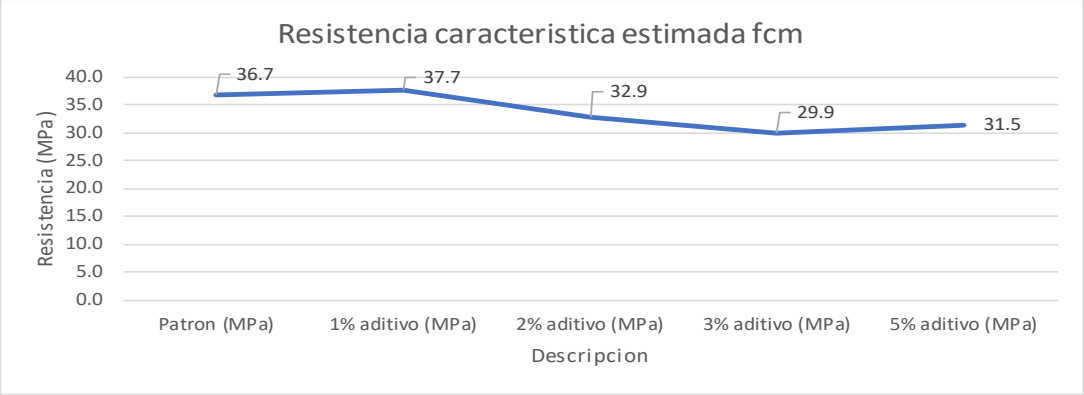
Fuente: Elaboración propio.

Tabla 4.12 Análisis estadístico de rotura de probetas H-30 r a/c=0.50 a los 28 días.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo	3% de aditivo	5% de aditivo
Promedio (MPA)	36.7	37.7	32.9	29.9	31.5
Desviacion estandar (MPA)	0.59	0.55	0.63	0.66	0.63
Tamaño Muestra	10	10	10	10	10
T DE STUDENT	27.55	32.60	11.70	-0.25	6.09
Grados de libertad (v)	9	9	9	9	9
Nivel confianza (α)		0.05	0.05	0.05	0.05
T DE STUDENT calculado	27.55	32.60	11.70	-0.25	6.09
Valor critico t	1.833	1.833	1.833	1.833	1.833
t calc>t crit	OK	OK	OK	NO CUMPLE	OK

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7 Resumen de resistencia promedio de probetas H-30 a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de las probetas de hormigón indican que más del 95% alcanzaron una resistencia superior a 30 MPa con una relación agua/cemento de 0.50 con excepción del hormigón con inclusión de 3 % de aditivo, cumpliendo así los requisitos mínimos para un hormigón impermeable según la norma EHE-08. Sin embargo, también se observó una disminución en la resistencia debido al uso del aditivo impermeabilizante.

Tabla 4.13 Resumen de rotura de probetas H-35 r a/c=0.45 a los 28 días.

Probetas	Patron (MPa)	1% aditivo (MPa)	2% aditivo (MPa)
P1	39.94	40.83	39.23
P2	40.00	40.98	39.63
P3	40.10	41.02	40.05
P4	40.23	41.12	40.31
P5	40.32	41.33	40.52
P6	40.43	41.45	40.76
P7	40.52	41.53	41.06
P8	40.71	41.67	41.27
P9	40.87	41.74	41.43
P10	40.93	41.88	41.77

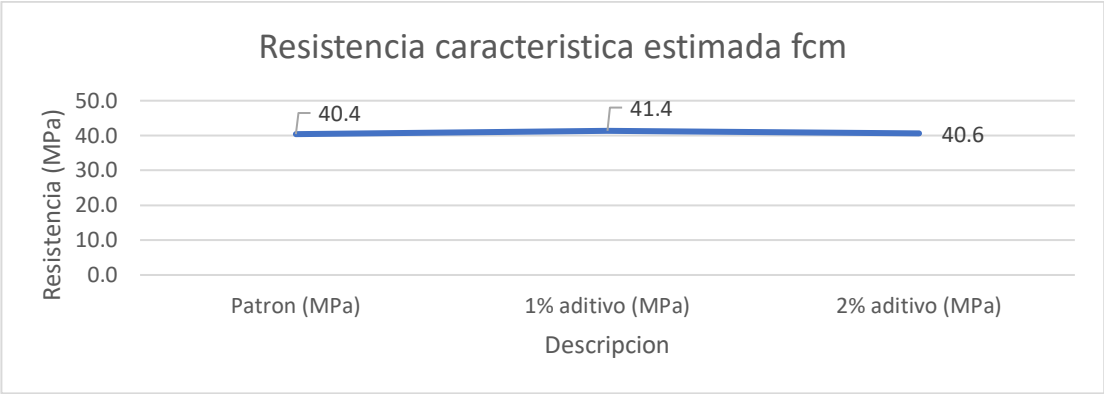
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.14 Análisis estadístico de rotura de probetas H-35 r a/c=0.45 a los 28 días.

Descripción	Patrón	1% de aditivo	2% de aditivo
Promedio (MPA)	40.4	41.4	40.6
Desviacion estandar (MPA)	0.35	0.36	0.81
Tamaño Muestra	10	10	10
T DE STUDENT	28.88	33.67	19.64
Grados de Libertad (v)	9	9	9
Nivel confianza (α)		0.05	0.05
T DE STUDENT calculado	28.88	33.67	19.64
Valor critico t	1.833	1.833	1.833
t calc>t crit	OK	OK	OK

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.8 Resumen de resistencia promedio de probetas H-35 a los 28 días.



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el aditivo impermeabilizante no afecta significativamente la resistencia del hormigón H-35 r a/c=0.45, ya que los valores obtenidos son muy cercanos a los del hormigón patrón, incluso con hasta un 2% de aditivo.

