

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DEL CONCRETO F'C=280 KG/CM2 CON ADITIVOS
IMPERMEABILIZANTES POR CRISTALIZACIÓN**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

**JOSÉ LUIS RAMOS DELGADO
ID: 0000-0002-4278-5446**

ASESOR

**Mag. OSCAR GUILLERMO MIRANDA HOSPINAL
ID: 0000-0002-0949-5295**

LIMA - PERÚ

2025

© 2025, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

RAMOS DELGADO, José Luis

jose.ramos.d@uni.pe

(+51) 992738288

Dedicatoria

A mis padres Lenin y Lucy

A Milagros y mi hija Valeria

Por ser mi fuente de disciplina, motivación y amor inmenso.

Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi agradecimiento al asesor Ing. Oscar Guillermo Miranda Hospinal por su apoyo y asesoramiento en la orientación de la presente investigación. Al Laboratorio N°1: Laboratorio de Ensayo de Materiales Manuel Gonzales de la Cotera (LEM UNI) por prestar sus instalaciones y máquinas para desarrollar ensayos de permeabilidad; del mismo modo, agradezco al Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción (CITEMAC) por prestarme sus instalaciones para realizar mis mezclas de concreto, curar las probetas y realizar los ensayos a compresión de estas.

Resumen

La presente investigación titulada “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL CONCRETO F’C=280 KG/CM² CON ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES POR CRISTALIZACIÓN” tuvo como objetivo determinar la influencia de los aditivos impermeabilizantes por cristalización en la permeabilidad y la resistencia a la compresión axial del concreto elaborado con cemento tipo HS.

El estudio comenzó con la elaboración de un diseño patrón con una relación agua-cemento de 0.45 y un nivel de asentamiento entre 3” y 4”, utilizando el método de diseño ACI. Para ello, se emplearon agregados finos y gruesos, previamente ensayados para determinar sus propiedades. Posteriormente, se incorporaron tres aditivos impermeabilizantes en cuatro dosificaciones diferentes, generando un total de 13 diseños sobre los cuales se llevaron a cabo ensayos para evaluar la influencia de los aditivos impermeabilizantes por cristalización.

Los ensayos fueron realizados tanto en estado fresco como endurecido, enfocándose en parámetros como el asentamiento, el contenido de aire, el peso unitario, la resistencia a la compresión y la profundidad de penetración del agua. Los resultados mostraron que la adición de los aditivos impermeabilizantes por cristalización mejora significativamente la impermeabilidad del concreto, reduciendo la penetración de agua en más del 50% en algunas dosificaciones. En cuanto a la resistencia a la compresión, se observaron incrementos de hasta un 9.00% respecto a la mezcla patrón, dependiendo del tipo y la cantidad de aditivo empleado. Sin embargo, no fue posible identificar una relación significativa entre la dosificación y este incremento de resistencia, ni se pudo afirmar que el aditivo impermeabilizante por cristalización influya de manera significativa en la resistencia a la compresión. Del mismo modo, las propiedades del concreto en estado fresco con aditivos no presentaron variaciones importantes en comparación con la mezcla patrón.

Palabras claves: Concreto, cemento tipo HS, aditivo impermeabilizante por cristalización, permeabilidad, resistencia a la compresión.

Abstract

This research, titled “COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE F'C = 280 KG/CM² WITH CRYSTALLIZATION WATERPROOFING ADDITIVES” aimed to evaluate the influence of crystalline waterproofing admixtures on the permeability and axial compressive strength of concrete made with Type HS cement.

The study began with the development of a standard mix design, using a water-cement ratio of 0.45 and a slump range of 3” to 4”, following the ACI design method. Fine and coarse aggregates, previously tested to determine their properties, were used. Subsequently, three waterproofing admixtures were incorporated at four different dosages, generating a total of 13 designs. Tests were conducted on these designs to assess the influence of crystalline waterproofing admixtures.

Testing was carried out in both fresh and hardened states, focusing on parameters such as slump, air content, unit weight, compressive strength, and water penetration depth. The results showed that the addition of crystalline waterproofing admixtures significantly enhanced the impermeability of the concrete, reducing water penetration by over 50% in some dosages. In terms of compressive strength, increases of up to 9.00% were observed compared to the control mix, depending on the type and amount of admixture used. However, no significant relationship was established between dosage and this strength increase, nor was it confirmed that crystalline waterproofing admixtures had a notable impact on compressive strength. Similarly, the properties of fresh concrete with admixtures showed no substantial variations compared to the control mix.

Keywords: Concrete, type HS cement, crystalline waterproofing admixture, permeability, compressive strength.

Tabla de Contenido

Página

Resumen	v
Abstract.....	vi
Prólogo.....	xvi
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos.....	3
1.3 Objetivos del estudio.....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.4.1 Hipótesis general.....	3
1.4.2 Hipótesis específicas.....	4
1.5 Antecedentes investigativos.....	4
1.5.1 Antecedentes Nacionales.....	4
1.5.2 Antecedentes Internacionales.....	6
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	8
2.1 Concreto.....	8
2.1.1 Durabilidad.....	8
2.1.2 Patologías en el concreto.....	9
2.1.3 Absorción capilar.....	10
2.1.4 Permeabilidad.....	11
2.2 Estructura interna.....	11
2.2.1 Pasta de cemento hidratada.....	11
2.3 Componentes del concreto.....	13
2.3.1 Cemento.....	13
2.3.2 Agregados.....	15
2.3.3 Agua.....	17
2.3.4 Aditivo.....	18
2.4 Preparación del concreto.....	20
2.5 Propiedades del concreto fresco.....	20
2.5.1 Asentamiento (NTP 339.035 / ASTM C 143).....	20
2.5.2 Peso Unitario (NTP 339.046 / ASTM C138).....	21
2.5.3 Contenido de aire (NTP 339.080 / ASTM C231).....	21
2.5.4 Temperatura (NTP 339.184 / ASTM C1064).....	22

2.6	Propiedades del concreto endurecido	22
2.6.1	Resistencia a la compresión axial (NTP 339.034 / ASTM C39).....	23
2.6.2	Profundidad de penetración (NTC 4483 / ASTM C1202).....	23
Capítulo III. Diseño de mezclas.....		25
3.1	Generalidades.....	25
3.1.1	Criterios de diseño	25
3.1.2	Resumen de método de diseño ACI.....	26
3.2	Características de los materiales utilizados.....	27
3.2.1	Cemento	27
3.2.2	Agregados	27
3.2.3	Agua	28
3.2.4	Aditivos impermeabilizantes por cristalización.....	28
3.3	Diseño de mezcla según método ACI	31
3.3.1	Método de diseño de mezcla	31
3.3.2	Diseño de muestra patrón.....	36
3.3.3	Diseño de muestra patrón con aditivos impermeabilizantes	36
3.3.4	Codificación de diseños de mezcla	38
Capítulo IV. Ensayos y resultados.....		39
4.1	Generalidades.....	39
4.1.1	Ubicación de los ensayos	39
4.1.2	Fecha de los ensayos	39
4.2	Ensayos del concreto en estado fresco.....	40
4.2.1	Temperatura	40
4.2.2	Asentamiento (Slump).....	40
4.2.3	Peso Unitario y Contenido de aire.....	41
4.3	Ensayos del concreto en estado endurecido	42
4.3.1	Resistencia a la compresión axial	42
4.3.2	Profundidad de penetración	50
Capítulo V. Análisis comparativo y discusión		52
5.1	Análisis comparativo	52
5.1.1	Concreto en estado fresco	52
5.1.2	Concreto en estado endurecido	56
5.2	Discusión	80
5.2.1	Comparación de resultados	80
5.2.2	Efectos sobre la permeabilidad	84
5.2.3	Efecto sobre la resistencia a la compresión	87
5.2.4	Efecto sobre propiedades en estado fresco	88
Conclusiones		89
Recomendaciones		90

Referencias Bibliográficas	92
Anexos.....	97

Lista de Tablas

	Página
Tabla 1. Parámetros granulométricos del agregado fino	17
Tabla 2. Requisitos para el agua	18
Tabla 3. Contenido de aire en mezclas de concreto	22
Tabla 4. Características físicas de los agregados finos y gruesos	28
Tabla 5. Especificaciones aditivo Penetron Admix	29
Tabla 6. Especificaciones aditivo Krystol Internal Membran (KIM)	29
Tabla 7. Especificaciones aditivo Idrocrete Kr 1000	30
Tabla 8. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar	31
Tabla 9. Contenido de aire en mezclas de concreto	32
Tabla 10. Volumen unitario de agua en mezclas de concreto	32
Tabla 11. Relación agua-cemento por resistencia	33
Tabla 12. Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto	33
Tabla 13. Volumen de agua, cemento, aire y piedra en mezcla seca.....	34
Tabla 14. Peso de los componentes de la mezcla seca.....	35
Tabla 15. Peso de los componentes de la mezcla en condiciones húmedas	35
Tabla 16. Peso de los componentes de la mezcla patrón	36
Tabla 17. Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 0.5% del peso del cemento.....	36
Tabla 18. Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 1% del peso del cemento.....	37
Tabla 19. Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 1.5% del peso del cemento.....	37
Tabla 20. Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 2% del peso del cemento.....	37
Tabla 21. Codificación de mezclas con aditivos impermeabilizantes.....	38
Tabla 22. Temperatura y asentamiento de las mezclas de concreto (año 2024).....	40
Tabla 23. Peso unitario y contenido de aire de las mezclas de concreto (año 2024)	41
Tabla 24. Resistencia a la compresión de la mezcla patrón (año 2024).....	42
Tabla 25. Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 1 (año 2024)	43
Tabla 26. Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 2 (año 2024)	45
Tabla 27. Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 3 (año 2024)	47
Tabla 28. Resumen de la resistencia a la compresión de las mezclas	49
Tabla 29. Profundidad de penetración del agua (año 2024).....	50

Tabla 30. Comparación de temperatura de mezclas en estado fresco	52
Tabla 31. Comparación del asentamiento de las mezclas en estado fresco	53
Tabla 32. Variación de peso unitario de mezclas	54
Tabla 33. Variación de contenido de aire de mezclas	55
Tabla 34. Variación en la resistencia a la compresión axial en las mezclas para 3, 7 y 28 días de curado	57
Tabla 35. Variación de profundidad de penetración en diseños de mezcla	76
Tabla 36. Profundidad de penetración ordenada de manera ascendente	76
Tabla 37. Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 0.50% del peso del cemento	80
Tabla 38. Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 1.00% del peso del cemento	81
Tabla 39. Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 1.50% del peso del cemento	82
Tabla 40. Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 2.00% del peso del cemento	83

Lista de Figuras

	Página
Figura 1. Estructura con patología Reacción Álcali-Agregado.....	10
Figura 2. Representación del desarrollo microestructural en pastas de cemento Portland. Se omiten las partículas finas para mayor claridad	12
Figura 3. Conformación de la estructura porosa del concreto	13
Figura 4. Esquema resumen del método de diseño de mezclas ACI	26
Figura 5. Cemento Andino Ultra Portland Tipo HS/MH/R.....	27
Figura 6. Temperatura de las mezclas en estado fresco.....	53
Figura 7. Asentamiento de las mezclas en estado fresco	54
Figura 8. Peso unitario de mezclas	55
Figura 9. Contenido de aire de mezclas.....	56
Figura 10. Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con tres días de curado	57
Figura 11. Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con siete días de curado	58
Figura 12. Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con veintiocho días de curado.....	58
Figura 13. Desarrollo de resistencia de concreto patrón	59
Figura 14. Porcentaje de desarrollo de resistencia de concreto patrón en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$).....	59
Figura 15. Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M1 y patrón.....	60
Figura 16. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón.....	60
Figura 17. Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M2 y patrón.....	61
Figura 18. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón.....	61
Figura 19. Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M3 y patrón.....	62
Figura 20. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón.....	62
Figura 21. Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M4 y patrón.....	63
Figura 22. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón.....	63
Figura 23. Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M1 y patrón.....	64
Figura 24. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón.....	64
Figura 25. Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M2 y patrón.....	65

Figura 26. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	65
Figura 27. Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M3 y patrón.....	66
Figura 28. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	66
Figura 29. Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M4 y patrón.....	67
Figura 30. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	67
Figura 31. Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M1 y patrón.....	68
Figura 32. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	68
Figura 33. Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M2 y patrón.....	69
Figura 34. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	69
Figura 35. Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M3 y patrón.....	70
Figura 36. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	70
Figura 37. Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M4 y patrón.....	71
Figura 38. Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón	71
Figura 39. Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 1 y mezcla patrón	72
Figura 40. Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 2 y mezcla patrón	73
Figura 41. Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 3 y mezcla patrón	74
Figura 42. Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas de la investigación.....	75
Figura 43. Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 1	77
Figura 44. Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 1 en comparación a mezcla patrón	77
Figura 45. Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 2	78
Figura 46. Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 2 en comparación a mezcla patrón	78
Figura 47. Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 3	79
Figura 48. Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 3 en comparación a mezcla patrón	79

Figura 49. Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 1 en distintas dosificaciones	85
Figura 50. Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 2 en distintas dosificaciones	85
Figura 51. Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 3 en distintas dosificaciones	86

Lista de símbolos y siglas

°C	: Grados Celsius
a/c	: Agua/cemento
ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: American Society for Testing and Materials
CITEMAC	: Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción EIRL
HSC	: Hidrato de silicato de calcio
ICONTEC	: Instituto Colombiano de Normas Técnicas
INACAL	: Instituto Nacional de Calidad
LEM	: Laboratorio N°1 de Ensayos de Materiales “Ing. Manuel Gonzales de la Cotera”
MPa	: Mega Pascal
NTC	: Norma Técnica Colombiana
NTP	: Norma técnica peruana
OMS	: Organización Mundial de la Salud
PCH	: Pasta de Cemento Hidratado
PTAP	: Planta de Tratamiento de Agua Potable
PTAR	: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
RAA	: Reacción Álcali Agregado
SSS	: Superficialmente seco
Tipo HS	: Alta Resistencia a los sulfatos
TMN	: Tamaño Máximo Nominal
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
A	: Área de la sección normal a la carga
P	: Carga máxima de rotura
$f'c$: Resistencia especificada a la compresión del concreto
$f'cr$: Resistencia promedio a la compresión del concreto

Prólogo

La presente investigación surge como respuesta a una necesidad latente en el sector de la construcción: mejorar la durabilidad del concreto expuesto a condiciones agresivas de humedad, presión hidrostática y agentes químicos como los sulfatos y cloruros. A lo largo de la historia de la ingeniería civil, el concreto ha demostrado ser un material fundamental en la edificación de infraestructuras, sin embargo, sus limitaciones frente a la permeabilidad y las patologías asociadas han motivado la búsqueda constante de soluciones innovadoras.

Este estudio fue realizado con el propósito de evaluar de manera experimental la influencia de los aditivos impermeabilizantes por cristalización sobre las propiedades físicas y mecánicas del concreto, bajo condiciones de presión hidrostáticas que simulan las exigencias del entorno real. La selección de cemento tipo HS, los criterios de diseño de mezclas, y los ensayos realizados responden a un enfoque técnico riguroso, orientado a contribuir con conocimiento práctico y verificable, especialmente en el contexto nacional, donde aún no existe regulación específica sobre este tipo de aditivos.

El camino recorrido durante el desarrollo de esta tesis ha sido desafiante y enriquecedor. No solo ha permitido aplicar conocimientos adquiridos en la formación académica, sino también desarrollar competencias en investigación, análisis crítico, y solución de problemas concretos del campo de la Ingeniería Civil.

Finalmente, este trabajo representa un aporte a la formación profesional del autor, pero también busca convertirse en una referencia útil para futuros investigadores, docentes y profesionales interesados en mejorar el desempeño del concreto y optimizar la calidad de las obras civiles.

Mag. Oscar Guillermo Miranda Hospinal
Asesor

Capítulo I. Introducción

1.1 Generalidades

La industria de la construcción enfrenta un gran desafío debido a la alta incidencia de problemas de impermeabilización en las estructuras de concreto. Las estructuras de concreto suelen presentar algún tipo de fisura o grieta, lo que genera costos significativos por reparaciones y reconstrucciones, además de un impacto ambiental considerable por la demolición y reconstrucción de estructuras (en casos extremos). En este contexto, la presente investigación busca determinar la influencia del aditivo impermeabilizante por cristalización en la resistencia a la compresión axial y la permeabilidad del concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ con cemento tipo HS, con el objetivo de brindar una alternativa eficaz y sostenible para mejorar la durabilidad de las estructuras de concreto. A diferencia de investigaciones previas, este estudio evalúa el comportamiento de tres aditivos impermeabilizantes por cristalización y analiza su influencia en las propiedades mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan al desarrollo de mezclas de concreto más impermeables y resistentes, reduciendo así los costos de mantenimiento y el impacto ambiental de la industria de la construcción.

1.2 Descripción del problema de investigación

El concreto expuesto a factores físicos, biológicos, químicos y ambientales sufre cambios perjudiciales como fisuras, eflorescencias, grietas y corrosión. La humedad y el dióxido de carbono (CO_2) reducen el pH del concreto, provocando patologías como la corrosión del acero y la carbonatación, que disminuyen sus propiedades mecánicas (Brito, 2005). A nivel mundial, los ingenieros civiles buscan prolongar la durabilidad de las estructuras afectadas por la humedad y otros agentes, que penetran los poros del concreto y causan daños, como la reducción de resistencia a la compresión axial (Chiné et al., 2019).

La humedad representa un desafío significativo para la durabilidad de las estructuras de concreto, especialmente en aquellas relacionadas con el saneamiento. Un ejemplo claro de esta problemática se observa en Colombia, donde la planta sedimentadora de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Cañaveralejo, constantemente expuesta a agua, cloruros y sulfatos, presentó fisuras y una notable carbonatación. Estas condiciones obligaron a realizar reparaciones profundas, que incluyeron la remoción de capas superficiales deterioradas y la aplicación de recubrimientos impermeables en mortero (Bastidas y Carvajal, 2019). De manera similar, en Perú, la evaluación de las estructuras de la Planta de Tratamiento de Agua Potable

(PTAP) en Bellavista, Piura, en 2018, indicó la presencia de grietas, filtraciones, fisuras y corrosión-carbonatación. Esta última, conocida como el "cáncer del concreto", fue identificada como la patología más crítica (Zapata, 2018).

En obras de excavación subterránea con condiciones hidrológicas aceptables, los túneles presentan fenómenos de goteo e irrupción de agua. Aunque es imposible construir túneles estancos, existen metodologías para reducir el efecto. En países de la región, parte de los túneles importantes construidos emplearon impermeabilización con concreto, particularmente en Colombia, esto sucede con más del 20% de los túneles (Ruiz, 2018). En Perú, un estudio del túnel del río Asana ubicado en Torata, Moquegua, arrojó resultados que confirmaron el efecto de la humedad en las estructuras de concreto de apoyo del río. Las diamantinas extraídas mostraron fisuras mayores a 0.3 mm en el 53% de muestras, un pH máximo de 10.91 y una profundidad de carbonatación entre 3 mm y 5.7 mm (Catari, 2018).

Las edificaciones expuestas a humedad presentan patologías que reducen la comodidad y el bienestar de los habitantes a la par que complican el estado estructural (Pipiraite, 2017). Además, existe una relación directa entre la humedad en los edificios y el riesgo de infecciones respiratorias, asma, bronquitis y rinitis alérgica, destacando la importancia de la impermeabilización tanto a nivel estructural como de salud (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021).

Es evidente que la humedad es uno de los principales causantes de patologías del concreto. Impermeabilizar las estructuras antes de ser construidas, utilizando aditivos o recubrimientos adecuados podría paliar estos problemas. Sin embargo, el empleo de aditivos impermeabilizantes por cristalización carece de información técnica precisa, debido a que no existe una norma específica en el Instituto Americano del Concreto (ACI), en la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) ni en la normativa técnica peruana. Por tanto, esta investigación propone desarrollar un análisis comparativo entre aditivos impermeabilizantes por cristalización y revisar cómo influye su añadido en las propiedades del concreto.

1.2.1 Problema general

Ante lo anteriormente expuesto, se plantea la siguiente pregunta de investigación:
¿Cómo varían las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm² al añadir aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la adición de aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento, en las propiedades físicas de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm²?
- ¿Cómo influye la adición de aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento, en las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm²?
- ¿Cuál es el impacto de la dosificación (0.5%; 1%; 1.5% y 2%) de aditivo impermeabilizante por cristalización, en peso del contenido de cemento, en las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=280$ kg/cm² con cemento tipo HS, comparadas con una mezcla patrón?

1.3 Objetivos del estudio

1.3.1 Objetivo General

Realizar el estudio comparativo de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm² con aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas (permeabilidad) de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm² con aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento.
- Determinar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión) de las mezclas de concreto $f'c=280$ kg/cm² con aditivos impermeabilizantes por cristalización con dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento.
- Determinar el impacto de la dosificación (0.5%; 1%; 1.5% y 2%) de aditivo impermeabilizante por cristalización, en peso del contenido de cemento, en las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=280$ kg/cm² con cemento tipo HS y realizar un análisis comparativo.

1.4 Hipótesis

1.4.1 Hipótesis general

El aditivo impermeabilizante por cristalización incrementa la durabilidad del concreto mediante la reducción de la permeabilidad (propiedad física) en al menos un 50% y el incremento de la resistencia a la compresión axial (propiedad mecánica) en al menos un 10%, al emplear dosificaciones entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento. Este incremento en la durabilidad es directamente proporcional a la dosificación del aditivo.

1.4.2 Hipótesis específicas

- La dosificación de aditivo impermeabilizante por cristalización reduce la permeabilidad (propiedad física) del concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ con cemento tipo HS en al menos un 50%, siendo esta reducción directamente proporcional a la cantidad de aditivo utilizado.
- La dosificación de aditivo impermeabilizante por cristalización incrementa la resistencia a la compresión axial (propiedad mecánica) del concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ con cemento tipo HS en al menos un 10%, siendo este incremento directamente proporcional a la cantidad de aditivo utilizado.
- La adición de aditivos impermeabilizantes por cristalización en el rango entre 0.5% y 2% en peso del contenido de cemento en una mezcla de concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ con cemento tipo HS no afecta significativamente los ensayos de slump (variación menor al 5%), contenido de aire (variación menor al 2%) y temperatura del concreto en estado fresco (variación menor a 2°C).

1.5 Antecedentes investigativos

1.5.1 Antecedentes Nacionales

Cargua (2017) realizó un análisis comparativo de la impermeabilidad del concreto mediante el estudio experimental de aditivos por cristalización de membrana interna y externa en miembros estructurales. El objetivo fue determinar cuál de estos aditivos sella mejor las porosidades del concreto y evaluar la profundidad de penetración según el método de aplicación. También, buscó demostrar si la resistencia a la compresión y tensión de las probetas sufren alguna variación al mezclarse con aditivos impermeabilizantes. Se elaboraron 12 prototipos de probetas de concreto con $f'c= 290 \text{ kg/cm}^2$ en forma de viguetas, utilizando tres tipos de cemento: GU (uso general), HS (alta resistencia a los sulfatos) y HE (alta resistencia inicial). Los resultados mostraron que la membrana interna aumentó la resistencia a la flexión en un 29% para el cemento GU, un 31% para el cemento HE y un 35% para el cemento HS, en comparación con la membrana externa. Además, la resistencia medida por esclerómetro aumentó un 36% para el cemento GU, y un 56% y 85% para los cementos HE y HS, respectivamente al emplear la membrana interna en comparación con la externa. Concluyeron que los aditivos de membrana interna mejoraron significativamente la resistencia y la impermeabilidad del concreto.