4.1.5. Aire Ocluido en el Hormigón.

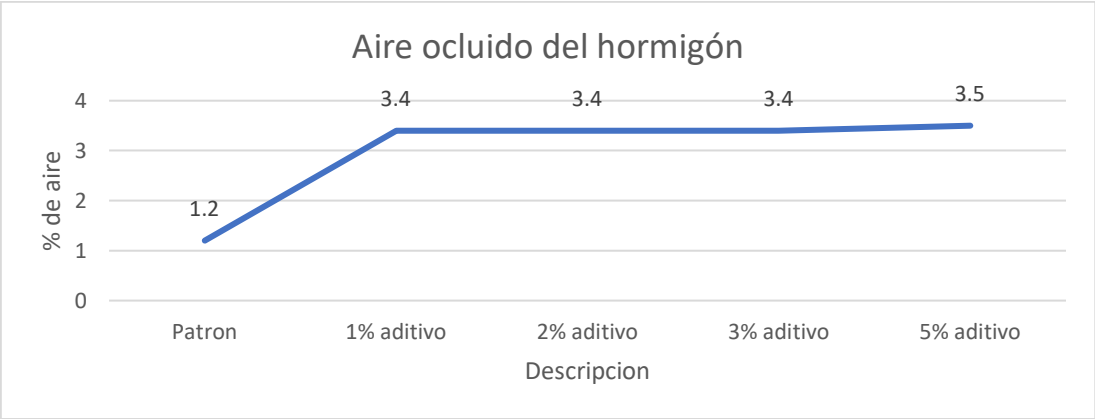
Los resultados del ensayo de aire ocluido se detallan en el (Anexo 6). Se realizaron 3 ensayos para el hormigón patrón y 3 ensayos para cada concentración de aditivo (1%, 2%, 3% y 5%).

Tabla 4.15 Análisis del aire ocluido en el hormigón.

# de ensayos	Patron (% de aire)	1% aditivo (% de aire)	2% aditivo (% de aire)	3% aditivo (% de aire)	5% aditivo (% de aire)
1	0.9	3.6	3.7	3.2	3.3
2	1.4	3.1	3.2	3.7	3.6
3	1.2	3.4	3.3	3.4	3.7
Promedio	1.2	3.4	3.4	3.4	3.5

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.9 Aire ocluido en el hormigón.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra que el aditivo generó el doble de aire atrapado en comparación con el hormigón estándar. El aire ocluido forma pequeñas burbujas distribuidas uniformemente en la mezcla, lo que interrumpe la red capilar y reduce la permeabilidad del hormigón al dificultar el paso del agua a través de sus poros**.**

4.1.6. Asentamiento de las Mezclas de Hormigón.

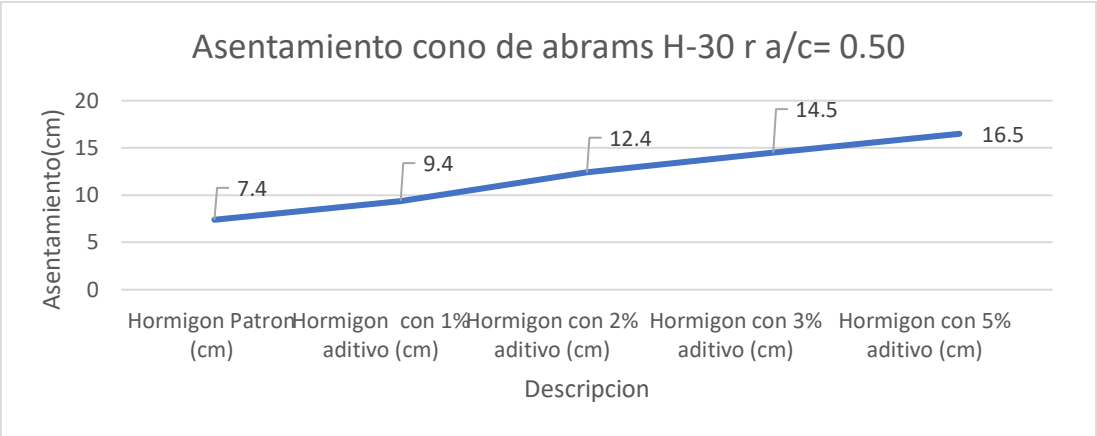
Los resultados del ensayo de asentamiento se presentan en el (Anexo 7). Se realizaron 3 ensayos para el hormigón patrón y 3 ensayos para cada concentración de aditivo (1%, 2%, 3% y 5%).

Tabla 4.16 Análisis del asentamiento hormigón H-30 r a/c=0.50.

Hormigon H-28 relacion agua/cemento de 0.50					
# de ensayos	Hormigon Patron (cm)	Hormigon con 1% aditivo (cm)	Hormigon con 2% aditivo (cm)	Hormigon con 3% aditivo (cm)	Hormigon con 5% aditivo (cm)
1	7.6	9.6	12.3	14.3	16.3
2	7.4	9.4	12.6	14.4	16.8
3	7.3	9.2	12.4	14.7	16.5
Promedio	7.4	9.4	12.4	14.5	16.5

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.10 Asentamiento hormigón H-30 r a/c =0.50.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico muestra que el aditivo mejoró significativamente la trabajabilidad del hormigón en comparación con el hormigón estándar. Esta mejora se traduce en una mayor facilidad para manejar y colocar el hormigón, facilitando su aplicación y asegurando una mezcla más homogénea.

4.2. Análisis de Costos.

El costo de los materiales para 1 m³ de hormigón se detalla en el (anexo 8). Se evaluaron los beneficios de los diferentes porcentajes del aditivo analizado para determinar la rentabilidad del uso de aditivos impermeabilizantes en el hormigón.

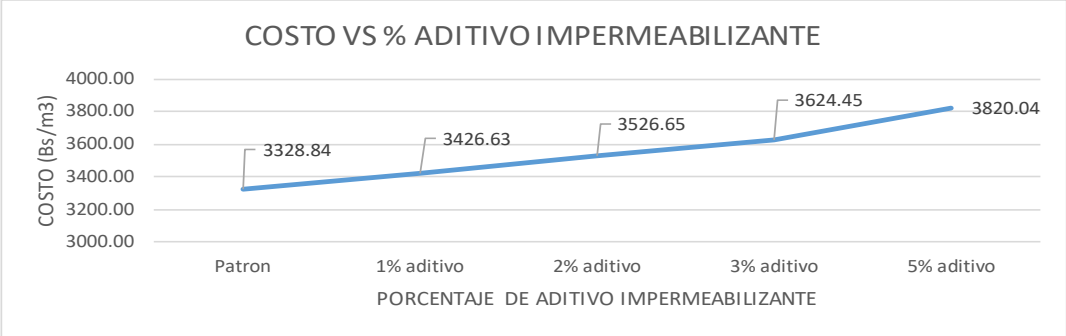
Tabla 4.17 Beneficio -costo del uso de hormigones H-30 r a/c=0.50 impermeabilizantes.

ripción	Cantidad (m3)	Aditivo (%)	Costo (Bs)	Aumento costo (%)	Altura de penetración (cm)	Mejora del uso aditivo (%)
Hormigón patrón H-28	1	0	3328.84	0	7.3	0
Hormigón H-28 con aditivo	1	1	3426.63	2.94	5.9	19.2
Hormigón H-28 con aditivo	1	2	3526.65	5.94	5.7	21.9
Hormigón H-28 con aditivo	1	3	3624.45	8.88	6.2	15.1
Hormigón H-28 con aditivo	1	5	3820.04	14.76	6.3	13.7

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se puede observar que el costo de un metro cúbico de hormigón con aditivo impermeabilizante es más favorable cuando se utiliza un aditivo al 2%, mejorando las propiedades impermeabilizantes en un 21.9%.

Figura 4.11 Comparación del precio de 1m3 de hormigón H-30 r a/c=0.50 con adición de aditivo impermeabilizante.



Fuente Elaboración propia.

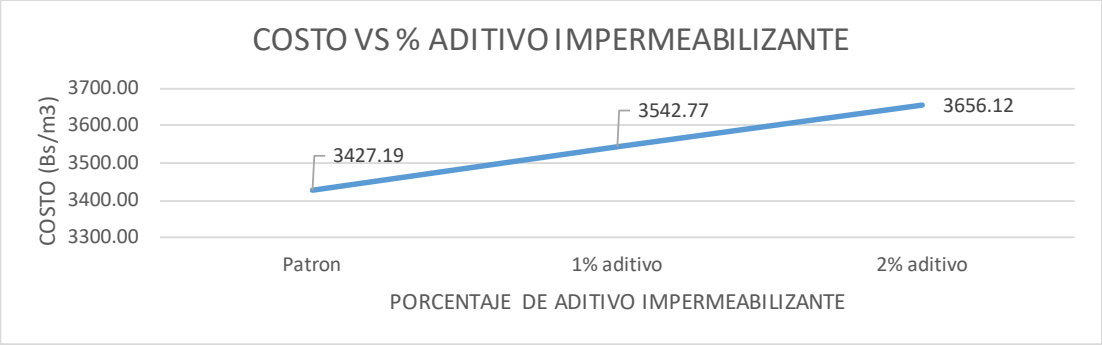
Tabla 4.18 Beneficio -costo del uso de hormigones H-35 r a/c=0.45 impermeabilizantes.

ripción	Cantidad (m3)	Aditivo (%)	Costo (Bs)	Aumento costo (%)	Altura de penetración (cm)	Mejora del uso aditivo (%)
Hormigón patrón H-28	1	0	3427.19	0	5.8	0
Hormigón H-28 con aditivo	1	1	3542.77	3.37	4.7	19.0
Hormigón H-28 con aditivo	1	2	3656.12	6.68	4.6	20.7

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla se puede observar que el costo de un metro cúbico de hormigón con aditivo impermeabilizante resulta más rentable con una dosificación del 2%, ya que mejora las propiedades impermeabilizantes en un 20.7%.

Figura 4.12 Comparación del precio de 1m3 de H-35 r a/c=0.45 con aditivo impermeabilizante.



Fuente Elaboración propia.

4.3. Análisis de Comparativo de Resultados.

Se compararán los resultados de los ensayos de laboratorio en relación con la permeabilidad mediante un análisis detallado.

4.3.1. Relación entre Permeabilidad y Filtración.

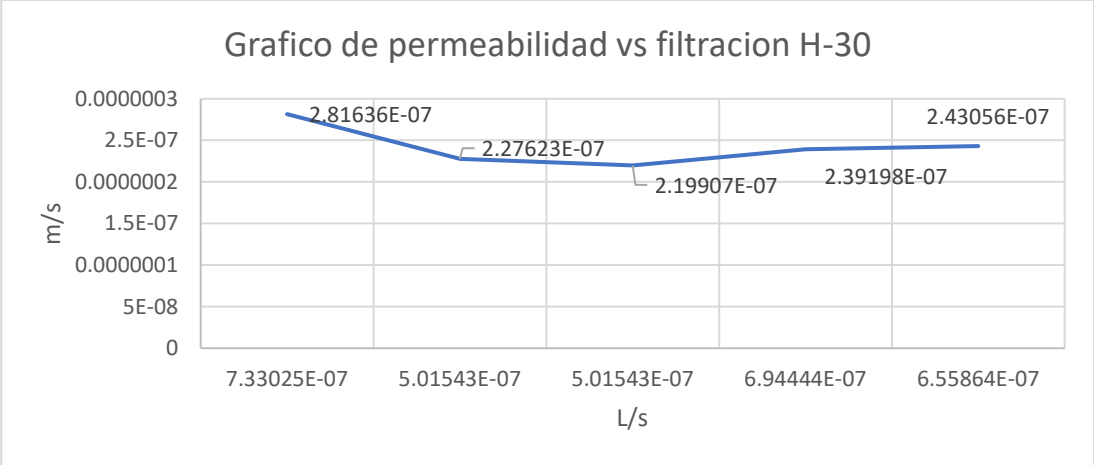
El análisis comparativo de los resultados de los ensayos de laboratorio se centró en la comparación de la permeabilidad (m/s) y la filtración (L/s). A partir de estos datos, se elaboraron los gráficos correspondientes para ilustrar las variaciones observadas.

Tabla 4.19 Comparación de la permeabilidad vs filtración H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.8164E-07	2.2762E-07	2.1991E-07	2.392E-07	2.4306E-07
Filtracion (L/s)	7.3302E-07	5.0154E-07	5.0154E-07	6.9444E-07	6.5586E-07

Fuente: Elaboración Propia

Figura 4.13 Comparación de la permeabilidad vs filtración H-30 r a/c = 0.50.