En su investigación, Minaya (2019) realizó un análisis comparativo sobre la permeabilidad del concreto incorporando aditivos impermeabilizantes cristalizantes y aditivos impermeabilizantes hidrofóbicos en reservorios. El objetivo fue evaluar la efectividad de ambos tipos de aditivos en varios porcentajes (0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% y 3.0%). Se realizaron ensayos para medir la profundidad de penetración de agua

bajo presión, la tasa de absorción de agua, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción. Los resultados mostraron que los aditivos cristalizantes lograron reducir más la permeabilidad y la capilaridad en comparación con los aditivos hidrofóbicos. Sin embargo, los aditivos hidrofóbicos proporcionaron una mayor resistencia a la compresión y una resistencia a la tracción ligeramente superior a la de los aditivos cristalizantes. Se concluyó que, aunque los aditivos hidrofóbicos son comúnmente usados en la construcción de reservorios en la región, son menos eficaces que los aditivos cristalizantes para impermeabilizar el concreto.

Leyva y Orbegoso (2019) realizaron un estudio comparativo sobre la efectividad de tres tipos de aditivos impermeabilizantes en la permeabilidad de morteros de cemento Portland tipo I. Evaluaron tres grupos de aditivos: hidrófugos (Sika-1 en polvo), bloqueadores de poros (Sika-100 Impermeable) y por cristalización (Sika WT-200P). Para este fin, diseñaron cuatro mezclas: una con Sika-1 al 2% en peso por bolsa de cemento, otra con Sika-100 al 2%, otra con Sika WT-200P al 1%, y un diseño de control sin aditivo como mezcla patrón. Los resultados indicaron que los aditivos por cristalización lograron la mayor reducción en la permeabilidad, con una disminución del 22.08% en comparación con el grupo de control. Además, mostraron una reducción del 34.43% en el índice de permeabilidad y una disminución del 93.50% en la capilaridad. Los aditivos hidrófugos siguieron en efectividad, mientras que los bloqueadores de poros mostraron el menor desempeño.

Cusihuaman (2022) investigó la influencia del aditivo Chema 1 Impermeabilizante en las propiedades mecánicas del concreto elaborado con cemento Sol tipo I y con cemento Inka tipo Ico. Para corroborar la influencia del aditivo, se elaboraron 480 especímenes cilíndricos, divididos entre probetas de mezclas patrones y probetas de diseños de mezcla con aditivo en dosificaciones de 4.0%, 4.5% y 5.0% del peso del cemento, estos fueron ensayados a los 3, 7 y 28 días. Adicionalmente, se elaboraron 64 especímenes para obtener el coeficiente de permeabilidad mediante el ensayo de penetración de agua bajo presión realizado bajo la norma colombiana NTC 4483. Los resultados indicaron que la inclusión del aditivo redujo la resistencia a la compresión en las mezclas, independientemente del cemento y la relación agua-cemento empleadas. La resistencia a la compresión de las mezclas se vio reducida hasta en un 7.12% y 11.45% en el caso de las mezclas con cemento Sol tipo I. De manera similar, las mezclas realizadas con cemento Inka tipo Ico tuvieron reducciones de 6.34% y 8.28%. Respecto al estudio del coeficiente de permeabilidad, las mezclas de cemento Portland tipo I y tipo Ico presentaron reducciones en este parámetro de hasta 61.29% y 64.42% correspondientemente.

1.5.2 Antecedentes Internacionales

En la investigación de Rodríguez (2016) se realiza un estudio sobre concretos impermeables, analizando las propiedades mecánicas de agregados de tres diferentes zonas y la permeabilidad del concreto en estado endurecido. El objetivo fue evaluar la impermeabilidad del concreto de diferentes resistencias elaborado con agregados de diferentes zonas, así como determinar la variabilidad de la permeabilidad al adicionar aditivos en distintas dosificaciones recomendadas por el fabricante y, también, determinar la variabilidad de la permeabilidad según la relación agua/cemento conforme a los requerimientos por exposición según las indicaciones del Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute [ACI]). Se desarrollaron diseños de concreto con resistencias de 210 kg/cm² y 240 kg/cm², incorporando un aditivo impermeabilizante al 2% del peso del cemento. Los ensayos se realizaron siguiendo la norma UNE-EN 12390-8 de la Asociación Española de Normalización [UNE], concluyendo que la adición del aditivo redujo la altura máxima de penetración del agua en un 55% para el concreto de $f'c=210$ kg/cm² y en un 40% para el concreto de $f'c=240$ kg/cm².

Lim & Kawashima (2019) investigaron los mecanismos mediante los cuales los agentes impermeabilizantes cristalinos afectan la microestructura del concreto. Compararon muestras tratadas con impermeabilizantes cristalinos, muestras tratadas con solución de carbonato de sodio, y muestras de control. Los resultados mostraron que los agentes impermeabilizantes cristalinos, aplicados tanto en superficie como mezclados, inducen la formación de carbonato de calcio (CaCO₃), reduciendo la porosidad y mejorando la impermeabilidad. La porosidad total de las muestras tratadas fue aproximadamente 9.3% y 9.1%, respectivamente, lo que es 9.8% menos que la muestra de control.

Figmig (2020) exploró y evaluó la eficiencia de aditivos impermeabilizantes por cristalización en concretos de baja calidad, usando tres diseños de mezcla con distintas relaciones agua-cemento (0.835, 0.740 y 0.655). Para cada mezcla, se prepararon dos lotes de probetas: una con aditivo y otra sin aditivo para servir de mezcla patrón. Las probetas fueron preparadas y ensayadas a fin de obtener la densidad de la mezcla, la resistencia a la compresión a los 28 días, la absorción de agua y la densidad en estado endurecido. Se identificó que la inclusión del aditivo disminuye la resistencia a la compresión en 13.3%, 12.1% y 12.2% comparado con las mezclas patrón. Además, la absorción de agua aumentó en un 0.1% respecto a los valores obtenidos de la mezcla sin aditivo. Se concluyó que estos aditivos no mejoran las propiedades mecánicas y de

durabilidad en concretos de baja calidad y que podrían reducir su calidad debido al aumento de la relación agua-cemento al añadir el aditivo en su forma líquida.

En su artículo, Naidenov & Mironova (2020) investigaron la eficiencia de los aditivos químicos de cristalización en el concreto, enfocándose en sus características estructurales. Utilizaron diversos aditivos impermeabilizantes, como Krystaline Add1, Krystaline Plus 2.5, Penetron Admix, Xypex C1000 NF y Betocrete-CP-360-WP, en diferentes mezclas para comprender su naturaleza interna y destacar su desempeño en la limitación del ingreso de agua en el concreto reforzado y otras características de su integridad estructural. La comparación de las características físicas, mecánicas y estructurales del concreto con los cinco tipos de aditivos de cristalización demostró las ventajas de Krystaline Plus 2.5 y Krystaline Add1 sobre Penetron Admix, Xypex C1000 NF y Betocrete-CP-360-WP. Los concretos con Krystaline Plus 2.5 y Krystaline Add1 aseguran la impermeabilidad, mayor resistencia a las heladas y durabilidad sin necesidad de impermeabilización adicional, superando en todos los parámetros probados a los otros concretos.

De acuerdo con los párrafos anteriores, se observa que se ha investigado extensamente el uso de aditivos impermeabilizantes en el concreto, empleando diferentes enfoques y metodologías. Los estudios compararon aditivos por cristalización e hidrofóbicos, mostrando variaciones en la efectividad según el tipo de aditivo y su aplicación. Sin embargo, a nivel nacional, no se ha explorado completamente el efecto de incluir estos aditivos en las mezclas que emplean cemento tipo HS, particularmente en las propiedades mecánicas y físicas. Por ello, esta investigación se propone realizar un estudio comparativo para caracterizar cómo la inclusión de este aditivo influye en las propiedades mecánicas y físicas de las mezclas de concreto con cemento tipo HS.

Capítulo II. Marco teórico y conceptual

2.1 Concreto

El concreto es una mezcla compleja que incluye cemento, agua, agregado fino, agregado grueso y, en ocasiones, aditivos, utilizados según las propiedades específicas que se desean obtener (Khashman & Akpinar, 2017). Inicialmente, esta combinación se presenta como una mezcla moldeable, pero, con el tiempo, adquiere una estructura sólida con propiedades como resistencia, durabilidad e impermeabilidad. Estas características lo convierten en un material ampliamente demandado en el ámbito de la construcción (Sharma et al., 2021).

2.1.1 Durabilidad

La durabilidad del concreto es su capacidad para resistir el deterioro físico y químico causado por factores ambientales y de servicio durante su vida útil. Un concreto duradero es aquel que mantiene su integridad estructural y funcional a lo largo del tiempo. (Neville, 2011)

La durabilidad del concreto se define como su resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. De tal manera que un concreto durable debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto a su medio ambiente. (American Concrete Institute [ACI], 2001)

2.1.1.1 Factores que afectan la durabilidad

2.1.1.1.1 Factores ambientales

Estos factores incluyen la exposición al agua, aire, ciclos de congelación y descongelación, lluvia ácida, sulfatos, cloruros y otros agentes agresivos.

2.1.1.1.2 Factores de servicio

Estos factores incluyen las cargas a las que se somete el concreto, la abrasión, el desgaste y la fatiga.

2.1.1.1.3 Propiedades del concreto

La durabilidad del concreto también depende de sus propiedades, como la resistencia a la compresión, la permeabilidad, la resistencia a la fisuración y la resistencia a la corrosión.

2.1.2 Patologías en el concreto

2.1.2.1 Patología debido a fenómeno físico

2.1.2.1.1 Fisuración

La fisuración, una patología común del concreto, se origina por factores físicos como la retracción por secado, especialmente en elementos delgados o complejos. Las fisuras provocan consecuencias negativas como la penetración de agentes nocivos, pérdida de resistencia y corrosión de la armadura. Para prevenirla, se recomienda usar concreto de alta calidad, curado adecuado, diseño apropiado y armaduras de refuerzo (Neville, 2011).

2.1.2.1.2 Ciclo de congelación y descongelación

El ciclo de congelación y descongelación del agua en el concreto genera daños como fisuras y desintegración, debido a la expansión del agua al congelarse. La gravedad del daño depende de la porosidad del concreto, contenido de aire y ciclo de congelación-descongelación. Para prevenirlo, se recomienda usar concreto con bajo contenido de agua-cemento (A/C), aire incorporado y protegerlo de la exposición a temperaturas extremas. La reparación del daño por congelación-descongelación es compleja y depende de la gravedad de este (Neville, 2011).

2.1.2.2 Patología debido a fenómeno químico

2.1.2.2.1 Lixiviación

La lixiviación, un proceso gradual de erosión, debilita las estructuras de concreto. Provocada por agua o soluciones químicas, genera cavidades, pérdida de resistencia y desintegración del material. Su gravedad depende de la composición del concreto, la calidad del agua y las condiciones ambientales. Las consecuencias son nefastas: pérdida de resistencia, formación de cavidades y corrosión de la armadura de acero. Para prevenirla, se debe usar concreto de alta calidad, seleccionar agregados de baja solubilidad, utilizar aditivos impermeabilizantes e inhibidores de la corrosión, y proteger el concreto de agentes agresivos (Neville, 2011).

2.1.2.2.2 Ataque de cloruros y corrosión del acero en el concreto

El concreto armado es altamente utilizado en la construcción debido a su fortaleza y durabilidad, aunque su susceptibilidad a la corrosión por cloruros puede comprometer la integridad de las estructuras. Los cloruros, presentes en diversas fuentes como el agua de mar, pueden penetrar el concreto y corroer el acero de refuerzo, resultando en pérdida de sección transversal, disminución de la resistencia estructural y deterioro estético. Factores como la permeabilidad del concreto, calidad del acero, relación agua-cemento y espesor del recubrimiento influyen en la gravedad del deterioro. Para prevenir este problema, se recomienda el uso de aditivos inhibidores de corrosión, sellado del concreto, diseño adecuado del recubrimiento y la utilización de aceros especiales como el inoxidable. Estas

medidas ayudan a proteger las estructuras de los efectos nocivos de la corrosión por cloruros y garantizan su seguridad a largo plazo. (Bertolini et al., 2013).

2.1.2.2.3 Ataque de sulfatos

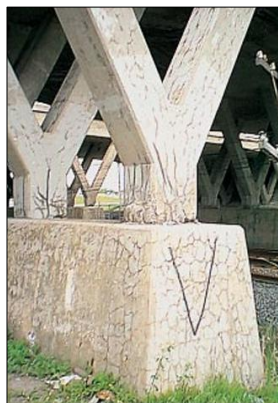
El ataque de sulfatos deteriora gradualmente el concreto por la reacción química entre sulfatos presentes en el agua o suelo y componentes del cemento, causando expansión, fisuras, pérdida de resistencia y desprendimiento de fragmentos (Tahwia et al., 2023). Factores como tipo y concentración de sulfatos, permeabilidad del concreto y composición del cemento influyen en el deterioro. Para prevenirlo se recomienda utilizar materiales resistentes a sulfatos, diseñar mezclas con baja permeabilidad, emplear aditivos inhibidores y proteger el concreto de la exposición a sulfatos con recubrimientos impermeables. (Garzón, 2013).

2.1.2.2.4 Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado (RAA) es un proceso de deterioro gradual del concreto, desencadenado por la interacción entre los álcalis del cemento y ciertos componentes de los agregados, generando productos de expansión que debilitan la estructura. Esto resulta en expansión, fisuración, pérdida de resistencia y desprendimiento de fragmentos. Factores como el tipo de álcali, reactividad de los agregados, alcalinidad del cemento y condiciones ambientales influyen en la RAA. Para prevenirlo se sugiere utilizar materiales con bajo contenido de álcalis, diseñar mezclas con baja permeabilidad, emplear aditivos inhibidores, curar adecuadamente el concreto y aplicar técnicas de reparación como reemplazo, inyección de epóxi y revestimiento de superficie. La prevención y reparación son fundamentales para evitar costosos y complejos problemas derivados de la RAA.

Figura 1.

Estructura con patología Reacción Álcali-Agregado



Nota: (Kosmatka et al., 2004)

2.1.3 Absorción capilar

La absorción capilar es la capacidad de un material poroso, como el concreto, para absorber agua por capilaridad. La capilaridad es un fenómeno físico que se produce cuando las fuerzas intermoleculares entre las moléculas del agua y las moléculas del

material poroso son más fuertes que las fuerzas entre las moléculas de agua. Esto provoca que el agua suba por los poros del material poroso en contra de la gravedad.

La cantidad de agua absorbida desde la superficie del concreto está influenciada por una serie de factores, que abarcan desde las proporciones de la mezcla de concreto, como la relación agua/cemento, hasta la inclusión de aditivos y materiales adicionales, la composición y características físicas tanto del cemento como de los agregados, la presencia de aire incorporado, el tipo y la duración del proceso de curado, el nivel de hidratación o edad del concreto, la existencia de microgrietas, la aplicación de tratamientos superficiales y el método de colocación, que incluye tanto la consolidación como el acabado final. (ASTM C 1585, 2020).

2.1.4 Permeabilidad

Es la capacidad de un material para permitir el paso de sustancias a través de él. Es una propiedad que describe la facilidad con la que una sustancia puede pasar a través de un material. (Sánchez, 2022).

2.1.4.1 Permeabilidad en el concreto

La permeabilidad del concreto está relacionada con la porosidad del material. Es la capacidad del concreto para permitir el paso de líquidos o gases a través de él, afectando significativamente su durabilidad y resistencia. Minimizar la permeabilidad es crucial y se logra mediante el uso de técnicas de diseño y construcción adecuadas, así también, como con el uso de aditivos (Yang et al, 2018).

2.2 Estructura interna

El concreto, con su estructura compleja y heterogénea, presenta dos fases principales: los agregados y la pasta de cemento hidratado (PCH). La comprensión de su estructura interna y la relación entre esta y sus propiedades es fundamental para modificarlas y obtener las características deseadas en el ámbito ingenieril.

A nivel microscópico, la estructura del concreto se vuelve aún más compleja. La zona de transición, ubicada entre los agregados gruesos y la PCH, es una zona más débil que las demás y tiene una gran influencia en el comportamiento del material (Metha & Monteiro, 1998). Cada una de las fases principales del concreto presenta a su vez una naturaleza multifásica, con la presencia de sólidos, poros y microgrietas.

2.2.1 Pasta de cemento hidratada

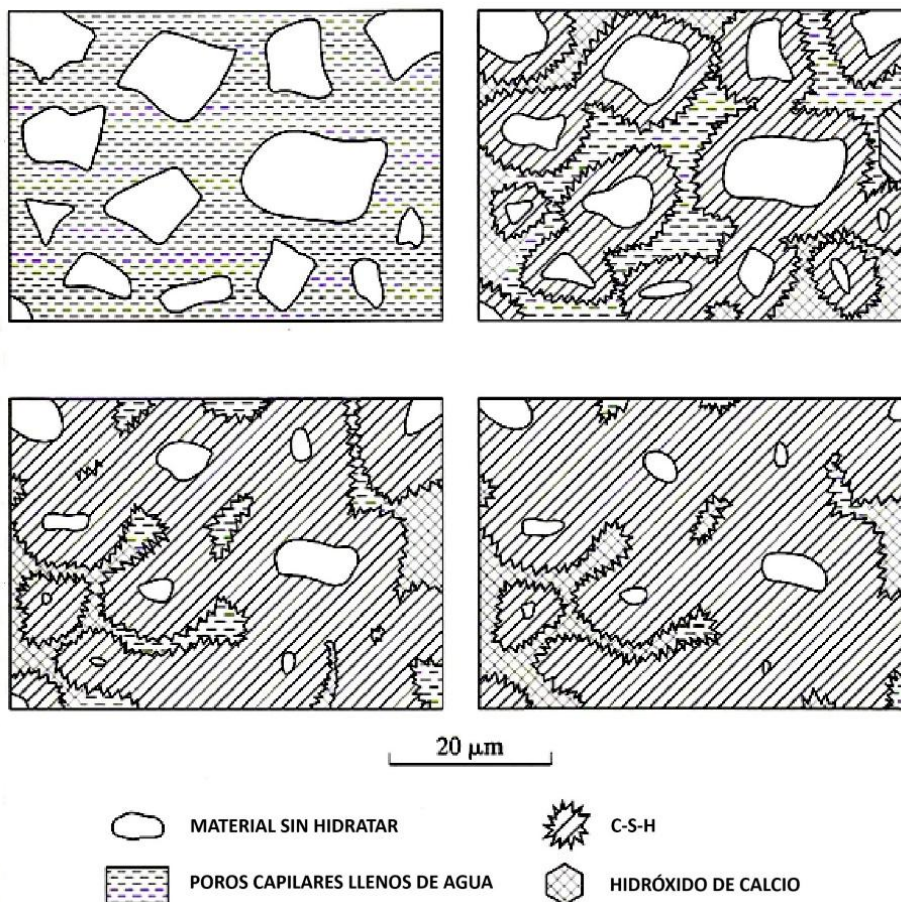
La durabilidad del concreto es su capacidad para resistir el deterioro físico y químico causado por factores ambientales y de servicio durante su vida útil. Un concreto duradero es aquel que mantiene su integridad estructural y funcional a lo largo del tiempo. (Neville, 2011)

2.2.1.1 Estructura

Las partículas de cemento en el agua tienden a disolverse, por lo cual se generan reacciones químicas en los sulfatos, silicatos y otros componentes de calcio. Los silicatos de calcio producen Hidróxido de calcio hidratado, sulfoaluminatos de calcio (etringita) y partículas amorfas de Hidrato de silicato de calcio (HSC). La siguiente ilustración representa la microestructura de una pasta de cemento en cuatro edades, las cuales son mezcla inicial, 7 días, 28 días y 90 días (Lamond & Pielert, 2006).

Figura 2.

Representación del desarrollo microestructural en pastas de cemento Portland. Se omiten las partículas finas para mayor claridad



Nota: Lamond & Pielert (2006)

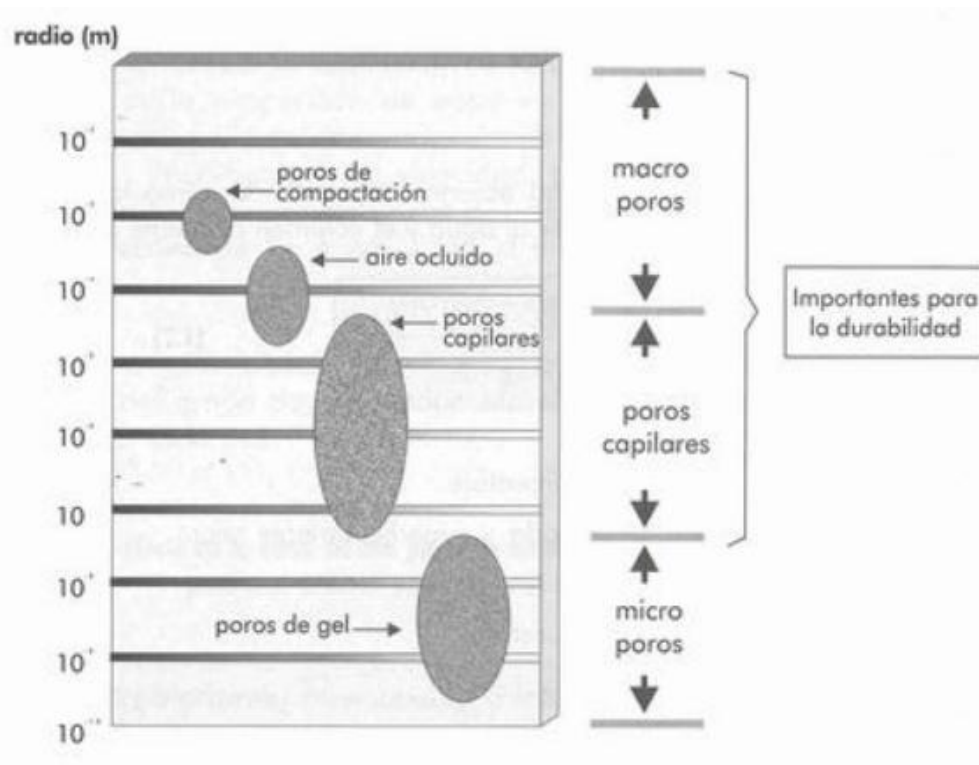
2.2.1.2 Poros

Se clasifican según su tamaño como macroporos, poros capilares y microporos. Los macroporos son generados por las burbujas de aire atrapado naturalmente (poros de compactación) y/o a las burbujas incluidas intencionalmente (poros de aire incluido), los poros capilares, son aquellos localizados fuera del gel cementicio y los microporos están

constituidos por los poros de la pasta hidratada y endurecida. (Kumar & Bhattacharjee, 2003).

Figura 3.

Conformación de la estructura porosa del concreto



Nota: Morales & Danisa (2016)

2.3 Componentes del concreto

2.3.1 Cemento

El cemento es una sustancia inorgánica finamente pulverizada que, al mezclarse con agua, forma una pasta aglutinante capaz de fraguar y endurecerse tanto en agua como al aire libre mediante procesos de reacción e hidratación. A pesar de que la pasta aglutinante endurecida mantiene sus propiedades de resistencia y estabilidad.

2.3.1.1 Cemento Portland

El cemento Portland resulta de la pulverización del clínker Portland con la adición de sulfato de calcio. Es posible incorporar otros tipos de aditivos, siempre y cuando no alteren las propiedades del cemento. La fabricación del clínker Portland implica combinar cal (caliza) con sílice, alúmina y óxido de hierro. Estos materiales crudos, mezclados en proporciones adecuadas, se muelen y se calientan en un horno a altas temperaturas, alcanzando los 1500°C para desencadenar una reacción entre sus componentes. Según las normativas ASTM C-150 y N.T.P. 334.009, existen cinco tipos de cemento Portland sin

aditivos, y de acuerdo con la ASTM C-595 (Aprobado en 2013-08-09) y N.T.P. 334.090, hay cementos Portland con aditivos.

2.3.1.2 Cemento Portland sin adición

- Tipo I: Uso general, sin características especiales requeridas, apto para cualquier obra civil convencional.
- Tipo II: Uso general, especialmente cuando se busca resistencia moderada a los sulfatos o moderado calor de hidratación.
- Tipo III: Cemento de alta resistencia inicial, con un alto calor de hidratación y desarrollo rápido de resistencia, adecuado para una rápida puesta en servicio de la estructura.
- Tipo IV: Bajo calor de hidratación, evita dilataciones durante el fraguado, ideal para la fabricación de concretos masivos.
- Tipo V: Cemento con alta resistencia a los sulfatos, previniendo ataques desde el exterior, ideal en áreas con abundantes sulfatos.

2.3.1.3 Cemento Portland con adiciones

La adición introducida al cemento Portland consiste en un componente mineral inorgánico que se mezcla con el Clinker durante la molienda conjunta o se agrega al cemento una vez pulverizado. La sílice y la alúmina presentes en estos minerales reaccionan con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento, dando lugar a la formación de nuevos compuestos, como el silicato de calcio hidratado (Tobermorita). Estos compuestos conservan las propiedades de resistencia e impermeabilidad que caracterizan al cemento.

- Escoria de alto horno: Es un subproducto de la producción de hierro y acero. La escoria de alto horno, al ser molida y añadida al cemento Portland, puede mejorar la resistencia a largo plazo y la durabilidad, así como reducir la generación de calor durante la hidratación.
- Humo de sílice: Se obtiene a partir de la combustión de materiales ricos en sílice. La adición de humo de sílice al cemento Portland puede mejorar la resistencia a la compresión, así como reducir la permeabilidad y mejorar la durabilidad del concreto.
- Ceniza volante: Proviene de la quema de carbón en centrales eléctricas. La ceniza volante se utiliza como adición para mejorar la trabajabilidad del concreto fresco y la resistencia a largo plazo, además de reducir la cantidad de calor generado durante la hidratación.
- Filler calcáreo: Se refiere a polvos finos derivados de la molienda de materiales ricos en carbonato de calcio, como la piedra caliza. Esta adición puede mejorar la trabajabilidad y reducir la cantidad de calor liberado durante el fraguado.

2.3.1.4 Cemento Portland HS

Cemento Portland HS es un tipo especial de cemento diseñado para ofrecer alta resistencia a los sulfatos. Ideal para aplicar en estructuras marinas y portuarias, cimientos y pilotes en suelos con aguas subterráneas sulfatadas, alcantarillas y tuberías de aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas residuales y efluentes y estructuras en ambientes altamente industrializados.

El cemento HS se fabrica a partir de Clinker de alta calidad, puzolana natural de origen volcánico y yeso. La puzolana, que es un material con propiedades cementantes, ayuda a mejorar la resistencia a los sulfatos y la impermeabilidad del concreto. También ofrece otras ventajas como mayor impermeabilidad, lo que lo hace ideal para estructuras expuestas a la humedad; menos emisiones de gases con efecto invernadero durante su fabricación, lo que lo convierte en una opción más ecológica y aumento de la resistencia a la compresión del concreto.

2.3.2 Agregados

Son sustancias granulares inorgánicas, sin actividad química, que pueden tener origen natural o ser creadas artificialmente. Cuando se mezclan con cemento Portland y se humedecen, forman un compuesto compacto conocido como concreto. Las dimensiones adecuadas de estos agregados, utilizados en la elaboración del concreto, están detalladas en la norma técnica peruana N.T.P. 400.012. Estos componentes granulares constituyen una parte significativa (65% - 80%) de la composición en un metro cúbico de concreto.

2.3.2.1 Clasificación

Los agregados finos se obtienen mediante la trituración o desintegración, ya sea de manera natural o artificial, de las rocas. Para ser considerados agregados finos, es necesario que pasen por el Tamiz 3/8" y queden retenidos en la malla 200. La arena es el tipo más común de agregado fino utilizado.

Por otro lado, los agregados gruesos resultan de la trituración o desintegración, tanto natural como artificial, de las rocas. Para ser clasificados como agregados gruesos, deben quedar retenidos en el Tamiz N°4 (4,75 mm). Estos agregados se dividen en grava, que se forma por la desintegración de las rocas debido a la acción del hielo y otros agentes, presentando formas más o menos redondeadas y encontrándose en lechos de ríos y antiguos cursos de agua (conocida como canto rodado), y piedra chancada, que es el resultado de la trituración artificial de las rocas.

2.3.2.2 Clasificación física

2.3.2.2.1 Peso específico

La densidad de un material se obtiene al dividir el peso de las partículas por sus volúmenes respectivos, sin tener en cuenta el espacio de vacío entre ellas. Para lograr estos resultados, se sigue un procedimiento establecido por las Normas ASTM C.127 (pruebas para determinar la densidad y absorción en agregados finos) y ASTM C-128 (pruebas para determinar la densidad y absorción en agregados gruesos), como se indica también en la Norma Técnica Peruana N.T.P 400.21. Estos resultados de las pruebas son particularmente relevantes en la construcción cuando se busca que el concreto tenga un peso específico limitado. Los valores de densidad de los agregados generalmente oscilan entre 2500 y 2750 kg/m³.

2.3.2.2.2 Humedad

Se refiere a la cantidad de agua que las partículas de agregado retienen en su superficie.

Estas pueden ser categorizadas de la siguiente manera:

- Seco: Las partículas están completamente libres de humedad interna y externa, logrado al calentarlo a 100°C.
- Semiseco: No hay presencia de humedad externa extrema, pero sí existe humedad interna.
- Saturado superficialmente seco: No hay humedad externa, pero el interior está lleno de agua.
- Saturado: Tanto la superficie como el interior están completamente llenos de agua. La norma técnica peruana que rige este ensayo es la N.T.P. 400.016.

2.3.2.2.3 Absorción

La capacidad de los agregados para llenar los espacios vacíos en sus partículas con agua es conocida como absorción, y este fenómeno es causado por la capilaridad. En el diseño de mezcla de concreto, la absorción de los agregados es una consideración crucial, ya que reduce la cantidad de agua necesaria para la elaboración del concreto. Por esta razón, es esencial tener en cuenta tanto la absorción como la humedad al diseñar mezclas de concreto, ya que juntas pueden afectar tanto positiva como negativamente la cantidad de agua requerida, alterando así el diseño original. En el contexto peruano, la norma técnica para llevar a cabo este ensayo es la N.T.P. 400.022.

2.3.2.2.4 Granulometría

La distribución de los agregados, tanto finos como gruesos, se determina según su tamaño. Este proceso implica el uso de tamices con aberturas especificadas en la norma técnica peruana N.T.P. 400.012. La distribución de los agregados se logra mediante

métodos de gravedad y zarandeo, y los resultados se expresan como porcentajes de retención en los tamices.

Tabla 1.

Parámetros granulométricos del agregado fino

Malla		Porcentaje que pasa		
3/8"	9.50 mm	100		
N° 4	4.75 mm	95	a	100
N° 8	2.36 mm	80	a	100
N° 16	1.18 mm	50	a	85
N° 30	600 um	25	a	60
N° 50	300 um	10	a	30
N° 100	150 um	2	a	10

Nota: Fuente Norma Técnica Peruana NTP 400.0374

Dado que aproximadamente entre el 65% y el 80% de un metro cúbico de concreto consiste en agregados, estos desempeñan un papel crucial en la composición del concreto. Es esencial asegurarse de que los agregados cumplan con los estándares establecidos en la N.T.P. 400.037, ya que esta normativa especifica los parámetros necesarios para garantizar la calidad de los agregados en la mezcla de concreto.

Los agregados finos son sometidos a la clasificación mediante tamices como ASTM N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100. Por otro lado, los agregados gruesos se seleccionan utilizando tamices de tamaños tales como ASTM 3/8", 1/2", 3/4", 1", 1 1/2", 2", 2 1/2", y 3". Los requisitos específicos de granulometría para ambos tipos de agregados ya sean finos o gruesos, están estipulados en la norma técnica peruana N.T.P. 400.037.

2.3.2.2.5 Módulo de Finura

El módulo de finura es un parámetro empírico que se calcula sumando los porcentajes acumulados en las mallas de tamaños 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, y luego dividiendo esta suma entre 100. Tradicionalmente, se emplea para determinar el módulo de finura (M.F.) en los agregados finos, pero también se utiliza para obtener el M.F. en los agregados gruesos. Un módulo de finura bajo indica una mayor proporción de partículas finas en comparación con las partículas gruesas.

2.3.3 Agua

El agua desempeña un papel fundamental en la elaboración del concreto, ya que, a través de reacciones químicas con el cemento, facilita la creación de una mezcla que sea manejable para su colocación y manipulación. Cuando el concreto se endurece, gracias a estas reacciones químicas, alcanza las propiedades deseadas. Por lo tanto, es imperativo que el agua cumpla con los parámetros establecidos en la Norma Técnica

Peruana N.T.P 339.088 para garantizar su idoneidad en el proceso de preparación del concreto.

2.3.3.1 Agua para mezcla

Comúnmente, se emplea agua potable en la mezcla de concreto, siguiendo una regla empírica que establece que, si el agua no causa daño al ser humano, tampoco lo hará al concreto. Sin embargo, es esencial que el agua utilizada cumpla con ciertos parámetros, de manera que sus impurezas o sustancias químicas no afecten el comportamiento normal del concreto. Esto se refiere tanto a la reacción necesaria del agua con el cemento para su hidratación como a su función como lubricante para la trabajabilidad del material.

Tabla 2.

Requisitos para el agua

Descripción	Límites Permisibles		
Sólidos en suspensión	500	pp	Máxim
	0	m	o
Materia orgánica	3	pp	Máxim
		m	o
Alcalinidad (NaCHCO ₃)	100	pp	Máxim
	0	m	o
Sulfatos (ion SO ₄)	600	pp	Máxim
		m	o
Cloruros (ion Cl ⁻)	100	pp	Máxim
	0	m	o
pH	5 a	pp	Máxim
	8	m	o

Nota: Fuente Norma Técnica Peruana NTP 339.088

2.3.3.2 Agua para curado

Los criterios para el uso del agua en el proceso de curado son los mismos que se aplican a la utilizada en la mezcla. Es esencial que esta agua carezca de sustancias agresivas, como cloruros o sulfatos. Además, es factible emplear el agua proveniente del lavado de mezcladoras o mezcladores, siempre y cuando no contenga materiales sólidos en suspensión.

La norma técnica peruana N.T.P 339.088 establece los requisitos necesarios para el empleo del agua en el curado, y estos se detallan en la Tabla 2.

2.3.4 Aditivo

Los aditivos son sustancias químicas agregadas en cantidades controladas durante el proceso de mezcla del concreto para mejorar o modificar sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido. La cantidad de aditivo a utilizar varía según el tipo de

aditivo y los objetivos del proyecto. Es esencial seguir las instrucciones del fabricante y ajustar las dosificaciones según sea necesario. Algunas combinaciones incompatibles pueden tener efectos adversos en la trabajabilidad, el tiempo de fraguado o las propiedades mecánicas del concreto. Es importante revisar la compatibilidad antes de emplear nuevos aditivos (Kosmatka et al., 2004).

2.3.4.1 Aditivo impermeabilizante

Los aditivos impermeabilizantes son sustancias químicas añadidas a la mezcla de concreto para mejorar su resistencia a la penetración de agua u otros líquidos. Actúan modificando las propiedades del concreto a nivel microscópico, reduciendo su permeabilidad y mejorando su capacidad para resistir la humedad. Los tipos más comunes de aditivos impermeabilizantes incluyen los hidrófobos, que forman una barrera en la estructura del concreto, repeliendo el agua y evitando su absorción; los reductores de agua, que permiten reducir la cantidad de agua necesaria para alcanzar la consistencia deseada del concreto, disminuyendo así la porosidad y la permeabilidad del material; los aditivos de polímeros, que mejoran la cohesión y elasticidad del concreto, formando una película continua que sella los poros y capilares; y los aditivos cristalizantes, que contienen compuestos químicos que reaccionan con la humedad presente en el concreto, formando cristales insolubles en agua dentro de los poros y capilares (Jianxia, 2012).

2.3.4.2 Aditivo impermeabilizante por cristalización

Los aditivos impermeabilizantes por cristalización son productos químicos que se agregan al concreto para mejorar su resistencia al agua y reducir su permeabilidad. Funcionan mediante la formación de cristales insolubles en agua dentro de los poros y capilares del concreto, bloqueando el paso del agua.

El componente principal utilizado en los aditivos impermeabilizantes por cristalización es el cemento Portland. Sin embargo, también pueden contener otros componentes, tales como los silicatos, como el silicato de sodio (Na_2SiO_3) y el silicato de potasio (K_2SiO_3), que reaccionan con los compuestos presentes en el concreto y forman cristales de silicato de calcio (CSH) en los poros y capilares, reduciendo la permeabilidad; los carbonatos, como el carbonato de sodio (Na_2CO_3) y el carbonato de potasio (K_2CO_3), que reaccionan con el concreto y forman cristales de carbonato de calcio (CaCO_3) en los poros, reduciendo la permeabilidad; y los compuestos de aluminio, como el sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), que reaccionan con los componentes del concreto y forman cristales de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), ayudando a bloquear los poros y capilares (Usman & Sher, 2018).

2.4 Preparación del concreto

La elaboración del concreto implica la combinación de diversos materiales, como agua, cemento, agregados (finos y gruesos), y a menudo aditivos, dando lugar a un nuevo producto derivado de la mezcla de estos componentes.

La calidad de esta mezcla está influida por varios factores, incluyendo la calidad de los materiales utilizados, la naturaleza del agua, las características de los agregados, la calidad del cemento y, con frecuencia, la presencia de aditivos. Además, la destreza de la mano de obra que realiza la mezcla y el diseño de la proporción de los ingredientes también desempeñan un papel crucial.

Es importante destacar que cada tipo de concreto utilizado en una obra presenta desafíos específicos. Por esta razón, se requiere realizar ensayos tanto a los materiales como al concreto que se utilizará. La calidad del concreto no solo se manifiesta después del vaciado y desencofrado, sino también cuando la estructura entra en servicio.

2.5 Propiedades del concreto fresco

Al mezclar los componentes del concreto, incluyendo agua, agregados (tanto gruesos como finos), cemento y aditivos, inicialmente se forma una mezcla plástica, que representa el concreto en su estado fresco. Este estado es fácilmente manipulable, siempre y cuando se siga la dosificación establecida en la obra, lo que permite su traslado y colocación en los lugares requeridos en la construcción.

El concreto en estado fresco exhibe diversas propiedades clave, como la trabajabilidad, la segregación, el asentamiento, el peso unitario, la exudación, el tiempo de fraguado y el contenido de aire. En nuestra investigación, nos enfocaremos en estudiar propiedades específicas, tales como el asentamiento, el peso unitario, la cantidad de aire, la exudación y el tiempo de fraguado.

2.5.1 Asentamiento (NTP 339.035 / ASTM C 143)

Para determinar el asentamiento del concreto, se requiere inicialmente obtener una muestra del concreto destinado a la construcción. Esta muestra se coloca en un molde cónico conocido como el cono de Abrams en tres capas sucesivas. Después, se compacta utilizando una varilla lisa con un diámetro de 5/8" (16mm) y una longitud de 24" (60cm), aplicando 25 golpes a cada capa. Tras la compactación, se nivela para eliminar cualquier exceso de concreto.

Inmediatamente después, el molde se eleva verticalmente, y se mide la distancia entre la altura del molde y la altura del concreto fresco. Este

procedimiento debe llevarse a cabo en un intervalo de tiempo de 5 a 10 segundos. Este ensayo se realiza siguiendo las normativas N.T.P. 330.035 y/o ASTM C 143.

2.5.2 Peso Unitario (NTP 339.046 / ASTM C138)

El peso unitario de 1m³ de concreto fluctúa aproximadamente entre 2240 kg/m³ y 2460 kg/m³, y es crucial conocer este valor específico para el concreto que se empleará.

Para determinar el peso unitario, es necesario conocer el peso y el volumen del recipiente que contendrá el concreto. La colocación del concreto en estado fresco se realiza en tres capas, con 25 golpes de compactación por capa si el volumen del recipiente es de 1/2 pie³, o 50 golpes por capa si es de 1 pie³. Después de cada capa, se golpea externamente con un martillo de goma de 10 a 15 golpes para eliminar posibles burbujas. Luego se nivela y se eliminan los excesos de concreto antes de pesarlo en una balanza.

El peso unitario, que representa la densidad, se calcula dividiendo el peso del concreto entre el volumen del recipiente. Este ensayo se realiza de acuerdo con la normativa N.T.P. 339.046 y/o ASTM C 138. Es importante destacar que el peso específico y la cantidad de agregados (tanto gruesos como finos) utilizados en la mezcla tienen una influencia directa, pudiendo variar significativamente el peso unitario del concreto resultante.

2.5.3 Contenido de aire (NTP 339.080 / ASTM C231)

El aire contenido en los materiales, como los agregados finos y gruesos, así como mediante otros medios, generalmente oscila entre el 1% y el 3% del peso total de la mezcla. El aumento en la cantidad de aire atrapado está directamente relacionado con las características físicas de los agregados (finos y gruesos), la proporción en la dosificación y el método de compactación empleado.

Es importante destacar que la incorporación de aire a veces es beneficiosa para la construcción, y, de hecho, existen aditivos incorporadores de aire diseñados para minimizar las fisuras causadas por ciclos de congelación y deshielo en climas fríos o de cambios bruscos de temperatura. Aunque esta práctica puede aumentar la durabilidad del concreto, también tiende a reducir su resistencia.

En esta investigación, se utiliza el método de Washington para determinar la cantidad de aire sin necesidad de calcular el peso específico, la cantidad de agua y la cantidad de materiales utilizados en la mezcla. Este ensayo se llevó a cabo siguiendo los procedimientos establecidos por la N.T.P. 339.083 y/o ASTM C 231.

Tabla 3.

Contenido de aire en mezclas de concreto

TMN Agregado Grueso	Aire atrapado (%)
3/8"	3
1/2"	2.5
3/4"	2
1"	1.5
1 1/2"	1
2"	0.5
3"	0.3

Nota: ACI Comité 221.1

2.5.4 Temperatura (NTP 339.184 / ASTM C1064)

La generación de calor en el concreto fresco proviene de las reacciones de hidratación entre el cemento y el agua en la mezcla. La hidratación del cemento Portland, el tipo más común de cemento, es la principal responsable. Esta reacción forma productos químicos hidratados, como la pasta de gel de silicato de calcio hidratado (CSH), que contribuye a la resistencia y durabilidad del concreto. Al ser una reacción exotérmica, libera calor, lo que puede aumentar la temperatura del concreto en estado fresco. Temperaturas más altas aceleran la hidratación, afectando la velocidad de fraguado y la resistencia temprana. Controlar la temperatura es esencial para evitar problemas de trabajabilidad o afectaciones en las propiedades finales del concreto, utilizando prácticas como el enfriamiento del agua de mezcla o aditivos reductores de calor. El registro de la temperatura del concreto fresco se rige bajo las normas N.T.P. 339.184 y ASTM C1064, cuyo alcance es determinar la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado con un termómetro de inmersión mínimo de 3 pulgadas en todas las direcciones, la medición se da entre 2 a 5 minutos y se registra con una precisión de 0.5 °C.

2.6 Propiedades del concreto endurecido

Después de completar la etapa de fraguado, el concreto inicia su proceso de endurecimiento, una fase crucial en la construcción. Durante esta etapa, el concreto empieza a desarrollar sus características definitivas diseñadas, que incluyen propiedades como absorción de agua, durabilidad, dilataciones, resistencia a la compresión axial, impermeabilidad, módulo de elasticidad, entre otras.

En la presente investigación, se estudia las propiedades de resistencia a compresión axial y la impermeabilidad del concreto.

2.6.1 Resistencia a la compresión axial (NTP 339.034 / ASTM C39)

La resistencia a la compresión en el concreto se refiere al máximo esfuerzo que puede soportar sin sufrir daños, y suele servir como una indicación de calidad que ayuda a decidir la aceptación o rechazo del concreto que se va a utilizar. La resistencia del concreto depende de cuatro factores principales: la relación agua/cemento (a/c), la relación de cemento/agregado, la granulometría de los agregados y el tamaño de estos.

Los ensayos de resistencia a la compresión axial se llevan a cabo a los 7 y 28 días después del curado del concreto bajo el agua. En el marco de esta investigación, se realizarán ensayos en 24 probetas a los 7 días y 72 probetas a los 28 días.

Para medir la resistencia a la compresión, se siguen las normativas N.T.P 339.034 y/o ASTM C 39. Este proceso implica medir los diámetros y alturas de las probetas a ensayar, colocarlas en una prensa de compresión que desciende a una velocidad constante (entre 0.14 a 0.34 Mpa/s), y tomar nota del tiempo y tipo de rotura, así como cualquier observación relacionada con el aspecto del concreto.

La fórmula matemática para calcular la resistencia a compresión axial es:

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

Donde:

- f'c: Resistencia a la compresión axial (kg/cm²)
- P: Carga máxima por rotura (kg)
- A: Área de la sección normal a la carga (cm²)

2.6.2 Profundidad de penetración (NTC 4483 / ASTM C1202)

La profundidad de penetración de agua en el concreto se refiere a la capacidad del agua para infiltrarse en la estructura del concreto. Este fenómeno es crucial para evaluar la durabilidad del concreto, ya que la entrada de agua puede tener consecuencias negativas, como la corrosión de refuerzos de acero y la degradación de las propiedades del concreto.

La evaluación de la profundidad de penetración de agua implica exponer el concreto a un ambiente húmedo o sumergirlo en agua y luego medir la distancia desde la superficie hasta la profundidad alcanzada por el agua. Este parámetro es un indicador de la permeabilidad del concreto y, por lo tanto, de su capacidad para resistir la entrada de agua.

Reducir la permeabilidad del concreto es fundamental para mejorar su durabilidad y resistencia a factores ambientales adversos. Se pueden aplicar diversas técnicas y aditivos para lograr una menor penetración de agua, como la adición de aditivos impermeabilizantes, el uso de cementos especiales o la aplicación de selladores en la superficie del concreto. La evaluación de la profundidad de penetración de agua es parte de los ensayos de durabilidad del concreto y se realiza según normativas específicas, como la ASTM C1202 y la NTC 4483.