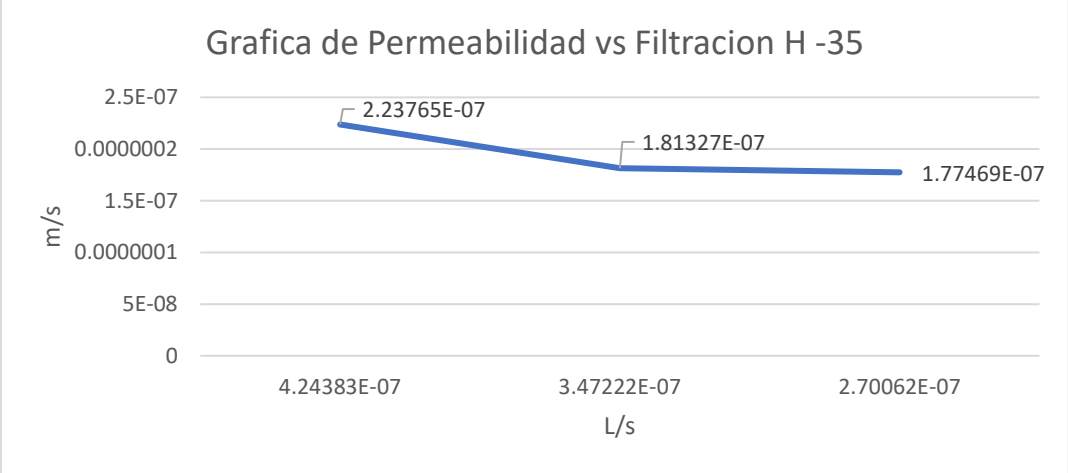
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.20 Comparación de la permeabilidad vs filtración H-35 r a/c = 0.45.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.2377E-07	1.8133E-07	1.7747E-07
Filtracion (L/s)	4.2438E-07	3.4722E-07	2.7006E-07

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.14 Comparación de la permeabilidad vs filtración H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de los resultados reveló que existe una relación directa entre la permeabilidad y la tasa de filtración. Se observó que las probetas con las menores tasas de filtración correspondían a aquellas que contenían aditivos en concentraciones del 1% y 2%. Los datos obtenidos mediante buretas de 1.5 litros confirmaron que estas concentraciones resultaron en la filtración mínima de agua, lo que valida la hipótesis de que una menor permeabilidad está vinculada a una reducción en la tasa de filtración. Además, se pudo observar una variación significativa al reducir la relación agua/cemento, lo cual dio como resultado una menor permeabilidad y, consecuentemente, una filtración más baja del agua.

4.3.2. Relación entre Permeabilidad y Resistencia a Compresión del Hormigón.

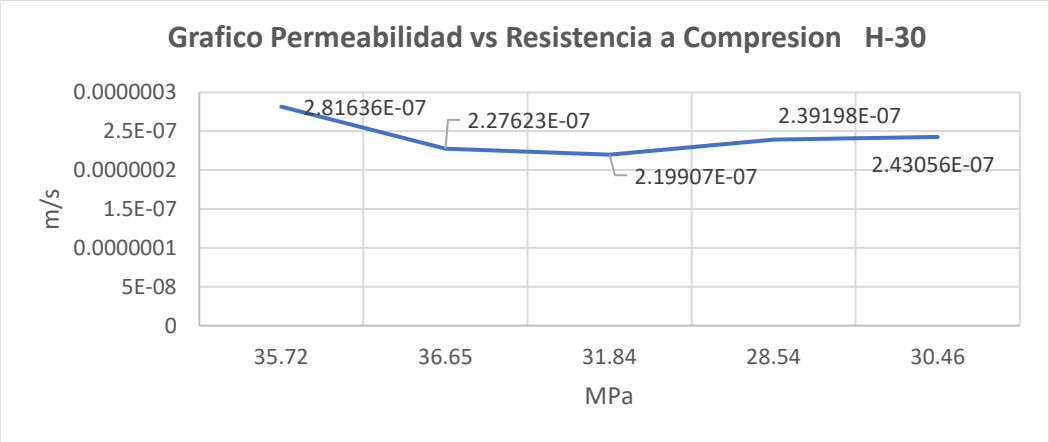
Se llevó a cabo un análisis comparativo entre la permeabilidad y la resistencia a la compresión, observando cómo varían en función de la relación agua/cemento y de la incorporación de diferentes porcentajes de aditivo.

Tabla 4.21 Comparación de la Permeabilidad vs Resistencia a Compresión H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.8164E-07	2.2762E-07	2.1991E-07	2.392E-07	2.4306E-07
Resistencia (MPa)	35.72	36.65	31.84	28.54	30.46

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.15 Comparación de la Permeabilidad vs Resistencia a Compresión H-30 r a/c = 0.50.



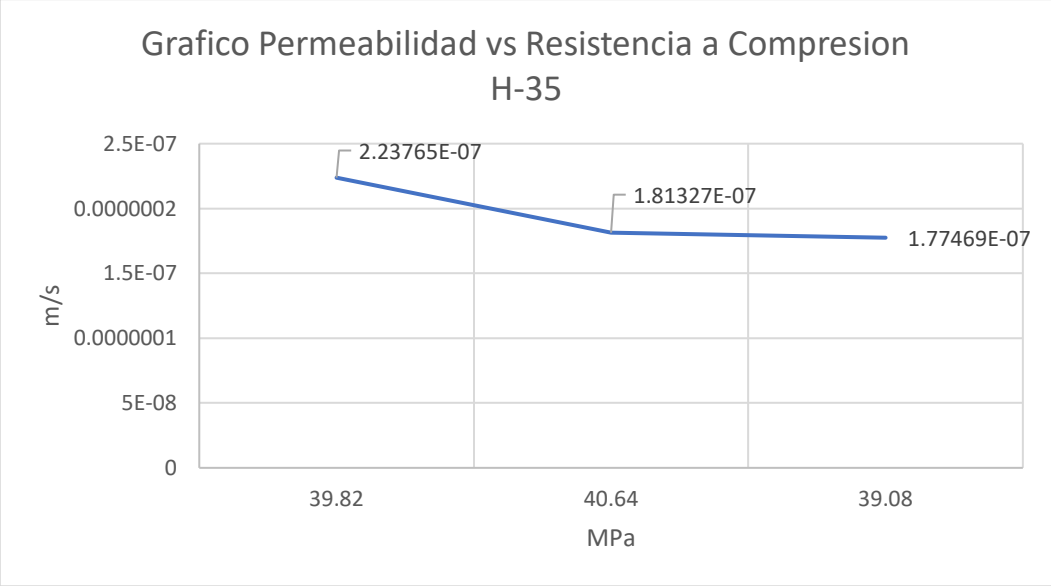
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.22 Comparación de la Permeabilidad vs Resistencia a Compresión H-35 r a/c = 0.45.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.2377E-07	1.8133E-07	1.7747E-07
Resistencia (MPa)	39.82	40.64	39.08

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.16 Comparación de la Permeabilidad vs Resistencia a Compresión H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

Se observó una disminución en la resistencia del material cuando se utilizó un exceso de aditivo. Por lo tanto, se recomienda seguir las indicaciones del fabricante y no exceder las cantidades sugeridas.

4.3.3. Relación entre Permeabilidad y Aire Ocluido en el Hormigón.

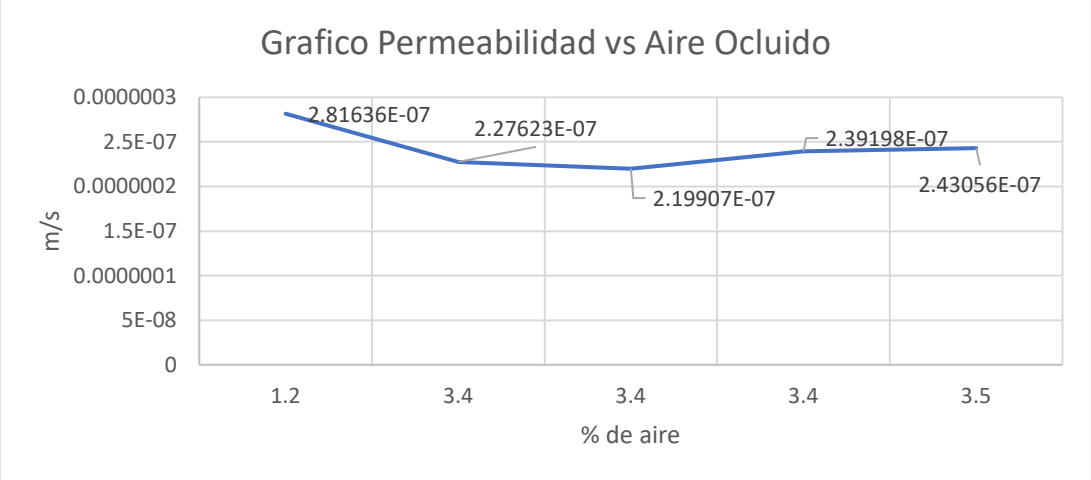
Se realizaron ensayos para analizar la permeabilidad y el contenido de aire ocluido, en los cuales se evaluó cómo varían estos parámetros en función de los diferentes porcentajes de aditivo utilizados.

Tabla 4.23 Comparación de la Permeabilidad vs Aire Ocluido H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.816E-07	2.276E-07	2.199E-07	2.392E-07	2.431E-07
Aire ocluido (%)	1.2	3.4	3.4	3.4	3.5

Fuente Elaboración propia.

Figura 4.17 Comparación de la Permeabilidad vs Aire Ocluido H-30 r a/c = 0.50.



Fuente Elaboración propia.

El aire ocluido genera pequeñas burbujas distribuidas de manera uniforme en la mezcla, interrumpiendo la red capilar y reduciendo así la permeabilidad del hormigón, ya que dificulta el paso del agua a través de sus poros. Como se observa en el gráfico, al incrementar el contenido de aire ocluido en el hormigón, logrado mediante la

incorporación del aditivo, se mejora la permeabilidad, alcanzando su máximo beneficio hasta el porcentaje recomendado por el fabricante.

4.3.4. Relación entre Permeabilidad y Asentamiento de la Mezcla.

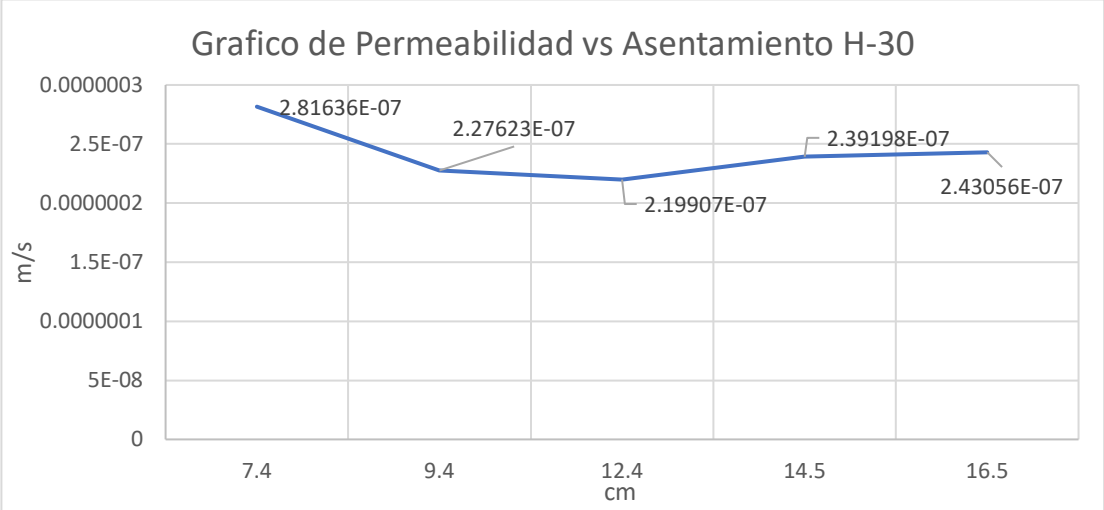
Para el análisis de la permeabilidad y el asentamiento utilizando el método de cono de Abrams, se evaluaron distintas relaciones agua/cemento, así como diversos porcentajes de aditivo impermeabilizante.