Capítulo III. Diseño de mezclas

3.1 Generalidades

El diseño de mezclas de concreto es un proceso esencial que asegura que el concreto producido posea las propiedades necesarias para su uso particular. Este proceso implica la adecuada selección y proporción de componentes como el cemento, agua, agregados y aditivos, para lograr las características deseadas de resistencia, durabilidad, trabajabilidad y permeabilidad. La selección precisa de estos componentes y sus proporciones es crucial para satisfacer los requisitos específicos del proyecto, tales como la carga estructural, las condiciones ambientales y la vida útil esperada de la estructura.

3.1.1 Criterios de diseño

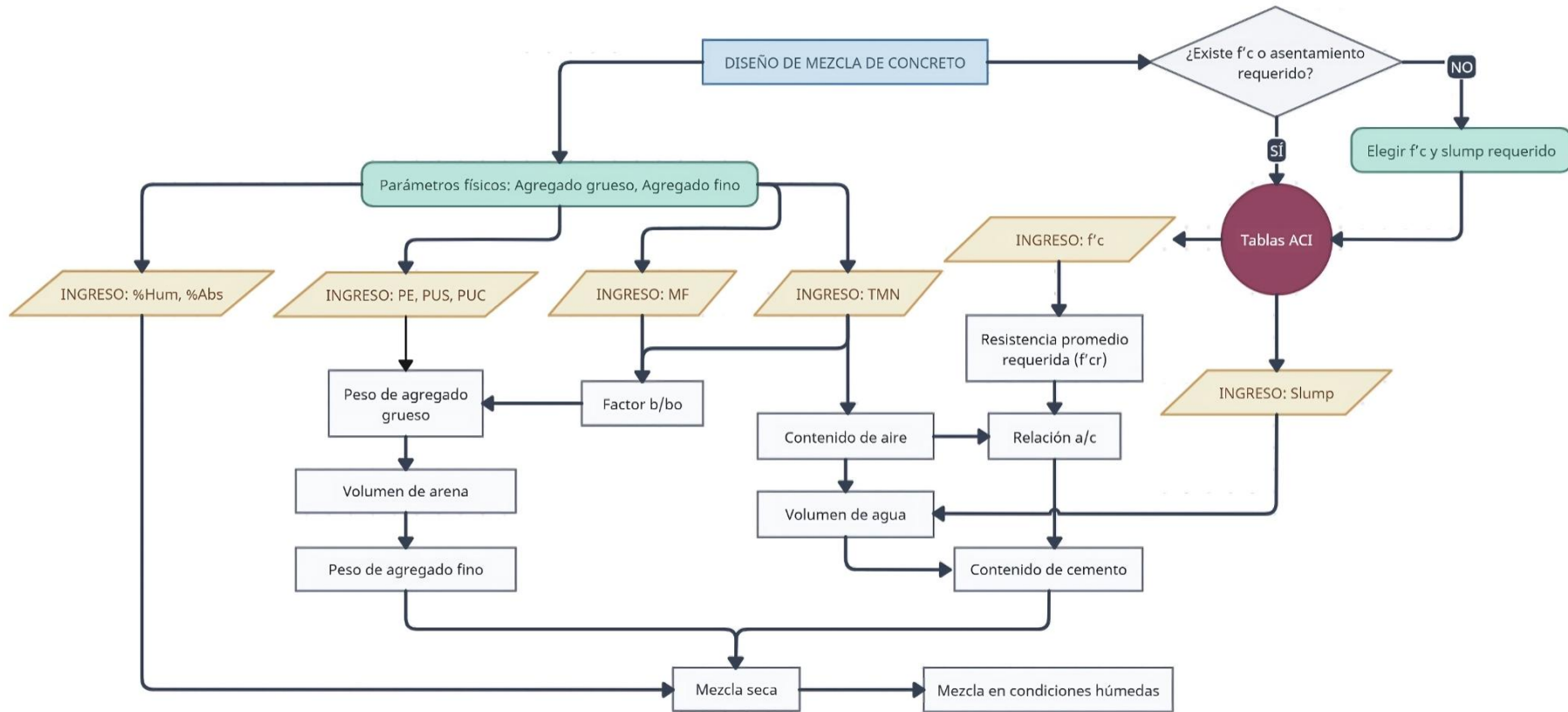
El diseño de mezclas de concreto debe cumplir con varios criterios clave para garantizar su calidad y durabilidad. La manejabilidad, que incluye la trabajabilidad y consistencia, es esencial para asegurar que el concreto se pueda colocar y consolidar sin problemas. La trabajabilidad depende de factores como la granulometría y la forma de las partículas, mientras que la consistencia se relaciona con el contenido de agua y se mide por el asentamiento. Además, la resistencia del concreto, evaluada a los 28 días, y la relación agua-cemento (a/c) son cruciales para el diseño estructural. Finalmente, la durabilidad y densidad del concreto aseguran que el material pueda soportar las condiciones ambientales y cumplir con los requisitos de peso en aplicaciones específicas (Cordero Estevez et al., 2022).

En esta investigación, se propone el diseño de una mezcla de concreto con una resistencia a la compresión de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, seleccionada para asegurar la durabilidad y capacidad estructural necesarias, especialmente en estructuras en contacto constante con el agua, como cisternas o canales. Para garantizar la trabajabilidad y la correcta colocación del concreto en estas condiciones, se ha establecido un slump de 10 cm (4 pulgadas), lo que proporciona una consistencia plástica adecuada para su uso con aditivos impermeabilizantes.

3.1.2 Resumen de método de diseño ACI

Figura 4.

Esquema resumen del método de diseño de mezclas ACI



3.2 Características de los materiales utilizados

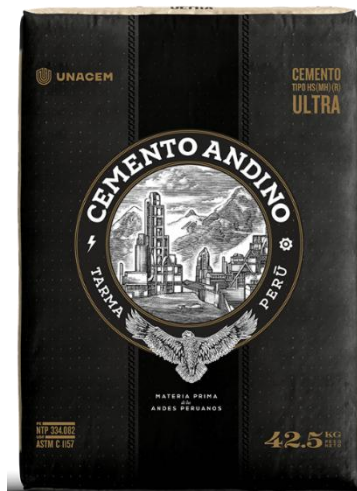
En la presente investigación se emplean los siguientes materiales: cemento Portland tipo HS (marca Andino), agregado grueso, agregado fino, agua, aditivo Penetron Admix (marca Penetron), aditivo Krystol (marca Critón International), y aditivo Idrocrete Kr1000 (marca Mapei).

3.2.1 Cemento

El cemento Portland tipo HS/MH/R (marca Andino) utilizado es conocido por su alta resistencia al salitre y su capacidad antihumedad. Proporciona alta resistencia tanto a mediano como a largo plazo, lo que se traduce en una gran durabilidad en las estructuras. Este cemento es particularmente resistente a la acción de agentes externos como sales y cloruros, y presenta un moderado calor de hidratación, lo que lo hace ideal para su uso en climas tanto cálidos como fríos. Con un bajo contenido de álcalis, ofrece excelente resistencia frente a todo tipo de agregados y brinda una mayor protección al acero (Unacem, s/f).

Figura 5.

Cemento Andino Ultra Portland Tipo HS/MH/R



Nota: Unacem (s/f)

3.2.2 Agregados

Los agregados fueron donados por la empresa PUMPMIX S.A.C. que se abastecen de canteras de Lurín, estos agregados cumplen con las normativas peruanas de agregados.

Los agregados fino y grueso fueron ensayados en las instalaciones del Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción EIRL (CITEMAC) para su caracterización, de acuerdo con las siguientes normas:

- NTP 400.012:2013. AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.
- NTP 400.017:2011. AGREGADOS. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado.
- NTP 400.018:2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (200) por lavado en agregados.
- NTP 400.021:2002. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para espeso específico y absorción del agregado grueso.
- NTP 400.022:2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino.

Tabla 4.*Características físicas de los agregados finos y gruesos*

Características Físicas	Arena	Piedra
P. Específ. de Masa Seca (g/cm ³)	2547	2670
P. Específ. de Masa SSS (g/cm ³)	2565	2690
P. Específ. de Masa Aparente (g/cm ³)	2720	2740
Humedad (%)	0.5	0.63
Absorción (%)	1.01	1
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1691.2	1679.6
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1734.4	1708.2
Tamaño máximo (pulg)	-	1
Tamaño Máximo Nominal (pulg)	-	3/4
% Malla N°200	7.55	-
Módulo de finura	2.9	7.09

Nota: Ensayo de caracterización en laboratorio CITEMAC

3.2.3 Agua

El agua potable que se utilizó tanto para el curado como para la mezcla en esta investigación fue dado en las instalaciones del Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción EIRL y del Laboratorio N°1 de Ensayos de Materiales “Ing. Manuel Gonzales de la Cotera” (LEM). Se consideró para la investigación el peso específico del agua como 1g/cm³.

3.2.4 Aditivos impermeabilizantes por cristalización

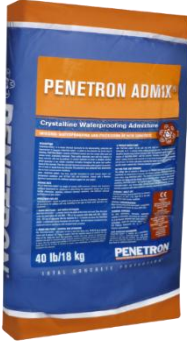
Estos aditivos contienen compuestos químicos que reaccionan con los componentes del concreto y forman cristales insolubles en agua en los poros y capilares del material. Esta reacción química crea una barrera impermeable que ayuda a prevenir la infiltración de agua.

3.2.4.1 Penetron Admix

Penetron Admix es un aditivo impermeabilizante por cristalización que se utiliza para mejorar la resistencia al agua y la durabilidad del concreto. Fabricado por la empresa Penetron International (Penetron, 2024).

Tabla 5.

Especificaciones aditivo Penetron Admix

Imagen referencial	Producto	
	Penetron Admix	
	Usos recomendados	Estructuras que requieren durabilidad prolongada, como depósitos de agua, plantas de tratamiento, estructuras de contención, túneles, bóvedas, cimentaciones, piscinas y prefabricados.
	Características y ventajas	Fácilmente visible durante el vertido del concreto, totalmente seguro para el agua potable, cero impactos ambientales.
	Dosificación	0.8% del peso del cemento
	Presentación	Bolsa de 18 kg
Salud y seguridad	Totalmente seguro para el agua potable. Cuenta con certificación NSF61	


Nota: Adaptado de Penetron (2024)

3.2.4.2 Krystol Internal Membran (KIM) - Crystalline Admixture

Krystol Internal Membrane (KIM) es un aditivo impermeabilizante por cristalización desarrollado por la empresa Kryton International Inc. Este producto pertenece a la categoría de admixtures, y su objetivo principal es mejorar la impermeabilidad y la durabilidad del concreto (KRYTON, 2024).

Tabla 6.

Especificaciones aditivo Krystol Internal Membran (KIM)

Imagen referencial	Producto
	Krystol Internal Membran (KIM)
	Usos recomendados
Características y ventajas	Reduce el costo de impermeabilización. Ayuda a eliminar semanas en el programa constructivo. Reduce el costo de mantenimiento y reparaciones. Provee una solución de impermeabilización confiable y permanente. Aumenta las ganancias al poder tener una mayor superficie de construcción. Ganador del

	premio “Producto Más Innovador” en World of Concrete en 2003.
Dosificación	2 % del peso del cemento.
Presentación	Balde de 25 kg.
Salud y seguridad	Totalmente seguro para el agua potable.


Nota: Adaptado de KRYTON (2024)

3.2.4.3 Idrocrete Kr 1000

Idrocrete Kr 1000 es un aditivo cristalizante en polvo para concreto impermeable, fabricado por Mapei. Está hecho de componentes hidrofílicos especiales que, cuando se agregan a una mezcla de concreto, reaccionan con el proceso de hidratación del cemento para formar cristales en forma de agujas que llenan y sellan los poros y capilares dentro del concreto, haciéndolo significativamente más hermético (Mapei Perú, 2021).

Tabla 7.

Especificaciones aditivo Idrocrete Kr 1000

Imagen referencial	Producto	
	Idrocrete Kr 1000	
	Usos recomendados	Impermeabilización de concreto en general, sea cisternas, piscinas, depósitos de agua, cimientos, sótanos, muros de contención, túneles, canales, presas, edificios industriales y comerciales, pavimentos de concreto, entre otros.
	Características y ventajas	Reduce la permeabilidad del hormigón en hasta el 90%, aumenta la resistencia del hormigón a la penetración del agua bajo presión, mejora la durabilidad del hormigón frente a los agentes agresivos, autocurativo: sella las microfisuras que se puedan producir en el hormigón con el tiempo, fácil de usar: se añade a la mezcla de hormigón en polvo, compatible con todo tipo de cementos y aditivos, no tóxico ni inflamable.
	Dosificación	De 1 a 3 kg por cada 100 kg de cemento.
	Presentación	Bolsas solubles en agua de 4 kg.
Salud y seguridad	Es un producto irritante para la piel y los ojos, evite el contacto directo con el producto y use guantes, gafas y mascarilla protectora durante su manipulación; en caso de contacto con la piel o los ojos, lave con abundante agua y consulte a un médico, mantenga el producto fuera del alcance de los niños	

Nota: Adaptado de Mapei Perú (2021)

3.3 Diseño de mezcla según método ACI

Los diseños mezcla realizados en esta investigación se realizaron mediante el método de diseño y recomendaciones del Manual del Comité Técnico ACI 211 “Diseño de mezclas de concreto”. El diseño de mezcla está conformado por el agregado fino (arena), agregado grueso (piedra), agua, cemento y aditivo impermeabilizante por cristalización. En el diseño de la mezcla patrón, se ha utilizado una relación a/c de 0.45, con un nivel de asentamiento de entre 3” y 4”. Para los otros 12 diseños, se ha mantenido la misma base del diseño patrón, incorporando únicamente el aditivo impermeabilizante por cristalización en la dosis correspondiente a cada caso, sin variar las proporciones, con el fin de evaluar su efecto en comparación con el patrón.

3.3.1 Método de diseño de mezcla

El diseño de mezcla se realiza cumpliendo los lineamientos y recomendaciones del Manual Técnico ACI 211 “Diseño de mezclas de concreto” y con las tablas de la norma ACI 318.2019.

3.3.1.1 Resistencia promedio requerida a la compresión

Esta investigación emplea una resistencia a la compresión especificada de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$, equivalente a 28 MPa. Para determinar la resistencia promedio requerida ($f'cr$), se recurre a las tablas de la norma ACI 318-2019, que se utilizan cuando no se dispone de datos para calcular la desviación estándar. La resistencia especificada resulta en un $f'cr$ de 36.5 MPa, valor que se empleará en las fases posteriores del diseño.

Tabla 8.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar

Resistencia especificada a la compresión, $f'c$, MPa	Resistencia promedio a la compresión requerida, MPa
Menos de 21	$f'cr = f'c + 7.0$
De 21 a 35	$f'cr = f'c + 8.5$
Más de 35	$f'cr = 1.1 f'c + 5.0$

Nota: ACI Comité 318. 2019

3.3.1.2 Determinación promedio del asentamiento (Slump)

Este concreto es adecuado para diversas estructuras, pero se recomienda especialmente para aquellas en contacto constante con agua, como cisternas o canales. Por ello, se ha determinado un slump de 10 cm (4 pulgadas), conforme a lo indicado en la sección 3.1.1.

3.3.1.3 Contenido de aire

El tamaño máximo nominal del agregado grueso, determinado por el análisis granulométrico, es de 3/4". En consecuencia, y de acuerdo con las tablas de la norma ACI 211.1, el contenido de aire atrapado en el concreto es del 2%.

Tabla 9.

Contenido de aire en mezclas de concreto

TMN Agregado Grueso	Aire atrapado (%)
3/8"	3
1/2"	2.5
3/4"	2
1"	1.5
1 1/2"	1
2"	0.5
3"	0.3

Nota: ACI Comité 211.1

3.3.1.4 Determinación del volumen de agua

La determinación del volumen de agua se basa en el asentamiento deseado, el tamaño máximo nominal del agregado (TMN) y la clasificación como concreto con o sin aire incorporado. En este caso, dado que no se considera un concreto con aire incorporado, se busca un asentamiento de 4 pulgadas. Con un TMN de 3/4", el volumen de agua necesario es de 205 litros por metro cúbico para alcanzar la trabajabilidad requerida, de acuerdo con la tabla presente en la norma de diseño.

Tabla 10.

Volumen unitario de agua en mezclas de concreto

Asentamiento	Agua, en 1/m ³ , para los tamaños máx nominales de agregado grueso y consistencia indicados							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Concretos sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	...
Concretos con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	197	184	174		154	...

Nota: ACI Comité 211.1

3.3.1.5 Selección de relación a/c

En el diseño, la resistencia promedio requerida (f'_{cr}) es de 36.5 MPa, lo que equivale aproximadamente a 365 kg/cm². En concordancia con la tabla de la guía de diseño, a través de la interpolación de datos, se determina una relación agua/cemento (a/c) de 0.455.

Tabla 11.

Relación agua-cemento por resistencia

Resistencia a la compresión probable a los 28 días en kg/cm ² (f'_{cr})	Relación agua-cemento en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
100	0.80	0.71

Nota: ACI Comité 211.1

3.3.1.6 Contenido de cemento

Con los datos de relación a/c=0.455 y el contenido de agua =205 litros = 205 kg, se hace un cálculo aritmético. De este se obtiene que la cantidad de cemento a emplear por metro cúbico de concreto es 450.5 kg.

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Contenido de agua}}{(a/c)} = \frac{205 \text{ kg}}{0.455} = 450.5 \text{ kg}$$

3.3.1.7 Factor b/bo

El factor b/bo se determina en función del tamaño máximo nominal (TMN) y el módulo de fineza del agregado fino. Con un TMN de 3/4" y un módulo de fineza de 2.9, la interpolación en la tabla correspondiente resulta en un valor de 0.61 para el factor.

Tabla 12.

Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto

TMN Agregado Grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de fineza del fino.			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65

1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota: ACI Comité 211.1

3.3.1.8 Peso de Agregado Grueso (piedra)

Para calcular el peso del agregado grueso, es necesario realizar un cálculo aritmético utilizando el peso unitario compacto del agregado y el factor previamente determinado. Este cálculo muestra que se necesitan 1042 kg de agregado grueso por metro cúbico de concreto.

$$\text{Agregado Grueso} = \left(\frac{b}{b_0} \right) * \text{PUC del Agregado Grueso}$$

$$\text{Agregado Grueso} = 0.61 \text{ m}^3 * 1708.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Agregado Grueso} = 1042 \text{ kg}$$

3.3.1.9 Determinación del volumen de arena

Para determinar el volumen de arena a utilizar, se calcula primero el volumen ocupado por el agua, el cemento y el agregado grueso, dividiendo sus pesos respectivos entre sus correspondientes pesos específicos. El volumen restante se asigna al volumen de arena requerido para completar 1 m³ de concreto.

Tabla 13.

Volumen de agua, cemento, aire y piedra en mezcla seca

Volumen	m ³
Agua	0.205
Cemento	0.151
Aire	0.02
Piedra	0.393

Estos valores suman 0.769 m³. Dado que el total requerido es 1 m³, el volumen restante, que corresponde a la arena, es de 0.231 m³.

3.3.1.10 Peso de Agregado Fino (arena guesa)

Multiplicamos 0.231 m³ y el peso específico de la arena para calcular el peso.

$$\text{Agregado Fino} = 0.231 \text{ m}^3 * 2565 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agregado Fino} = 592.64 \text{ kg}$$

3.3.1.11 Mezcla Seca

Con los cálculos realizados, se ha establecido el diseño de la mezcla seca respecto a los pesos de cada componente.

Tabla 14.

Peso de los componentes de la mezcla seca

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.0
Arena	592.64
Densidad de mezcla	2290.20

3.3.1.12 Agua Libre

Según la caracterización física de los agregados, el contenido de humedad y el porcentaje de absorción son: 0.63% y 1% para el agregado grueso y, 0.5% y 1% para el agregado fino.

$$\text{Agua libre}_{A.Grueso} = \text{Masa seca}_{A.Grueso} * (\% \text{Humedad}_{AG} - \% \text{Absorción}_{AG})$$

$$\text{Agua libre}_{A.Grueso} = 1042 \text{ kg} * (0.63\% - 1\%)$$

$$\text{Agua libre}_{A.Grueso} = -3.86 \text{ kg}$$

$$\text{Agua libre}_{A.Fino} = \text{Masa seca}_{A.Fino} * (\% \text{Humedad}_{AF} - \% \text{Absorción}_{AF})$$

$$\text{Agua libre}_{A.Fino} = 592.64 \text{ kg} * (0.5\% - 1\%)$$

$$\text{Agua libre}_{A.Fino} = -2.96 \text{ kg}$$

$$\text{Agua libre}_{Total} = \text{Agua libre}_{A.Grueso} + \text{Agua libre}_{A.Fino}$$

$$\text{Agua libre}_{Total} = -3.86 \text{ kg} + -2.96 \text{ kg}$$

$$\text{Agua libre}_{Total} = -6.82 \text{ kg}$$

El valor negativo obtenido indica que la mezcla requiere una adición de 6.82 kg de agua adicionales a los 205 kg de agua inicialmente diseñados.

3.3.1.13 Mezcla en condiciones húmedas

A las cantidades de la mezcla seca se añade los 6.82kg del agua libre.

Tabla 15.

Peso de los componentes de la mezcla en condiciones húmedas

Componente	Kg
Agua	211.82
Cemento	450.55
Aire	0.00

Piedra	1042.00
Arena	592.64
Densidad de mezcla	2290.20

3.3.2 Diseño de muestra patrón

Finalmente, se ha establecido el diseño de la muestra patrón y se ha determinado el peso de los componentes.

Tabla 16.

Peso de los componentes de la mezcla patrón

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.00
Arena	592.64
Densidad (Teórica)	2290.20

3.3.3 Diseño de muestra patrón con aditivos impermeabilizantes

Con base en la muestra patrón, se desarrollan los diseños de mezcla que incorporan los aditivos impermeabilizantes. Estos aditivos se incluyen de acuerdo con una dosificación específica, basada en el peso del cemento.

3.3.3.1 Aditivo impermeabilizante por cristalización 0.5%

Diseño de mezcla de 1 metro cúbico con aditivo impermeabilizante por cristalización, dosificado al 0.5% del peso del cemento.

Tabla 17.

Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 0.5% del peso del cemento

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.00
Arena	592.64
Aditivo	2.25
Densidad (Teórica)	2292.45

3.3.3.2 Aditivo impermeabilizante por cristalización 1%

Diseño de mezcla, masa seca de 1 metro cúbico con aditivo impermeabilizante por cristalización con una dosificación del 1% en peso de la cantidad del cemento.

Tabla 18.

Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 1% del peso del cemento

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.00
Arena	592.64
Aditivo	4.51
Densidad (Teórica)	2294.70

3.3.3.3 Aditivo impermeabilizante por cristalización 1.5%

Diseño de mezcla, masa seca de 1 metro cúbico con aditivo impermeabilizante por cristalización con una dosificación del 1.5% en peso de la cantidad del cemento.

Tabla 19.

Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 1.5% del peso del cemento

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.00
Arena	592.64
Aditivo	6.76
Densidad (Teórica)	2296.95

3.3.3.4 Aditivo impermeabilizante por cristalización 2%

Diseño de mezcla, masa seca de 1 metro cúbico con aditivo impermeabilizante por cristalización con una dosificación del 2% en peso de la cantidad del cemento.

Tabla 20.