Tabla 4.24 Comparación de la Permeabilidad vs Asentamiento H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.816E-07	2.276E-07	2.199E-07	2.392E-07	2.431E-07
Asentamiento (cm)	7.4	9.4	12.4	14.5	16.5

Fuente Elaboración propia.

Figura 4.18 Comparación de la Permeabilidad vs Asentamiento H-30 r a/c = 0.50.



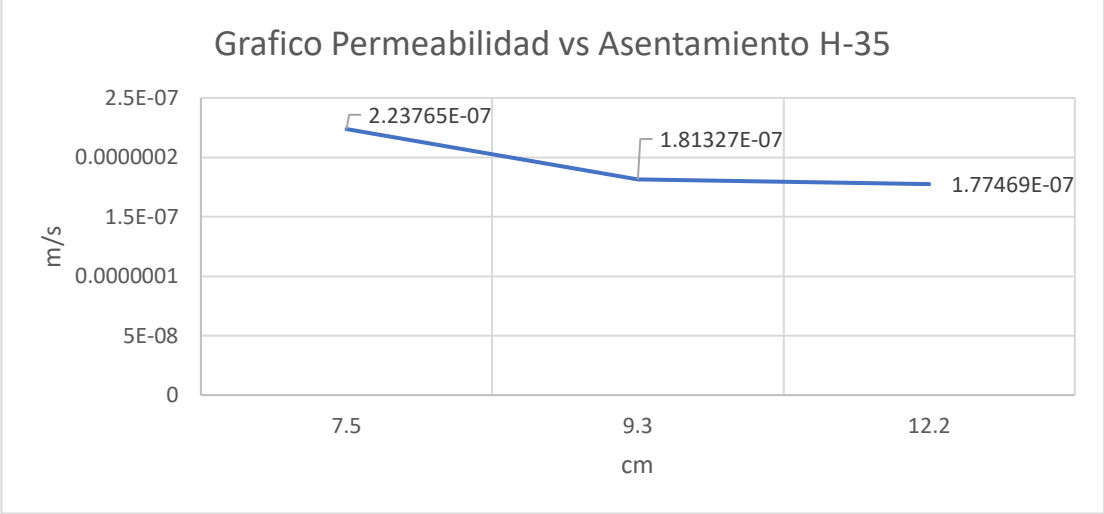
Fuente Elaboración propia.

Tabla 4.25 Comparación de la Permeabilidad vs Asentamiento H-35 r a/c = 0.45.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.238E-07	1.813E-07	1.775E-07
Asentamiento (cm)	7.5	9.3	12.2

Fuente Elaboración propia.

Figura 4.19 Comparación de la Permeabilidad vs Asentamiento H-35 r a/c = 0.45.



Fuente Elaboración propia.

Este enfoque gráfico facilitará la identificación de posibles correlaciones entre el asentamiento y la permeabilidad del hormigón. Un aumento en el asentamiento puede ser indicativo de un mayor contenido de agua en la mezcla, lo que, en general, conduce a un incremento en la permeabilidad, ya que el exceso de agua favorece la formación de poros más grandes en el hormigón.

4.3.5. Relación entre Permeabilidad y el Costo del Hormigón.

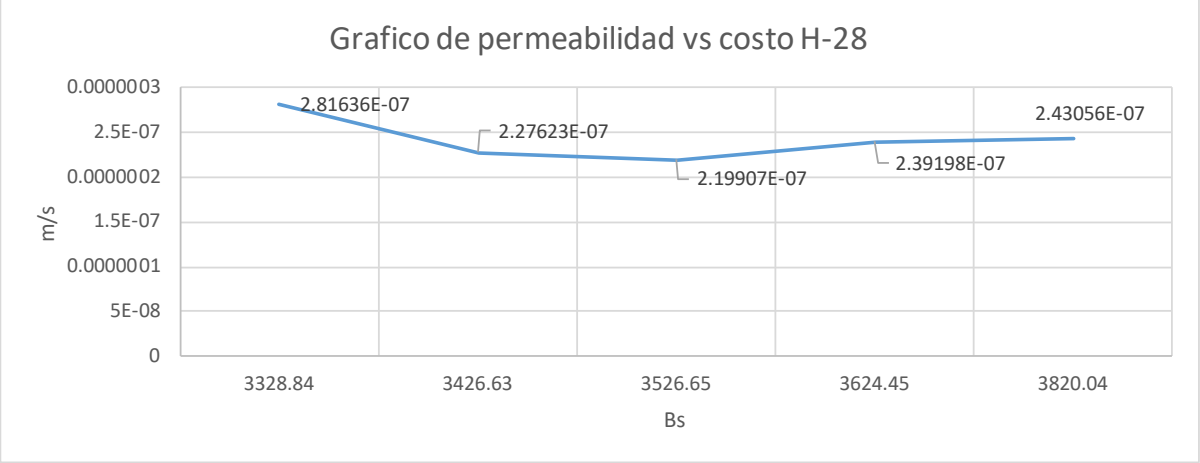
Se presenta un análisis comparativo de la permeabilidad y el costo del hormigón, en el que, en función de la relación agua/cemento y los porcentajes de aditivos utilizados, se generaron los siguientes gráficos:

Tabla 4.26 Comparación de la Permeabilidad vs Costo H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.82E-07	2.28E-07	2.2E-07	2.39E-07	2.43E-07
Costo 1m3 (Bs)	3328.84	3426.63	3526.65	3624.45	3820.04

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.20 Comparación de la Permeabilidad vs Costo H-30 r a/c = 0.50.