Peso de los componentes de la mezcla patrón + aditivo al 2% del peso del cemento

Componente	Kg
Agua	205.00
Cemento	450.55
Aire	0.00
Piedra	1042.00
Arena	592.64
Aditivo	9.01
Densidad (Teórica)	2299.21

3.3.4 Codificación de diseños de mezcla

Los diseños realizados se codifican según el aditivo empleado y la dosificación utilizada, lo que da lugar a 12 mezclas con aditivos. A estas se añade una muestra adicional, codificada como PATRÓN.

Tabla 21.

Codificación de mezclas con aditivos impermeabilizantes

Dosificación	Aditivo 1:	Aditivo 2:	Aditivo 3:
	Penetron Admix	Krystol Internal Membran	Idrocrete Kr 1000
0.5%	A1-M1	A2-M1	A3-M1
1.0%	A1-M2	A2-M2	A3-M2
1.5%	A1-M3	A2-M3	A3-M3
2.0%	A1-M4	A2-M4	A3-M4

Capítulo IV. Ensayos y resultados

4.1 Generalidades

Las mezclas de concreto fueron evaluadas en los estados fresco y endurecido, realizando los siguientes ensayos:

- En estado fresco: Temperatura, asentamiento, peso unitario y contenido de aire
- En estado endurecido: Resistencia a la compresión axial y profundidad de penetración,

4.1.1 Ubicación de los ensayos

Los ensayos en este estudio se llevaron a cabo en laboratorios especializados ubicados en distintos distritos de Lima. Los ensayos de permeabilidad, específicamente el de penetración, se realizaron en el Laboratorio N° 1 de Ensayo de Materiales (LEM) en el distrito del Rímac, conocido por su precisión y confiabilidad en la ejecución de ensayos de materiales de construcción.

Por otro lado, los ensayos relacionados con los diseños de mezcla, estado fresco del concreto y compresión se llevaron a cabo en el Centro de Innovación Tecnológica de Materiales de Construcción (CITEMAC), situado en el distrito de San Juan de Miraflores. CITEMAC se destaca en el control de calidad de materiales de construcción, con un enfoque en la innovación tecnológica y la obtención de resultados precisos y confiables.

4.1.2 Fecha de los ensayos

Los ensayos comenzaron en marzo de 2024 con la preparación de la mezcla patrón y las mezclas con el primer aditivo. En las fechas de preparación, se realizaron los ensayos de estado fresco para evaluar las condiciones iniciales del concreto. Las mezclas con el segundo aditivo se prepararon al final de marzo y las del tercer aditivo a mediados de abril, seguidas por los ensayos de estado fresco correspondientes.

Posteriormente, las probetas fueron curadas y sometidas a ensayos de compresión a los 3, 7 y 28 días, proporcionando datos sobre la evolución de la resistencia del concreto.

Los ensayos de profundidad de penetración se realizaron en mayo y junio, permitiendo un análisis detallado de la durabilidad del concreto en función del tiempo y el tipo de aditivo utilizado.

4.2 Ensayos del concreto en estado fresco

4.2.1 Temperatura

Se registraron los valores de la temperatura de las mezclas de concreto siguiendo los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Peruana NTP 339.184:2013. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto.

4.2.2 Asentamiento (Slump)

Se registraron los valores de asentamiento siguiendo los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Peruana: NTP 339.035:2009. Método de ensayo para la medición del asentamiento del hormigón con el cono de Abrams.

Tabla 22.

Temperatura y asentamiento de las mezclas de concreto (año 2024)

Número de Muestra (Código)	Fecha de muestreo	Temperatura (°C)	Slump (pulg)
PATRON	26-Mar	25.5	4
A1-M1	26-Mar	25.5	4
A1-M2	26-Mar	25.5	4
A1-M3	26-Mar	25.5	4
A1-M4	26-Mar	25.5	4 1/2
A2-M1	27-Mar	25	4
A2-M2	27-Mar	25	4
A2-M3	27-Mar	25	4
A2-M4	27-Mar	25	4 1/4
A3-M1	15-Abr	25	3 3/4
A3-M2	15-Abr	25	3 3/4
A3-M3	15-Abr	25	4 1/2
A3-M4	15-Abr	25	4 1/4

Nota: CITEMAC

4.2.3 Peso Unitario y Contenido de aire

Se registraron los valores de peso unitario del concreto y se calcularon los contenidos de aire, siguiendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana: NTP 339.046:2008. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto.

Tabla 23.

Peso unitario y contenido de aire de las mezclas de concreto (año 2024)

Número de Muestra (Código)	TMN (pulg)	Fecha de muestreo	Peso de molde + muestra (kg)	Peso del molde (kg)	Peso de la muestra (kg)	Volumen del molde (m3)	Peso Unitario (kg/m3)	Densidad teórica (kg/m3)	% Aire
PATRON		26-Mar	19.68		16.18		2298.15	2350.52	2.2
A1-M1		26-Mar	19.72		16.22		2303.84	2352.62	2.1
A1-M2		26-Mar	19.71		16.21		2302.41	2354.71	2.2
A1-M3		26-Mar	19.72		16.22		2303.84	2356.81	2.2
A1-M4		26-Mar	19.74		16.24		2306.68	2358.91	2.2
A2-M1		27-Mar	19.68		16.18		2298.15	2352.62	2.3
A2-M2	3/4	27-Mar	19.71	3.501	16.21	0.00704	2302.41	2354.71	2.2
A2-M3		27-Mar	19.72		16.22		2303.84	2356.81	2.2
A2-M4		27-Mar	19.71		16.21		2302.41	2358.91	2.4
A3-M1		15-Abr	19.7		16.20		2300.99	2352.62	2.2
A3-M2		15-Abr	19.69		16.19		2299.57	2354.71	2.3
A3-M3		15-Abr	19.71		16.21		2302.41	2356.81	2.3
A3-M4		15-Abr	19.74		16.24		2306.68	2358.91	2.2

Nota: CITEMAC

4.3 Ensayos del concreto en estado endurecido

4.3.1 Resistencia a la compresión axial

4.3.1.1 Patrón

Se realizaron ensayos a 3; 7 y 28 días de la mezcla de concreto patrón (sin ningún aditivo) cumpliendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana: NTP 339.034:2008. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Tabla 24.

Resistencia a la compresión de la mezcla patrón (año 2024)

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
PATRON	280	26-Mar	29-Mar	3	78.54	9502	121.0	121.1	2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9515	121.1		2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9526	121.3		3
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	15700	199.9	195.3	1
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	15342	195.3		1
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14980	190.7		2
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	20570	261.9	285.6	3
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	22430	285.6		3
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	24290	309.3		3

Nota: CITEMAC

4.3.1.2 Patrón + aditivo 1

Se realizaron ensayos a 3; 7 y 28 días de la mezcla de concreto patrón con el aditivo 1 en las dosificaciones de 0.5%; 1%; 1.5% y 2% de aditivo impermeabilizante por cristalización con respecto al peso del contenido de cemento, cumpliendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana: NTP 339.034:2008. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Tabla 25.

Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 1 (año 2024)

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
A1-M1	280	26-Mar	29-Mar	3	78.54	9277	118.1	123.2	2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9680	123.2		2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	10066	128.2		1
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14920	190.0	190.8	2
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14990	190.9		2
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	15050	191.6		1
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23570	300.1	297.3	2
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23340	297.2		2
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23140	294.6		1
A1-M2	280	26-Mar	29-Mar	3	78.54	9307	118.5	118.5	2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9310	118.5		2
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9299	118.4		1
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	13300	169.3	178.9	2
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14060	179.0		2

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla	
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14800	188.4	302.6	2	
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23040	293.4		2	
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23771	302.7		2	
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	24490	311.8		2	
A1-M3	280	26-Mar	29-Mar	3	78.54	9331	118.8	114.9	2	
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	9031	115.0		2	
		26-Mar	29-Mar	3	78.54	8713	110.9		1	
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	15560	198.1		2	
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	15062	191.8		191.7	2
		26-Mar	02-Abr	7	78.54	14540	185.1		2	
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	23680	301.5		2	
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	24168	307.7		307.6	2
		26-Mar	23-Abr	28	78.54	24640	313.7		2	
		A1-M4	280	26-Mar	29-Mar	3	78.54		8680	110.5
26-Mar	29-Mar			3	78.54	9538	121.4	2		
26-Mar	29-Mar			3	78.54	10389	132.3	1		
26-Mar	02-Abr			7	78.54	16010	203.8	2		
26-Mar	02-Abr			7	78.54	16702	212.7	215.1	1	
26-Mar	02-Abr			7	78.54	17970	228.8	3		
26-Mar	23-Abr			28	78.54	22650	288.4	2		
26-Mar	23-Abr			28	78.54	25039	318.8	310.3	1	
26-Mar	23-Abr			28	78.54	25420	323.7	3		

Nota: CITEMAC

4.3.1.3 Patrón + aditivo 2

Se realizaron ensayos a 3; 7 y 28 días de la mezcla de concreto patrón con el aditivo 2 en las dosificaciones de 0.5%; 1.0%; 1.5% y 2.0% de aditivo impermeabilizante por cristalización con respecto al peso del contenido de cemento, cumpliendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana: NTP 339.034:2008. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Tabla 26.

Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 2 (año 2024)

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
A2-M1	280	27-Mar	30-Mar	3	78.54	7910	100.7	110.1	1
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	8653	110.2		2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	9380	119.4		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	10540	164.2	172.4	2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11190	172.5		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11830	180.6		1
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22570	287.4	296.6	2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	23304	296.7		1
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	24020	305.8		3
A2-M2	280	27-Mar	30-Mar	3	78.54	8600	109.5	105.8	2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	8307	105.8		2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	8010	102.0		1
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	12090	153.9	150.9	2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11860	151.0		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11610	147.8		1
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	23200	295.4	289.5	2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22745	289.6		2

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22260	283.4		1
A2-M3	280	27-Mar	30-Mar	3	78.54	7680	97.8	109.5	2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	8607	109.6		2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	9520	121.2		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11560	177.2	167.7	2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	10817	167.7		1
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	10060	158.1		2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	21930	279.2	284.6	2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22361	284.7		2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22770	289.9		2
A2-M4	280	27-Mar	30-Mar	3	78.54	7550	96.1	100.7	2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	7909	100.7		2
		27-Mar	30-Mar	3	78.54	8260	105.2		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11200	142.6	144.0	2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11321	144.1		2
		27-Mar	03-Abr	7	78.54	11420	145.4		2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	22111	281.5	279.2	2
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	21750	276.9		1
		27-Mar	24-Abr	28	78.54	21930	279.2		2

Nota: CITEMAC

4.3.1.4 Patrón + aditivo 3

Se realizaron ensayos a 3; 7 y 28 días de la mezcla de concreto patrón con el aditivo 3 en las dosificaciones de 0.5%; 1.0%; 1.5% y 2.0% de aditivo impermeabilizante por cristalización con respecto al peso del contenido de cemento, cumpliendo los lineamientos de la Norma Técnica Peruana: NTP 339.034:2008. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Tabla 27.

Resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo 3 (año 2024)

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
A3-M1	280	15-Abr	18-Abr	3	78.54	8970	114.2	114.8	2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9017	114.8		2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9060	115.4		3
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	9870	168.7	168.5	3
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	9590	168.2		3
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	10100	168.6		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	23091	294.0	287.9	2
		15-Abr	13-May	28	78.54	22609	287.9		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	22124	281.7		1
A3-M2	280	15-Abr	18-Abr	3	78.54	9018	114.8	114.9	1
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9027	114.9		2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9030	115.0		2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	12070	183.7	180.5	2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	11821	180.5		1
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	11560	177.2		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	22469	286.1	298.8	2

Número de Muestra (Código)	Resistencia especificada f'c (kg/cm2)	Fecha de muestreo	Fecha de ensayo	Edad (días)	Área (cm2)	Carga máxima (kgf)	Resistencia a la compresión del ensayo individual (kgf/cm2)	Promedio f'c (kgf/cm2)	Tipo de Falla
		15-Abr	13-May	28	78.54	23402	298.0		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	24527	312.3		2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	10700	126.2		2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	10541	124.2	124.1	2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	10360	121.9		2
A3-M3	280	15-Abr	22-Abr	7	78.54	11210	168.7		2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	10938	167.3	167.7	2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	10770	167.1		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	21140	269.2		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	22390	285.1	285.2	2
		15-Abr	13-May	28	78.54	23670	301.4		2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	8770	111.7		1
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9362	119.2	119.2	2
		15-Abr	18-Abr	3	78.54	9960	126.8		2
A3-M4	280	15-Abr	22-Abr	7	78.54	12980	165.3		2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	13014	165.7	166.6	2
		15-Abr	22-Abr	7	78.54	13250	168.7		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	23657	301.2		2
		15-Abr	13-May	28	78.54	23271	296.3	295.4	2
		15-Abr	13-May	28	78.54	22685	288.8		2

Nota: CITEMAC

4.3.1.5 Resumen de la resistencia a la compresión de las mezclas

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de los ensayos realizados a 3, 7 y 28 días para las mezclas de concreto de la investigación. Estos ensayos se llevaron a cabo de acuerdo con los lineamientos de la Norma Técnica Peruana NTP 339.034:2008. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Tabla 28.

Resumen de la resistencia a la compresión de las mezclas

Diseño de mezcla	Resistencia a Compresión Axial (kg/cm ²)		
	3 días	7 días	28 días
Patrón	121.10	195.3	285.6
A1-M1	123.20	190.8	297.3
A1-M2	118.50	178.9	302.6
A1-M3	114.90	191.7	307.6
A1-M4	121.40	215.1	310.3
A2-M1	110.10	172.4	296.6
A2-M2	105.80	150.9	289.5
A2-M3	109.50	167.7	284.6
A2-M4	100.70	144	279.2
A3-M1	114.80	168.5	287.9
A3-M2	114.90	180.5	298.8
A3-M3	124.10	167.7	285.2
A3-M4	119.20	166.6	295.4

Nota: CITEMAC

4.3.2 Profundidad de penetración

Se presenta un resumen de los resultados del ensayo de penetración de agua, realizado conforme a la Norma Técnica Colombiana NTC 4483:1998. Concretos. Métodos de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua.

Tabla 29.

Profundidad de penetración del agua (año 2024)

Identificación de la muestra	Fecha		Nro. de días	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Profundidad (cm)					
	Obtención	Ensayo				H1	H2	H3	Hprom	H	
Patrón	P1	26-Mar	31-May	66	15.1	17.7	14.2	15	13	14.1	
	P2	26-Mar	31-May	66	15.2	17.6	13.5	16.5	16.5	15.5	14.6
	P3	26-Mar	31-May	66	15.2	17.7	12	16.5	14.3	14.3	
A1-M1	P1	26-Mar	31-May	66	15.2	16.1	12	14.8	12	12.9	
	P2	26-Mar	31-May	66	15.2	17.7	13.6	16.1	15	14.9	13.8
	P3	26-Mar	31-May	66	15.3	17.6	12.5	16.3	11.8	13.5	
A1-M2	P1	26-Mar	31-May	66	15.2	16.1	5.3	6.3	4	5.2	
	P2	26-Mar	31-May	66	15.3	16	6	6.4	6	6.1	7.8
	P3	26-Mar	31-May	66	15.2	16.3	12.1	12.8	11.7	12.2	
A1-M3	P1	26-Mar	31-May	66	15.2	16	6.7	5.7	5.5	6.0	
	P2	26-Mar	31-May	66	15.3	16.3	4	5.5	5.2	4.9	5.8
	P3	26-Mar	31-May	66	15.2	17.7	6.5	6	7	6.5	
A1-M4	P1	26-Mar	22-Jun	88	15.2	16.5	2.9	3.5	3.2	3.2	
	P2	26-Mar	22-Jun	88	15.2	16.4	4.1	6.9	6.4	5.8	4.3
	P3	26-Mar	22-Jun	88	15.3	16.3	3	4.9	3.9	3.9	
A2-M1	P1	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.7	10.1	14.7	13.5	12.8	
	P2	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.8	9.7	11.4	10	10.4	11.4
	P3	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.7	10.7	11.7	11.1	11.2	

Identificación de la muestra		Fecha		Nro. de días	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Profundidad (cm)				
		Obtención	Ensayo				H1	H2	H3	Hprom	H
A2-M2	P1	27-Mar	22-Jun	87	15.3	15.7	7.2	8.4	7.5	7.7	
	P2	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.7	6.3	8.4	6.9	7.2	6.7
	P3	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.7	5.1	6.7	3.4	5.1	
A2-M3	P1	27-Mar	22-Jun	87	15.3	15.7	14	14.4	13.6	14.0	
	P2	27-Mar	22-Jun	87	15.3	15.8	7.9	9.7	11.3	9.6	11.9
	P3	27-Mar	22-Jun	87	15.2	15.8	11.7	13.4	11	12.0	
A2-M4	P1	27-Mar	27-Jun	92	15.2	16.3	3.3	4.9	6	4.7	
	P2	27-Mar	27-Jun	92	15.2	16.5	5.4	7.3	6.8	6.5	4.9
	P3	27-Mar	27-Jun	92	15.2	16.3	3.3	4	3.3	3.5	
A3-M1	P1	15-Abr	27-Jun	73	15.2	16.3	12.9	15.2	15	14.4	
	P2	15-Abr	27-Jun	73	15.3	16.4	13.9	14.7	13.9	14.2	14.4
	P3	15-Abr	27-Jun	73	15.2	16.4	13.3	15.2	15.1	14.5	
A3-M2	P1	15-Abr	27-Jun	73	15.2	15.8	7.3	7.7	6.3	7.1	
	P2	15-Abr	27-Jun	73	15.2	15.7	10.6	11.7	11.2	11.2	10.1
	P3	15-Abr	27-Jun	73	15.3	15.6	11.8	12.3	11.8	12.0	
A3-M3	P1	15-Abr	27-Jun	73	15.2	16.3	4.9	7	6	6.0	
	P2	15-Abr	27-Jun	73	15.2	16.5	5.3	7.6	5.8	6.2	6.1
	P3	15-Abr	27-Jun	73	15.3	16.4	4.9	7.7	5.9	6.2	
A3-M4	P1	15-Abr	01-Jul	77	15.2	15.6	4.7	2.9	3.1	3.6	
	P2	15-Abr	01-Jul	77	15.2	15.8	6.9	6	6.2	6.4	6.4
	P3	15-Mar	01-Jul	108	15.3	15.7	9.1	9.8	9.2	9.4	

Nota: Laboratorio de Ensayo de Materiales LEM UNI

Capítulo V. Análisis comparativo y discusión

5.1 Análisis comparativo

En esta sección se evaluarán los resultados obtenidos en los ensayos, comparando el comportamiento de las distintas mezclas de concreto. Este análisis permitirá identificar cómo los aditivos y condiciones afectan la resistencia y durabilidad del concreto.

5.1.1 Concreto en estado fresco

En este primer apartado, se evaluarán y compararán los resultados de los ensayos realizados sobre el concreto en estado fresco.

5.1.1.1 Temperatura

Se observa que las variaciones de temperatura son de 0.5°C, equivalentes al 2% en comparación con la mezcla patrón, coincidiendo exactamente con la precisión estipulada por la norma NTP 339.184. Por lo tanto, se considera que no hay variaciones significativas en la medición de la temperatura del concreto en estado fresco, indicando que la adición de aditivos no afecta de manera significativa a la temperatura de la mezcla en estado fresco.

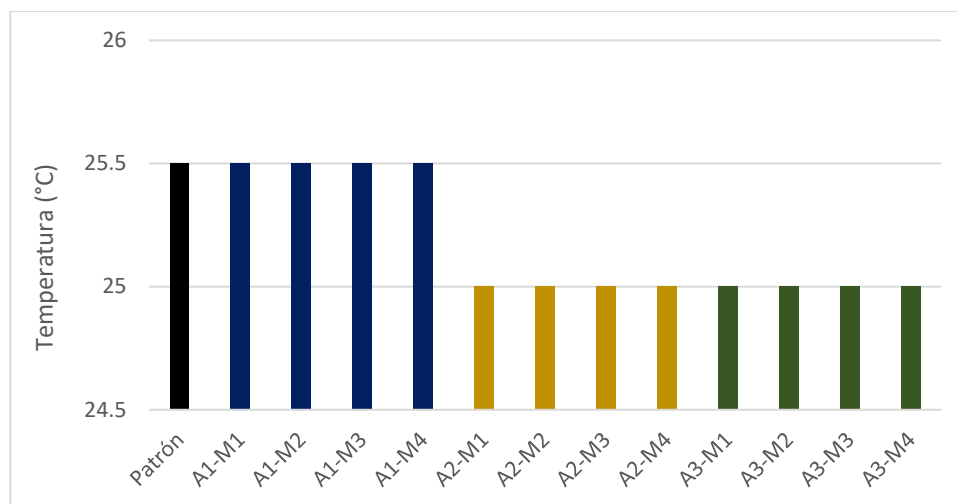
Tabla 30.

Comparación de temperatura de mezclas en estado fresco

Diseño de mezcla	Temperatura (°C)	Variación con respecto al patrón
Patrón	25.5	0%
A1-M1	25.5	0%
A1-M2	25.5	0%
A1-M3	25.5	0%
A1-M4	25.5	0%
A2-M1	25	-2%
A2-M2	25	-2%
A2-M3	25	-2%
A2-M4	25	-2%
A3-M1	25	-2%
A3-M2	25	-2%
A3-M3	25	-2%
A3-M4	25	-2%

Figura 6.

Temperatura de las mezclas en estado fresco



5.1.1.2 Asentamiento

Se observa que las variaciones en el asentamiento son de hasta ½ pulgada, lo que representa un 13% en comparación con la mezcla patrón. De acuerdo con la norma NTP 339.035, el valor de la precisión es de ¼ de pulgada. Por otra parte, no se identifica un patrón directo o inversamente proporcional en relación con la dosificación. Esto sugiere que las variaciones en el asentamiento no siguen una tendencia consistente pero que sí se ven influenciadas por la dosificación utilizada.

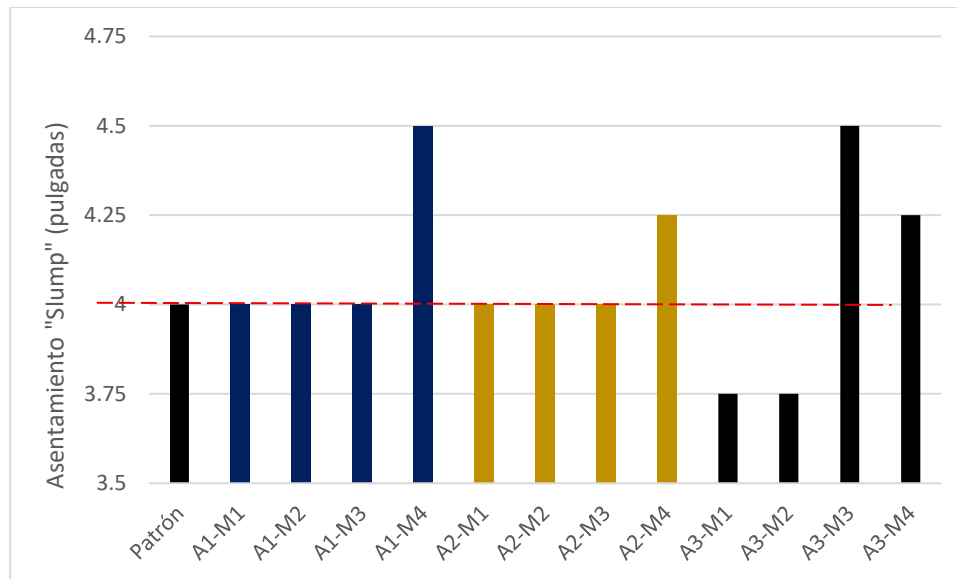
Tabla 31.

Comparación del asentamiento de las mezclas en estado fresco

Diseño de mezcla	Asentamiento "Slump"	Variación con respecto al patrón
Patrón	4"	0%
A1-M1	4"	0%
A1-M2	4"	0%
A1-M3	4"	0%
A1-M4	4 ½"	13%
A2-M1	4"	0%
A2-M2	4"	0%
A2-M3	4"	0%
A2-M4	4 ¼"	6%
A3-M1	3 ¾"	-6%
A3-M2	3 ¾"	-6%
A3-M3	4 ½"	13%
A3-M4	4 ¼"	6%

Figura 7.

Asentamiento de las mezclas en estado fresco



5.1.1.3 Peso Unitario

Se observa que las variaciones en el peso unitario son de hasta 8.52 kilogramos, sin que se identifique un patrón directo o inversamente proporcional en relación con la dosificación.

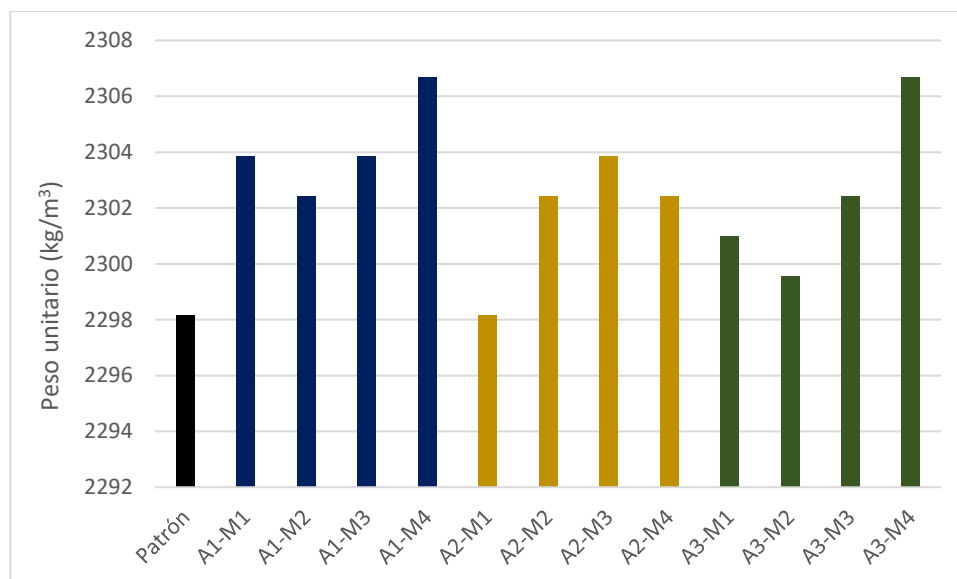
Tabla 32.

Variación de peso unitario de mezclas

Diseño de mezcla	Peso Unitario (kg/m ³)	Variación (kg)
Patrón	2298.15	0.00
A1-M1	2303.84	5.68
A1-M2	2302.41	4.26
A1-M3	2303.84	5.68
A1-M4	2306.68	8.52
A2-M1	2298.15	0.00
A2-M2	2302.41	4.26
A2-M3	2303.84	5.68
A2-M4	2302.41	4.26
A3-M1	2300.99	2.84
A3-M2	2299.57	1.42
A3-M3	2302.41	4.26
A3-M4	2306.68	8.52

Figura 8.

Peso unitario de mezclas



5.1.1.4 Contenido de aire

Se observa que las variaciones en el contenido de aire son de hasta 0.2%, lo que representa un 9% en comparación con la mezcla patrón. Según la norma NTP 339.046, el valor de la precisión es de 0.1%. Además, no se identifica un patrón directo o inversamente proporcional en relación con la dosificación

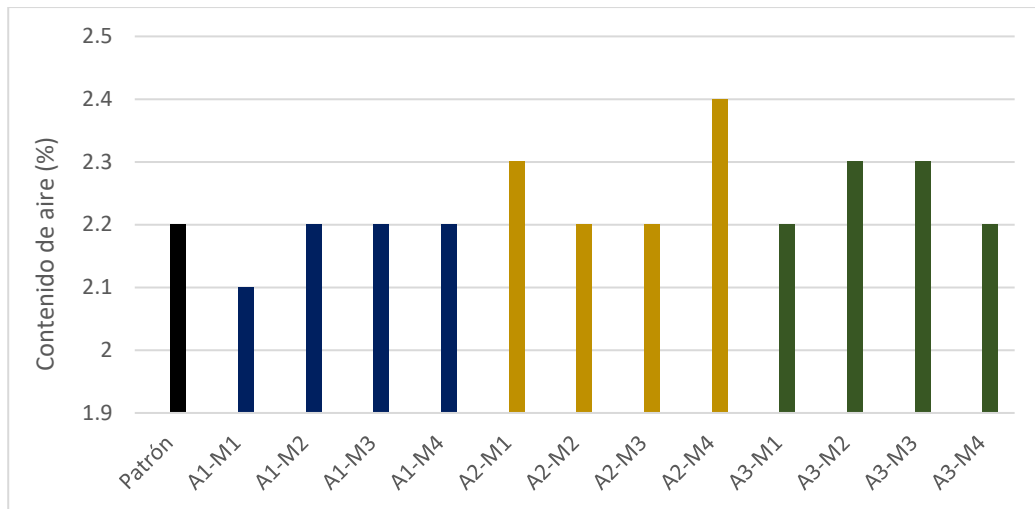
Tabla 33.

Variación de contenido de aire de mezclas

Diseño de mezcla	Contenido de aire (%)	Variación con respecto al patrón (%)
Patrón	2.2	0%
A1-M1	2.1	-5%
A1-M2	2.2	0%
A1-M3	2.2	0%
A1-M4	2.2	0%
A2-M1	2.3	5%
A2-M2	2.2	0%
A2-M3	2.2	0%
A2-M4	2.4	9%
A3-M1	2.2	0%
A3-M2	2.3	5%
A3-M3	2.3	5%
A3-M4	2.2	0%

Figura 9.

Contenido de aire de mezclas



5.1.2 Concreto en estado endurecido

En este segundo apartado, se evaluarán y compararán los resultados de los ensayos realizados sobre el concreto en estado endurecido.

5.1.2.1 Resistencia a la compresión axial

Se observa que las variaciones en los ensayos del concreto en estado endurecido son de hasta -17% a 3 días, -36% a 7 días y +9% a 28 días en comparación con la mezcla patrón. En cada caso, no se identifica un patrón claro de influencia directa o inversa con respecto a la dosificación. Esto sugiere que las variaciones en la resistencia del concreto no siguen una tendencia consistente relacionada con los diferentes niveles de dosificación.

Tabla 34.

Variación en la resistencia a la compresión axial en las mezclas para 3, 7 y 28 días de curado

MEZCLA	Resistencia a Compresión Axial (kg/cm ²)					
	3 días	Variación	7 días	Variación	28 días	Variación
Patrón	121.10	0%	195.3	0%	285.6	0%
A1-M1	123.20	2%	190.8	-2%	297.3	4%
A1-M2	118.50	-2%	178.9	-8%	302.6	6%
A1-M3	114.90	-5%	191.7	-2%	307.6	8%
A1-M4	121.40	0%	215.1	10%	310.3	9%
A2-M1	110.10	-9%	172.4	-12%	296.6	4%
A2-M2	105.80	-13%	150.9	-23%	289.5	1%
A2-M3	109.50	-10%	167.7	-14%	284.6	0%
A2-M4	100.70	-17%	144	-26%	279.2	-2%
A3-M1	114.80	-5%	168.5	-13%	287.9	1%
A3-M2	114.90	-5%	180.5	-8%	298.8	5%
A3-M3	124.10	11%	167.7	-13%	285.2	0%
A3-M4	119.20	-2%	166.6	-15%	295.4	3%

Figura 10.

Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con tres días de curado

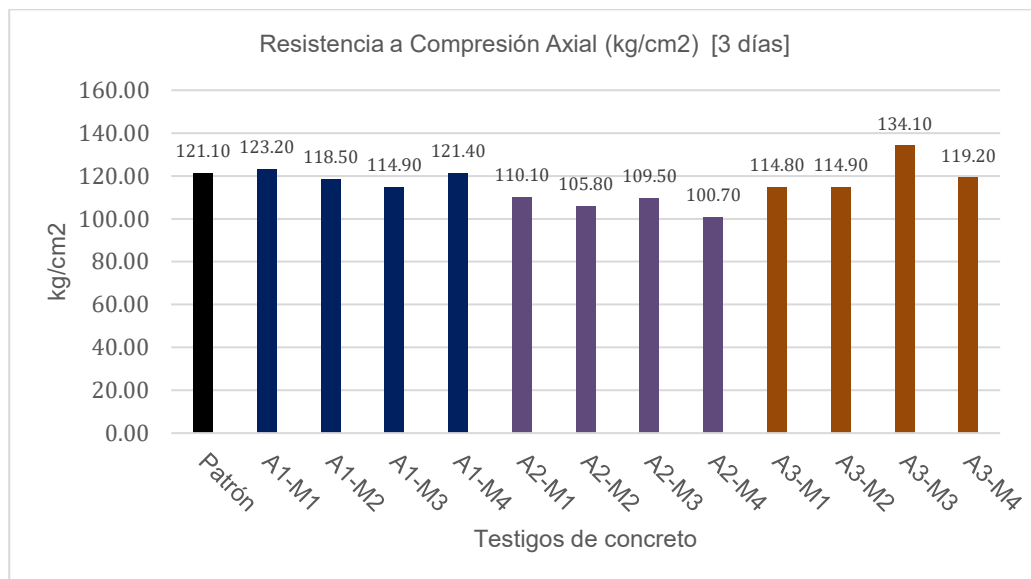


Figura 11.

Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con siete días de curado

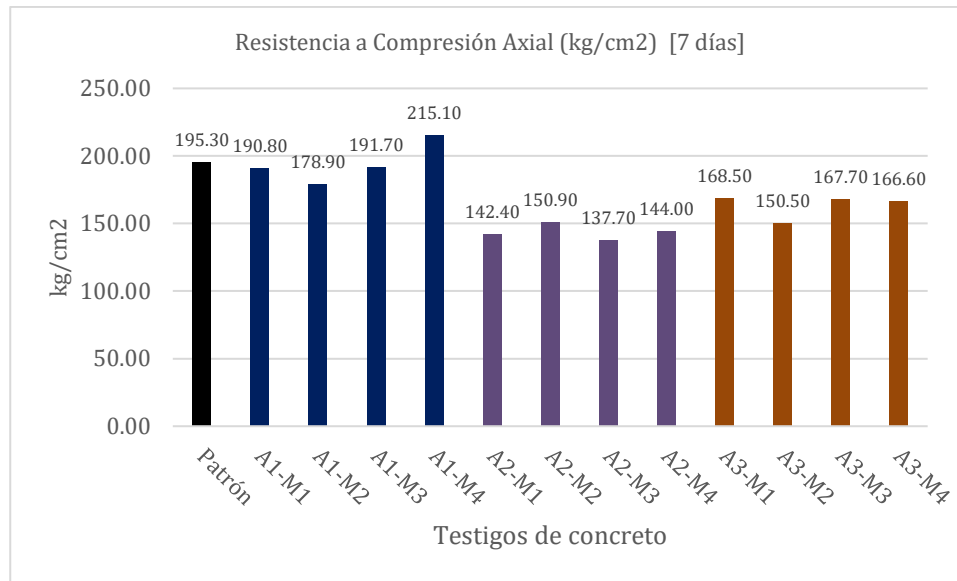
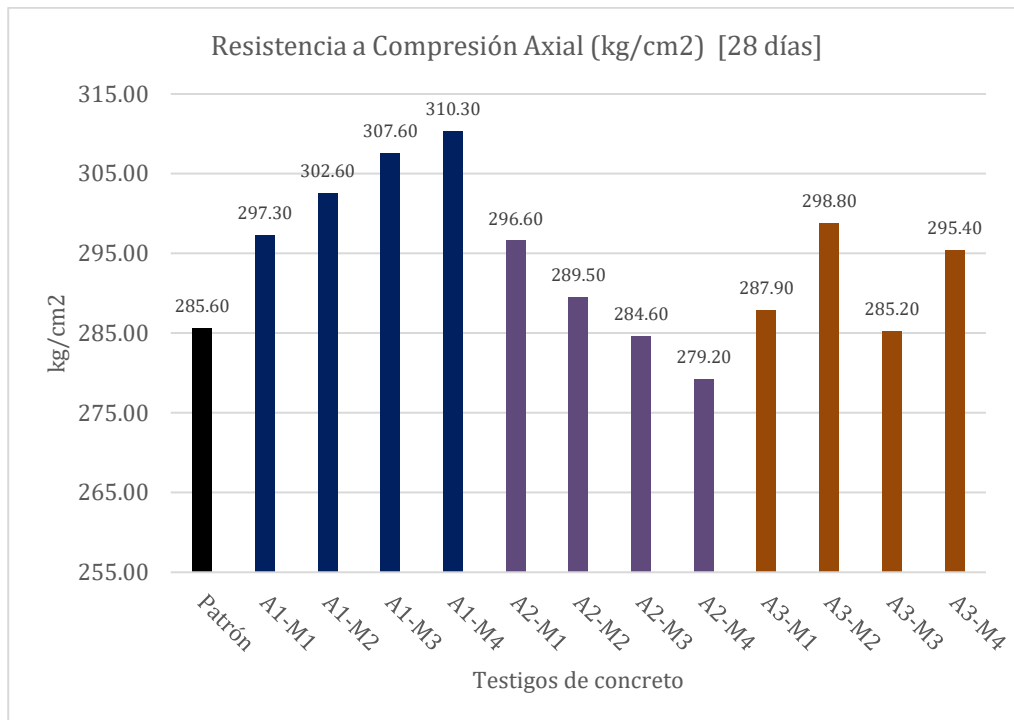


Figura 12.

Resistencia a la compresión axial de los testigos de concreto con veintiocho días de curado



5.1.2.1.1 Desarrollo de la resistencia

Este fenómeno se debe a la evolución gradual de la resistencia durante el proceso de hidratación del concreto. El desarrollo de la resistencia en el concreto implica observar la ganancia de resistencia a lo largo del período de curado (Sonker et al., 2021). Esto se logró recopilando la resistencia a la compresión obtenida a los 3, 7 y 28 días de curado para cada uno de los diseños realizados.

5.1.2.1.1.1 Concreto patrón

Figura 13.

Desarrollo de resistencia de concreto patrón

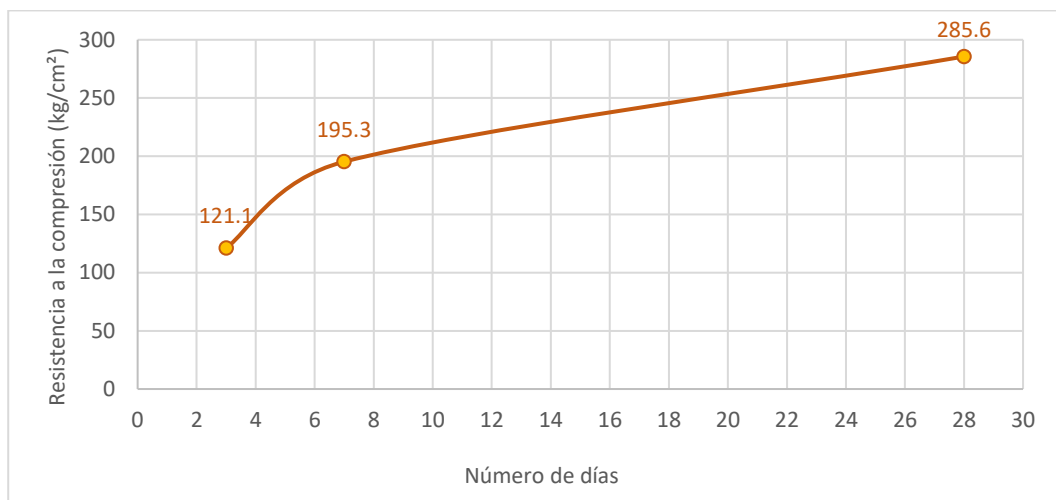
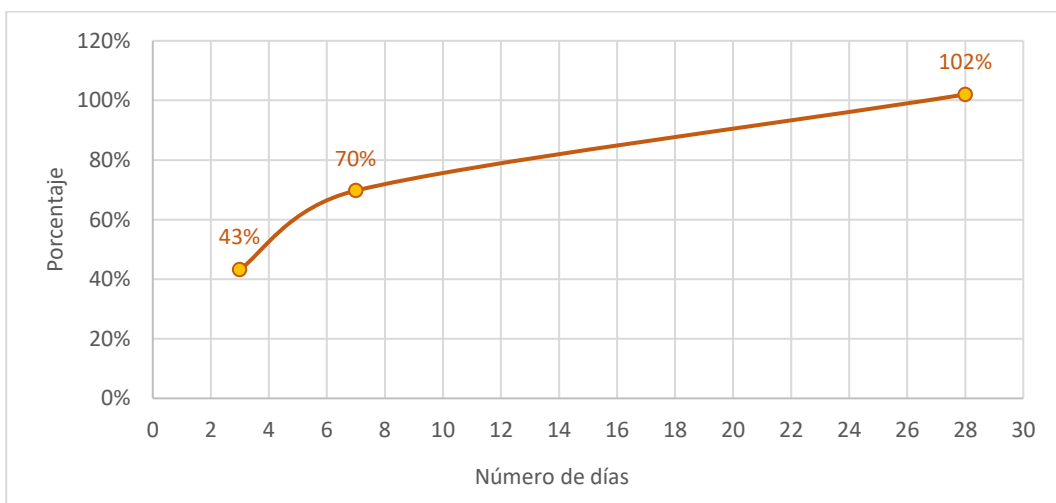


Figura 14.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de concreto patrón en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$)



5.1.2.1.1.2 Concreto con aditivo 1 al 0.5% en peso del cemento (A1-M1)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 1, dosificado al 0.5% en peso del cemento.

Figura 15.

Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M1 y patrón

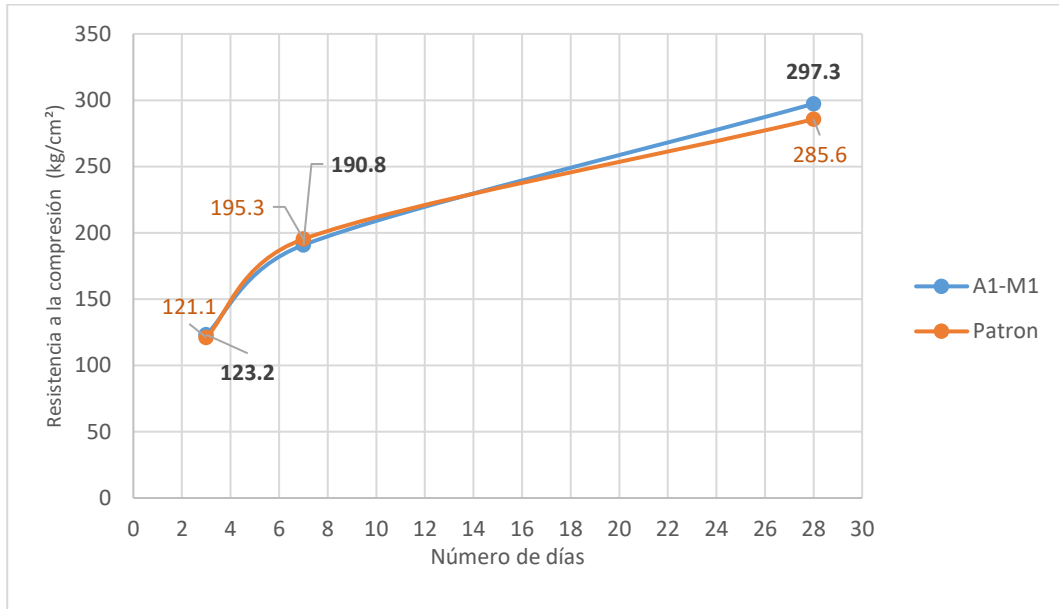
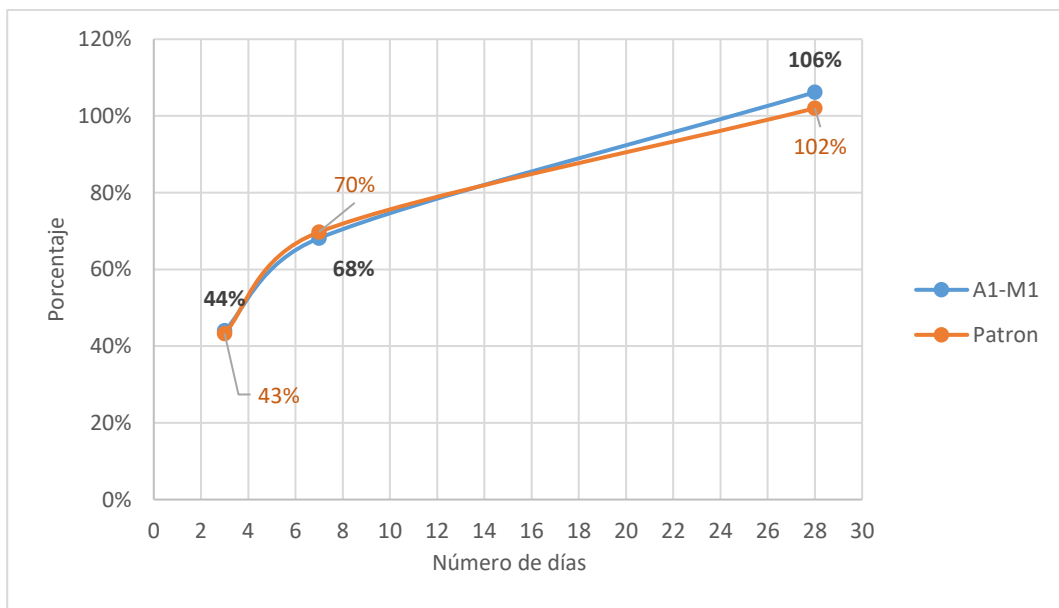


Figura 16.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.3 Concreto con aditivo 1 al 1.0% en peso del cemento (A1-M2)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 1, dosificado al 1.0% en peso del cemento.

Figura 17.

Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M2 y patrón

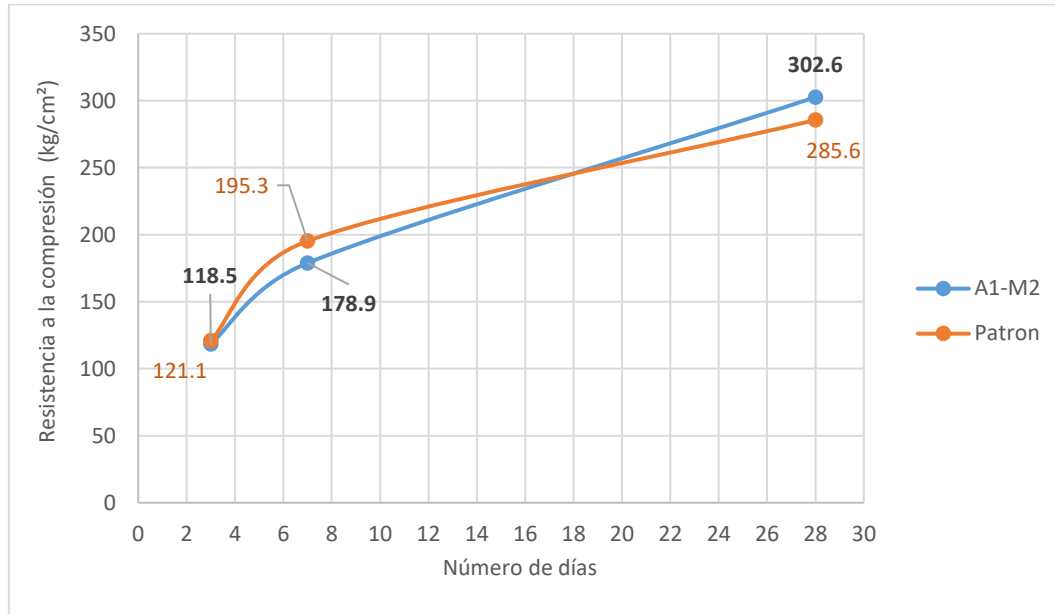
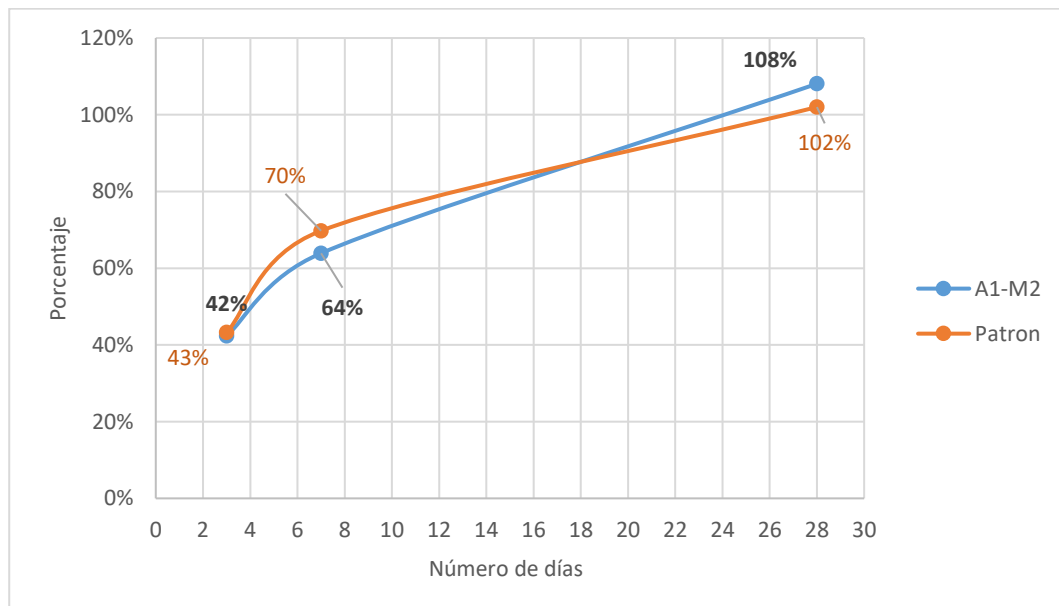


Figura 18.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.4 Concreto con aditivo 1 al 1.5% en peso del cemento (A1-M3)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 1, dosificado al 1.5% en peso del cemento.

Figura 19.

Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M3 y patrón

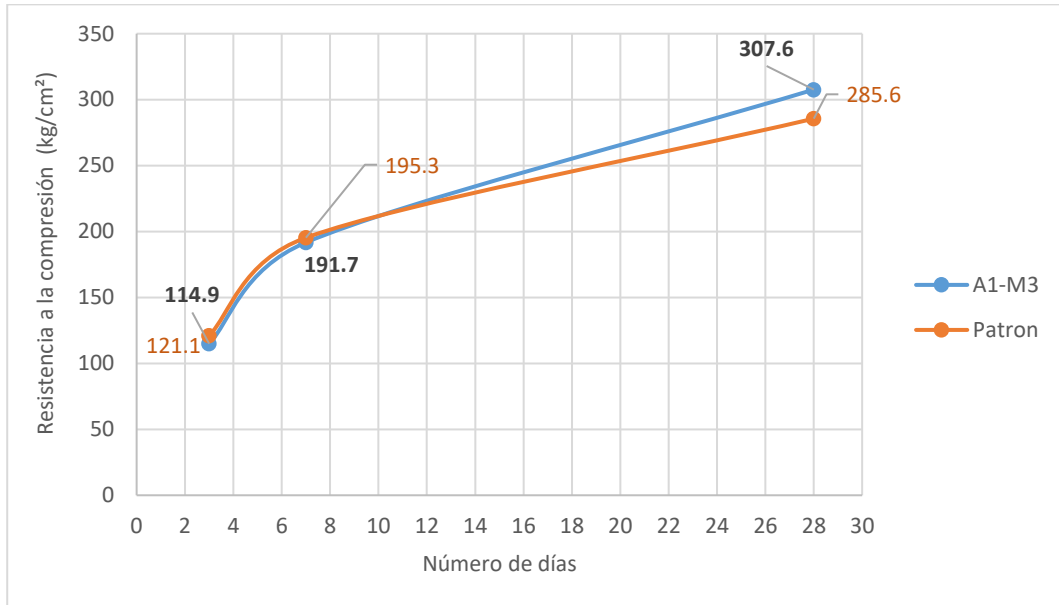
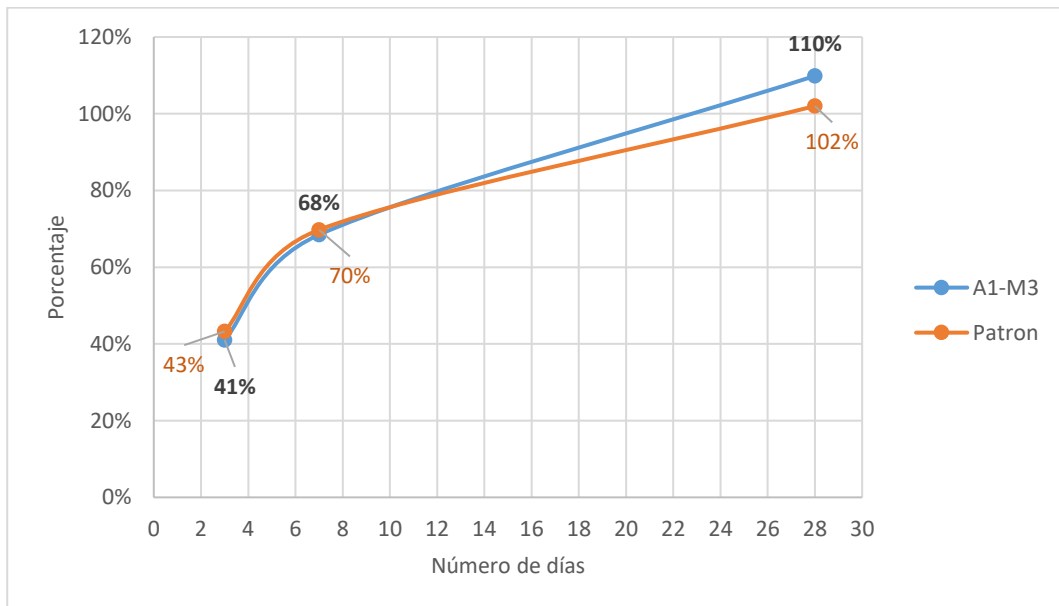


Figura 20.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.5 Concreto con aditivo 1 al 2.0% en peso del cemento (A1-M4)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 1, dosificado al 2.0% en peso del cemento.

Figura 21.

Desarrollo de resistencia la mezcla A1-M4 y patrón

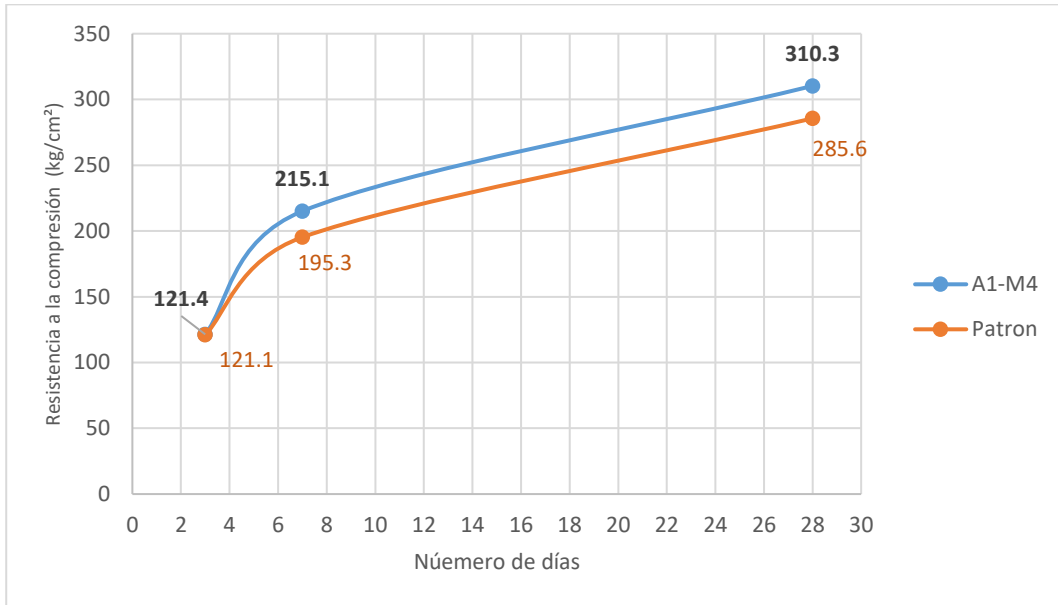
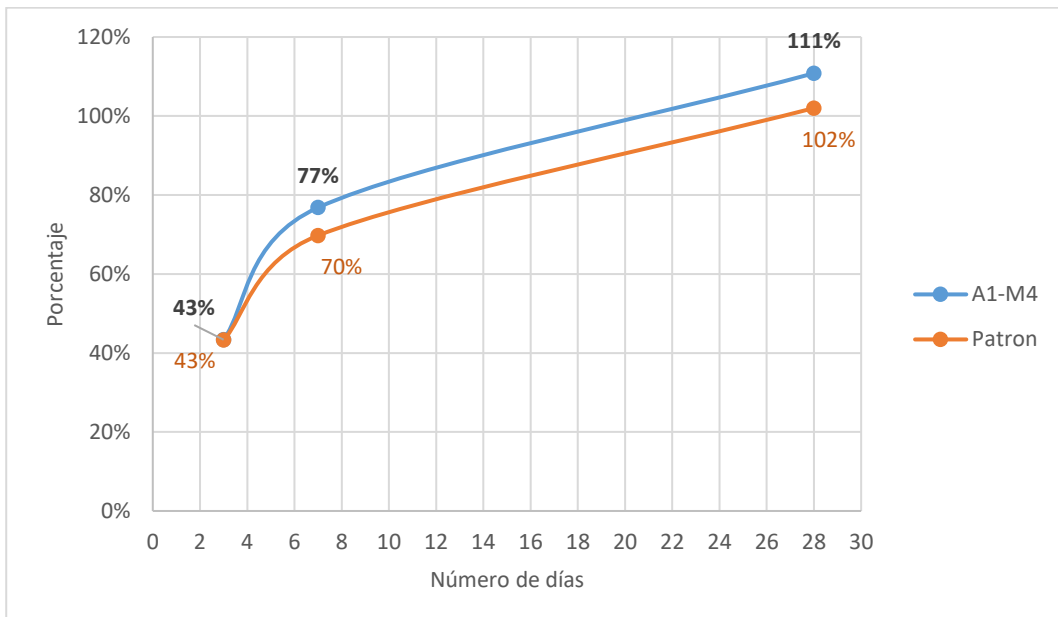


Figura 22.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A1-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.6 Concreto con aditivo 2 al 0.5% en peso del cemento (A2-M1)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 2, dosificado al 0.5% en peso del cemento.

Figura 23.

Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M1 y patrón

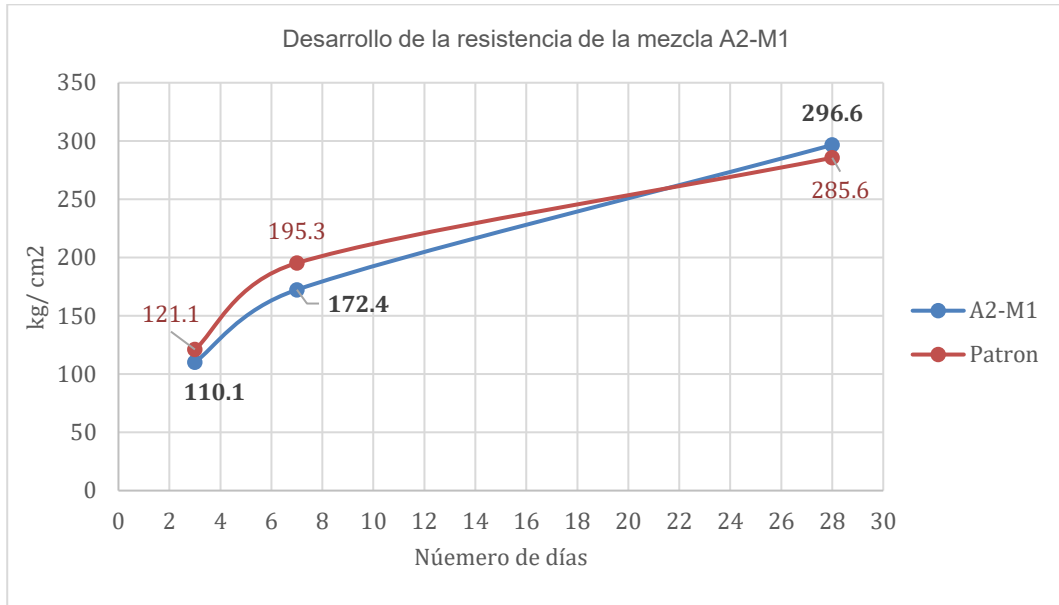
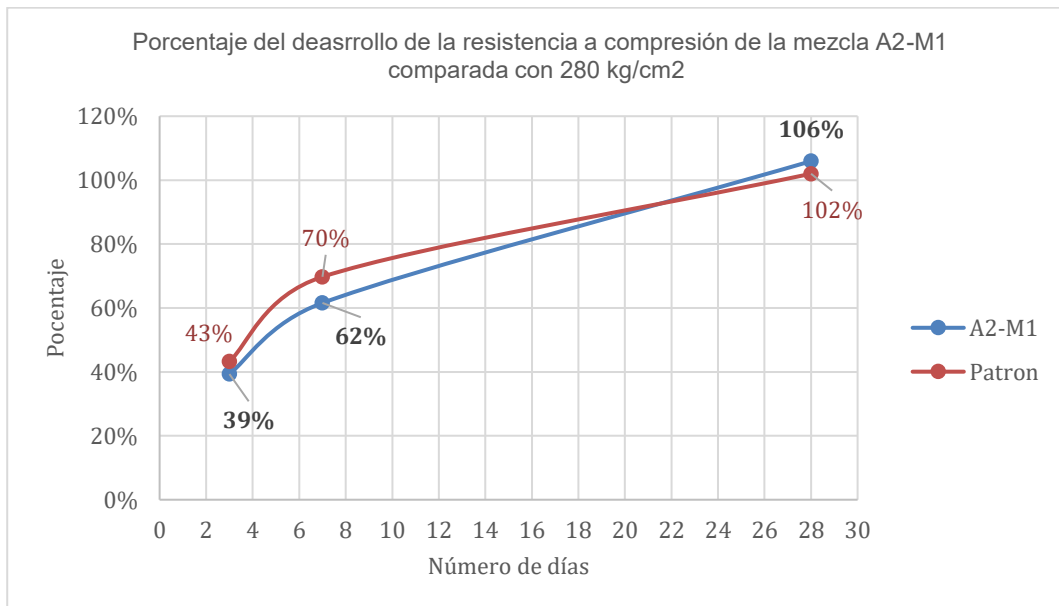


Figura 24.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.7 Concreto con aditivo 2 al 1.0% en peso del cemento (A2-M2)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 2, dosificado al 1.0% en peso del cemento.

Figura 25.

Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M2 y patrón

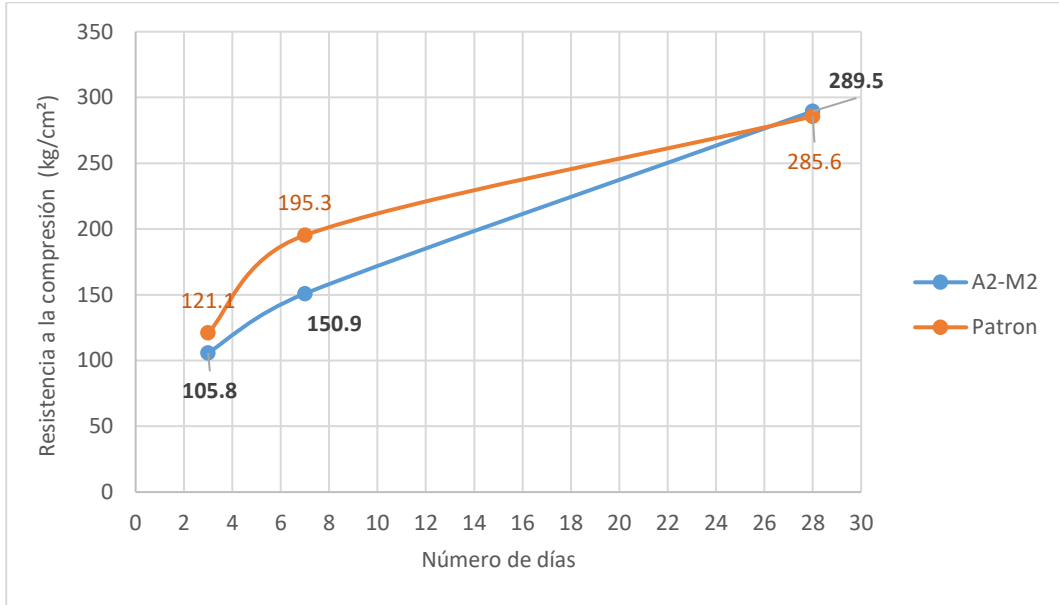
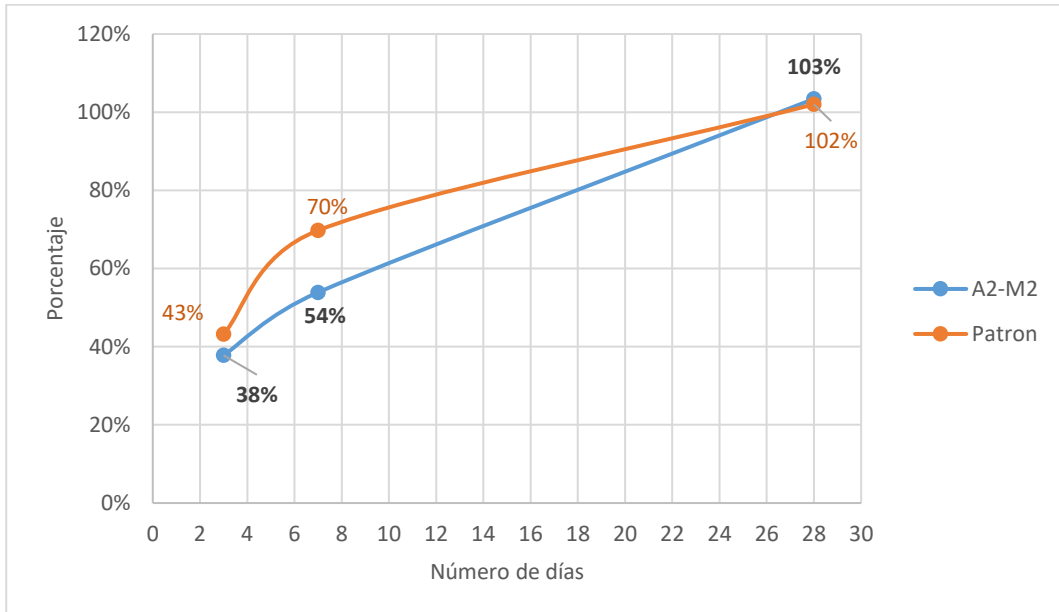


Figura 26.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.8 Concreto con aditivo 2 al 1.5% en peso del cemento (A2-M3)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 2, dosificado al 1.5% en peso del cemento.

Figura 27.

Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M3 y patrón

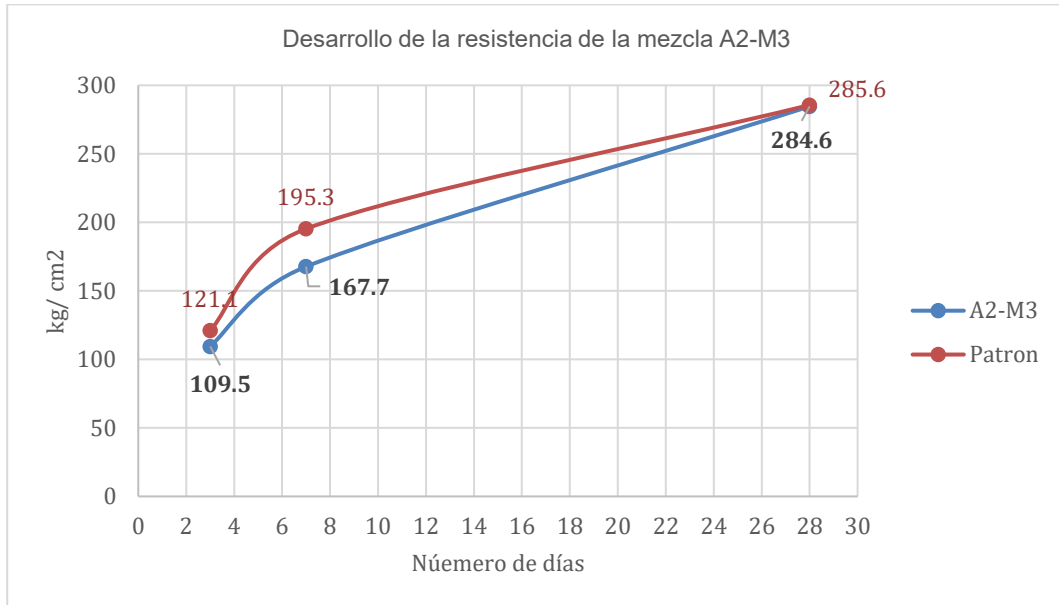
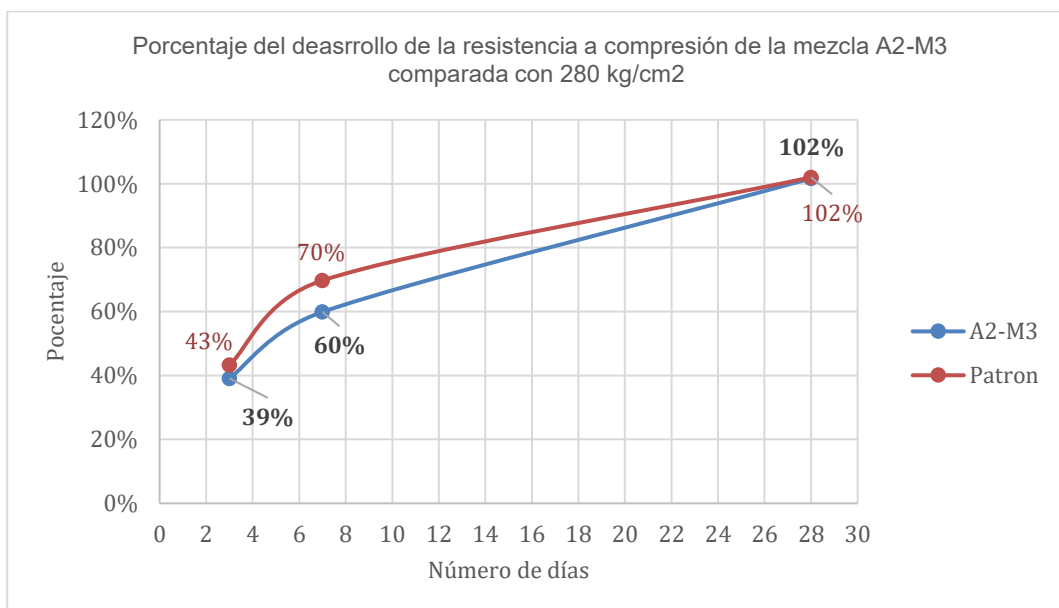


Figura 28.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.9 Concreto con aditivo 2 al 2.0% en peso del cemento (A2-M4)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 2, dosificado al 2.0% en peso del cemento.