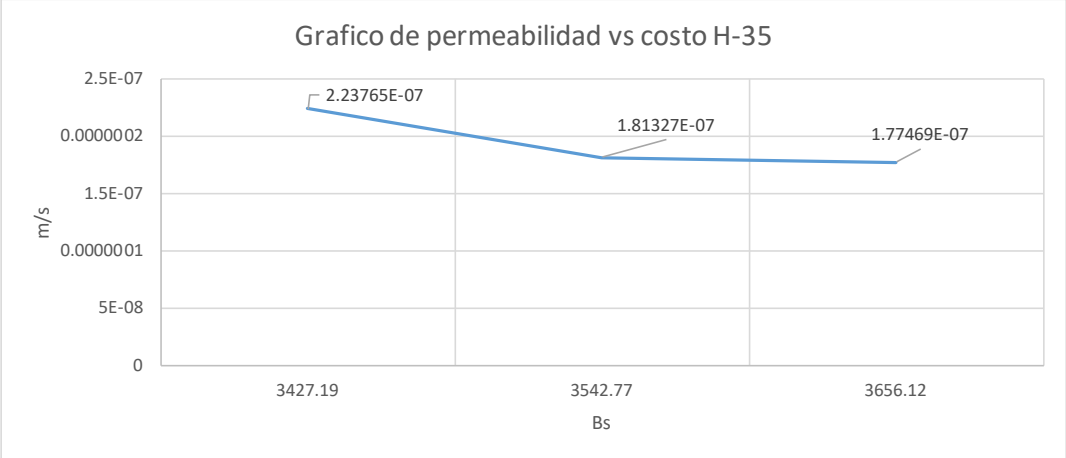
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.27 Comparación de la Permeabilidad vs Costo H-35 r a/c = 0.45.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo
Permeabilidad (m/s)	2.24E-07	1.81E-07	1.77E-07
Costo 1m3 (Bs)	3427.19	3542.77	3656.12

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.21 Comparación de la Permeabilidad vs Costo H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

Este enfoque permitirá visualizar la posible correlación entre la permeabilidad del hormigón y su costo, mostrando cómo las variaciones en la composición influyen en ambos factores.

4.3.6. Análisis Costo – Beneficio de la Propuesta.

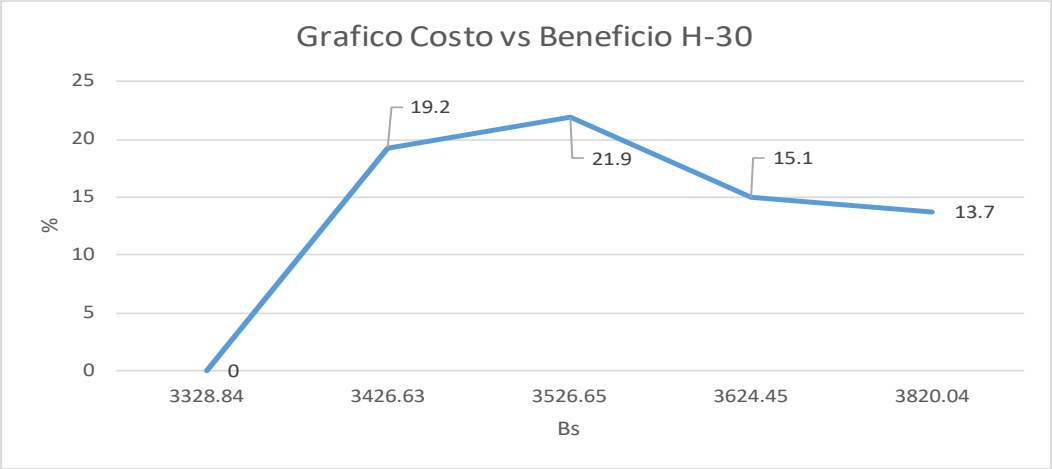
Se analizó el beneficio del aditivo impermeabilizante, evaluando sus características en función de diferentes relaciones agua/cemento y diversos porcentajes del aditivo. Este análisis permitió observar cómo la incorporación del aditivo influye en la permeabilidad y las propiedades del hormigón.

Tabla 4.28 Comparación del Costo vs Beneficio H-30 r a/c = 0.50.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo	3% aditivo	5% aditivo
Costo (Bs)	3328.84	3426.63	3526.65	3624.45	3820.04
Beneficio (%)	0	19.2	21.9	15.1	13.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.22 Comparación del Costo vs Beneficio H-30 r a/c = 0.50.



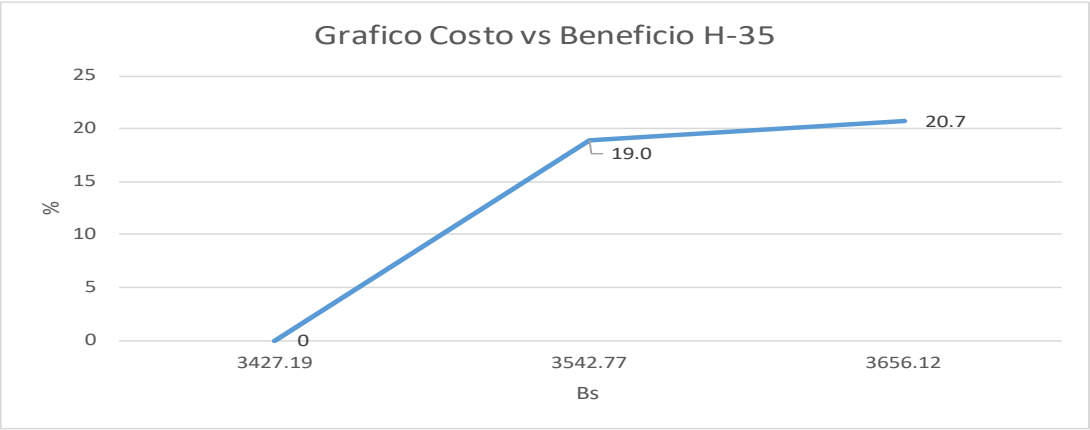
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.29 Comparación del Costo vs Beneficio H-35 r a/c = 0.45.

Datos	Patron	1% aditivo	2% aditivo
Costo (Bs)	3427.19	3542.77	3656.12
Beneficio (%)	0	19.0	20.7

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4.23 Comparación del Costo vs Beneficio H-35 r a/c = 0.45.



Fuente: Elaboración propia.

Los beneficios a largo plazo, como la reducción de los costos de mantenimiento, aumentan con el tiempo a medida que mejora la durabilidad del hormigón. Con el paso de los años, la curva de beneficios superará la curva de costos iniciales, lo que demuestra que la inversión en el aditivo impermeabilizante Sika CEM es rentable a largo plazo al disminuir los gastos de mantenimiento.

4.4. Análisis de Aplicación de Resultados.

La investigación realizada se centra en el análisis del hormigón elaborado con un aditivo impermeabilizante, utilizando dos tipos de hormigón: H-30 con relación a/c = 0.50 y H-35 con relación a/c = 0.45. Se realizaron 12 pruebas de permeabilidad por cada porcentaje de aditivo, obteniendo mejoras significativas en los porcentajes de 1% y 2% de adición, con incrementos en la resistencia a la permeabilidad del 19.2% y 21.9%, respectivamente. Además, se observó que el aditivo mejora la trabajabilidad del hormigón sin afectar su resistencia.

En la práctica, el uso del aditivo ofrece múltiples beneficios, como un aumento en la vida útil del hormigón y una mejora en su calidad, eliminando la necesidad de reparaciones frecuentes, lo que resulta ventajoso tanto para la empresa como para el propietario. El aditivo es ideal para obras de hormigón que requieren resistencia al agua constante, tales como:

- Canales, diques, estructuras de fundación, vigas, cisternas, piscinas, sótanos, tanques de agua, cimentaciones, muros, jardineras, etc.
- Cualquier tipo de estructura que necesite impermeabilización.
- Estructuras enterradas en contacto permanente con el agua.

Los resultados obtenidos de esta investigación pueden influir en las decisiones de diseño y materialización de proyectos. Es importante destacar que el uso adecuado de este aditivo, en las cantidades recomendadas por el fabricante, aumenta la durabilidad del hormigón y reduce los costos de mantenimiento, ya que cantidades excesivas pueden disminuir sus propiedades impermeabilizantes.

4.5. Contrastación de Hipótesis.

Los ensayos de laboratorio confirmaron que la adición del aditivo impermeabilizante 'SikaCem Impermeable' mejora la impermeabilidad del hormigón de la siguiente manera: para el hormigón H-30, se observó una mejora del 19.2% con un 1% de aditivo, del 21.9% con un 2% de aditivo, del 15.1% con un 3% de aditivo y del 13.7% con un 5% de aditivo. En el caso del hormigón H-35, la mejora fue del 19.0% con un 1% de aditivo y del 20.7% con un 2% de aditivo, en términos de resistencia a la penetración del agua. Estos resultados cumplen parcialmente con la hipótesis planteada, que proponía una reducción de la permeabilidad hasta en un 30%.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El análisis de la permeabilidad en el hormigón con aditivo impermeabilizante ha demostrado que la inclusión de cantidades controladas de aditivo puede afectar significativamente los parámetros físico-mecánicos del hormigón, particularmente en su permeabilidad. Este estudio confirma que el uso adecuado del aditivo puede mejorar la impermeabilidad del hormigón sin comprometer su resistencia estructural.
- La caracterización detallada de los materiales ha permitido comprender su comportamiento dentro de la mezcla, lo cual es fundamental para optimizar la dosificación y asegurar la calidad del hormigón.
- El análisis del aditivo 'SikaCem Impermeable BO' demostró que, cuando se aplica de acuerdo con las normativas, puede mejorar significativamente la impermeabilidad del hormigón, aumentando su capacidad de resistencia a la penetración de agua.
- Las pruebas con diferentes dosificaciones (1%, 2%, 3%, y 5%) en el hormigón H-30 y (1% y 2%) en el hormigón H-35 mostraron una correlación directa entre la cantidad de aditivo y la reducción de la permeabilidad, con un impacto mínimo en la resistencia a compresión.
- El análisis comparativo demuestra que el hormigón con aditivo ofrece una mejor impermeabilidad, especialmente con dosificaciones del 2%, sin alterar de manera significativa las propiedades mecánicas. Se observó una mejora del 21.9% en la impermeabilidad del hormigón H-30 con relación agua/cemento (a/c) de 0.50, y un incremento del 20.7% en el H-35 con relación agua/cemento a/c de 0.45.
- Se concluye que el uso de aditivos impermeabilizantes como el 'SikaCem Impermeable BO' resulta beneficioso para proyectos que demandan alta durabilidad y resistencia al agua. Se puede recomendar su aplicación en proporciones adecuadas para maximizar la efectividad del aditivo sin comprometer la integridad del hormigón.

- El aporte académico de esta investigación tiene aplicaciones prácticas significativas. En la construcción de infraestructuras expuestas a condiciones severas, el uso de aditivos impermeabilizantes puede prolongar la vida útil del hormigón y reducir la necesidad de reparaciones costosas. Este estudio proporciona una comprensión más detallada de la dosificación óptima y la aplicación efectiva del aditivo, lo que permite a los ingenieros tomar decisiones informadas para mejorar el desempeño del hormigón en condiciones reales.
- Además, el aporte académico de esta investigación contribuye a la mejorar los estándares técnicos al proporcionar datos empíricos sobre la eficacia de los aditivos impermeabilizantes: proyectos de ingeniería. En resumen, este trabajo no solo abarca el conocimiento científico, sino que también ofrece herramientas prácticas para la implementar efectivas soluciones impermeabilizantes en la ingeniería civil.

5.2. Recomendaciones

- Asegurar de que estos materiales cumplan con las normas y estándares establecidos para el uso de aditivos impermeabilizantes para garantizar la precisión de resultados.
- Se recomienda utilizar el aditivo impermeabilizante "SikaCem Impermeable BO" en dosis del 2% en relación al contenido de cemento. Esta proporción ha demostrado ser eficaz para mejorar la impermeabilidad del hormigón sin afectar significativamente su resistencia a compresión, y el aumento de la dosis más allá de este nivel no proporciona beneficios adicionales notables en términos de impermeabilidad.
- Se recomienda, para futuras investigaciones, experimentar con diferentes tipos de cemento para evaluar su impacto en los estudios realizados.
- Realizar verificaciones mediante ensayos de laboratorio en diversas regiones, ya que las características ambientales pueden variar significativamente a lo largo de Bolivia.

- Evitar relaciones de agua/cemento tan bajas. Esto se debe a que una relación excesivamente baja puede generar una porosidad no controlada, lo que puede aumentar la permeabilidad del hormigón y comprometer su durabilidad.