Figura 29.

Desarrollo de resistencia la mezcla A2-M4 y patrón

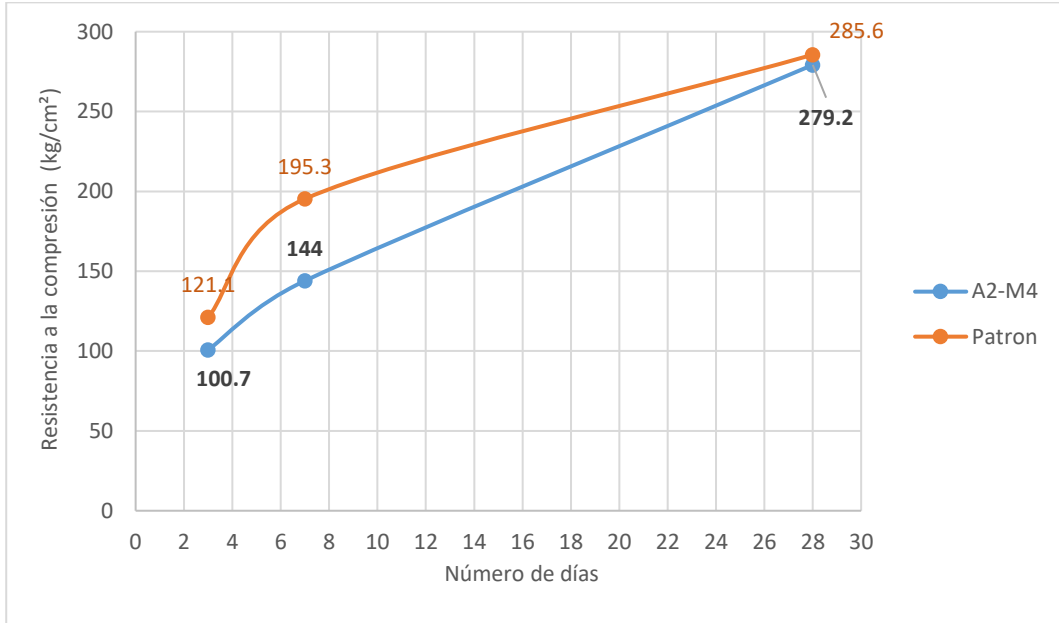
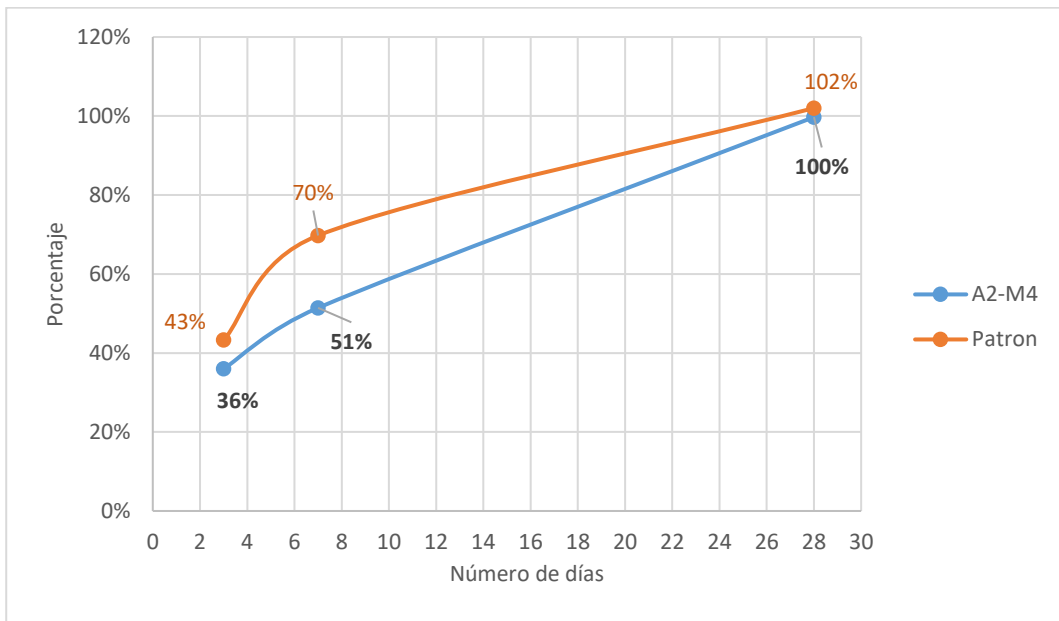


Figura 30.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A2-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.10 Concreto con aditivo 3 al 0.5% en peso del cemento (A3-M1)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 3, dosificado al 0.5% en peso del cemento.

Figura 31.

Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M1 y patrón

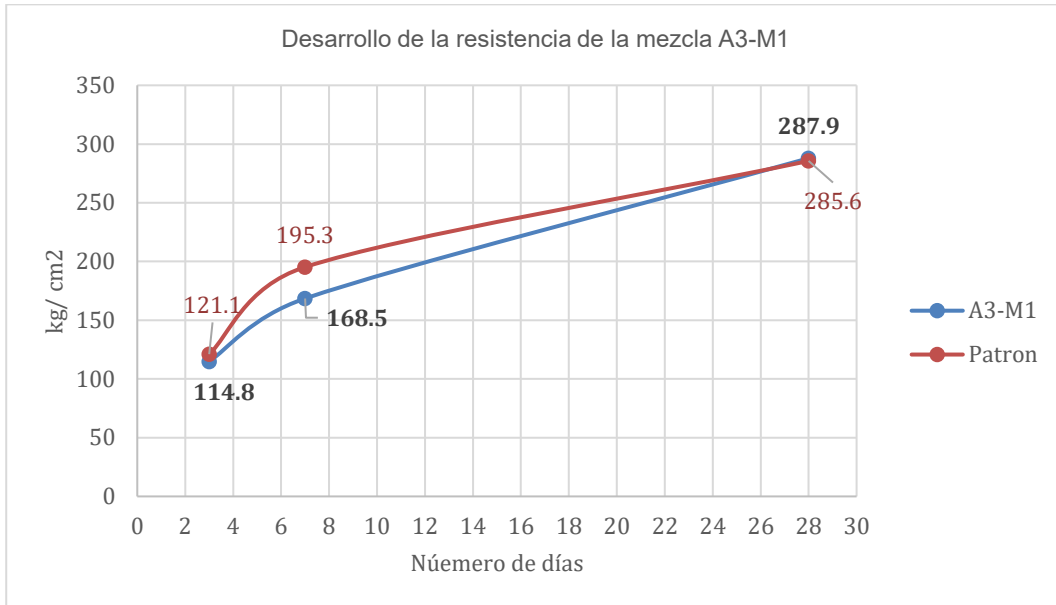
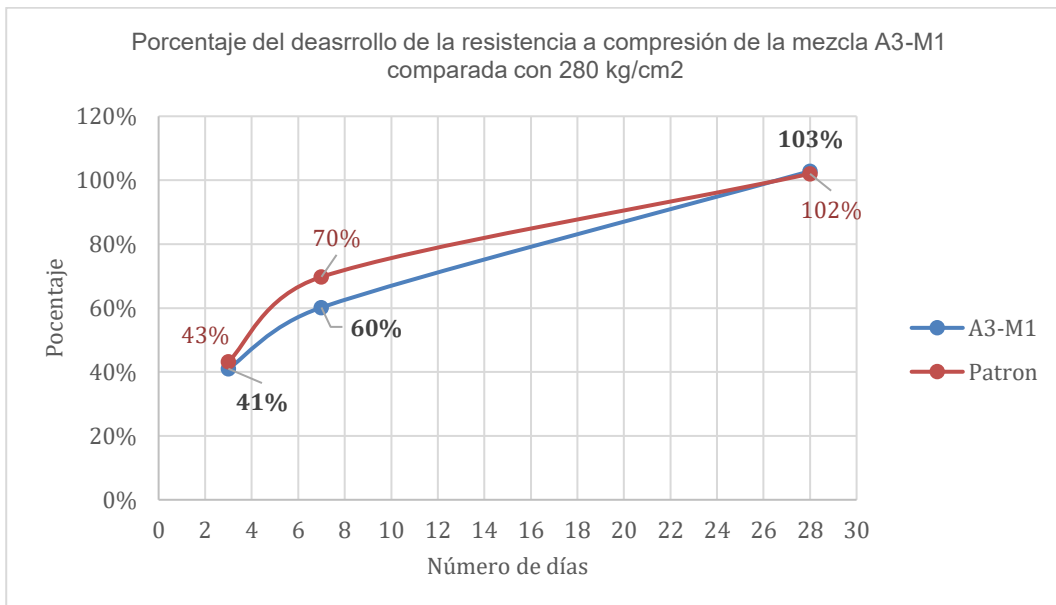


Figura 32.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M1 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.11 Concreto con aditivo 3 al 1.0% en peso del cemento (A3-M2)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 3, dosificado al 1.0% en peso del cemento.

Figura 33.

Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M2 y patrón

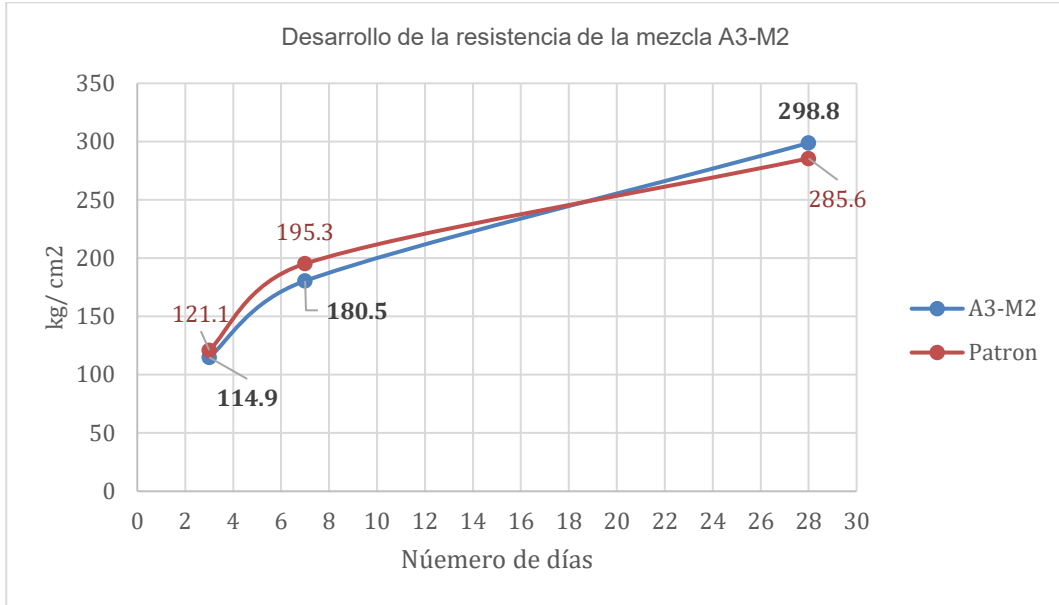
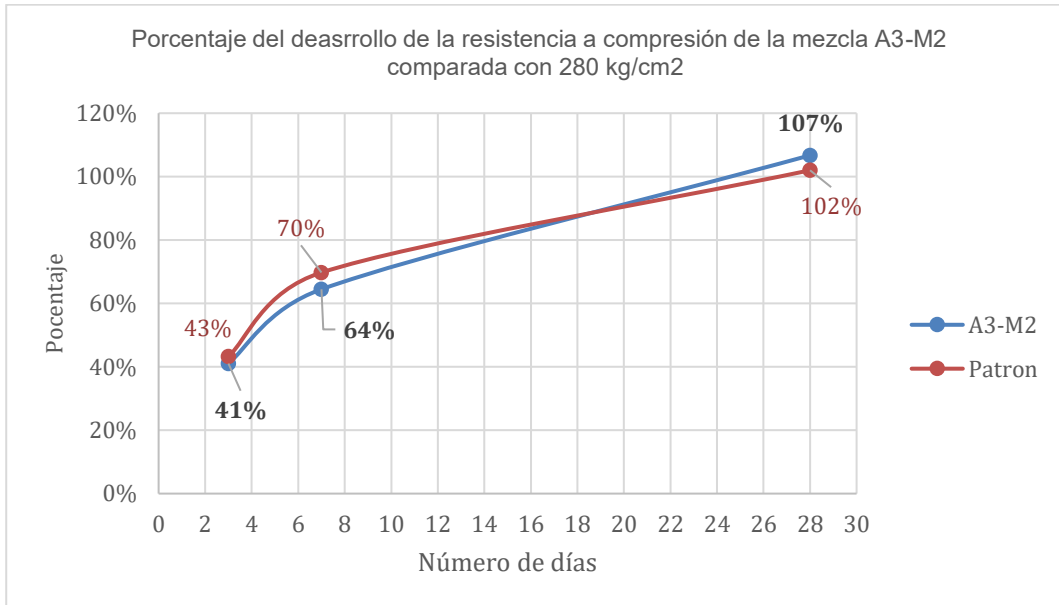


Figura 34.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M2 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.12 Concreto con aditivo 3 al 1.5% en peso del cemento (A3-M3)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 3, dosificado al 1.5% en peso del cemento.

Figura 35.

Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M3 y patrón

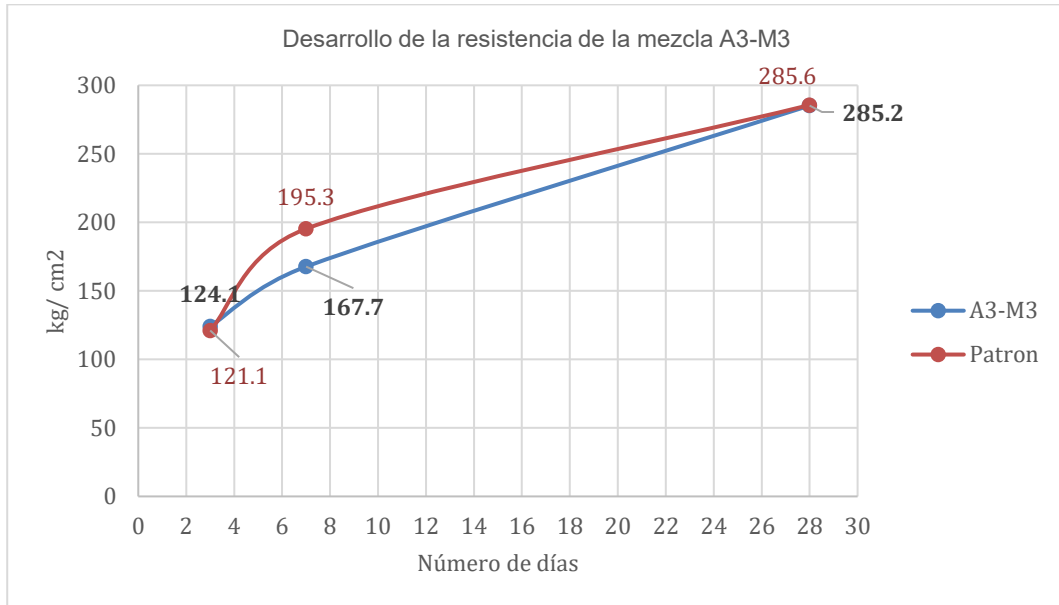
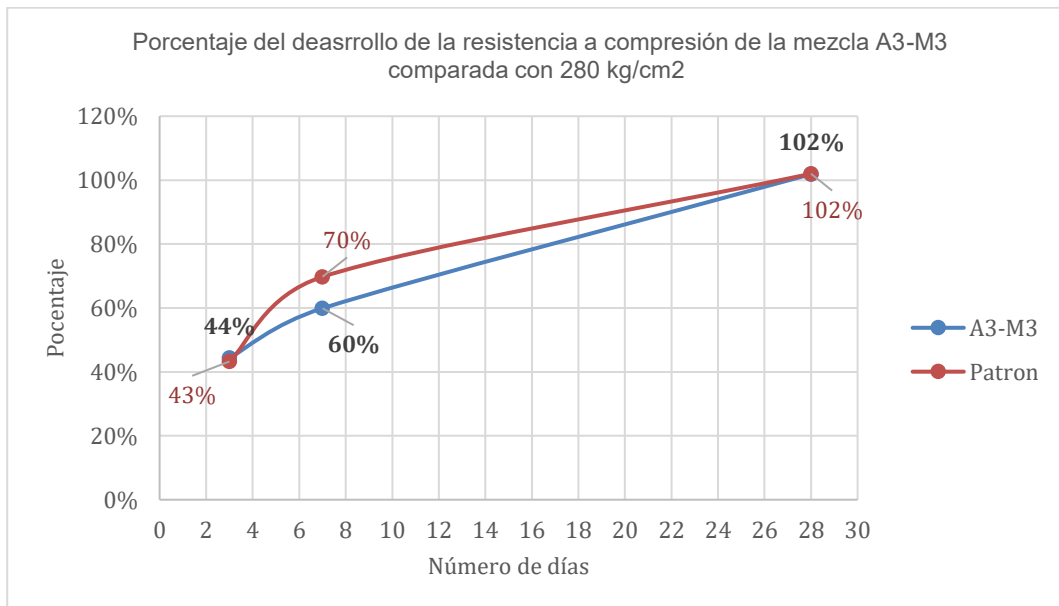


Figura 36.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M3 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón



5.1.2.1.1.13 Concreto con aditivo 3 al 2.0% en peso del cemento (A3-M4)

En esta sección se presenta el desarrollo de la resistencia del concreto patrón con aditivo 3, dosificado al 2.0% en peso del cemento.

Figura 37.

Desarrollo de resistencia la mezcla A3-M4 y patrón

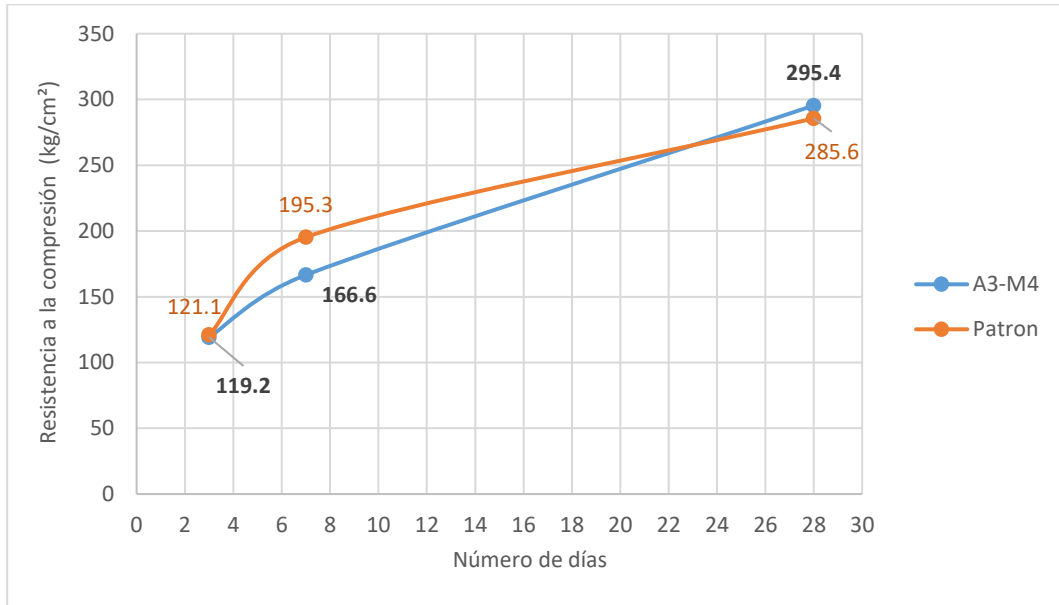
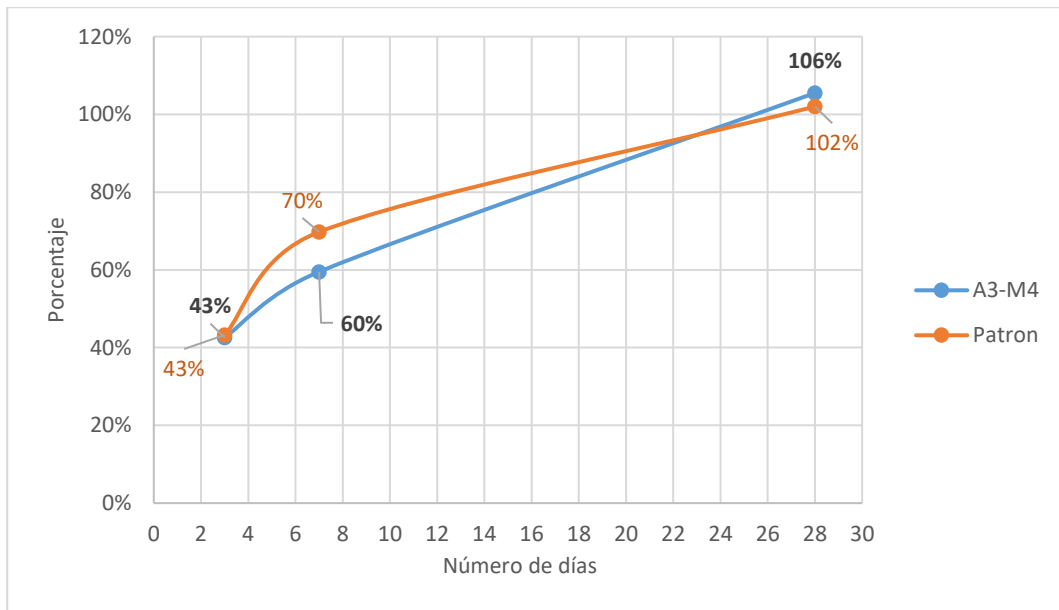


Figura 38.

Porcentaje de desarrollo de resistencia de mezcla A3-M4 en comparación a la resistencia especificada ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) y patrón

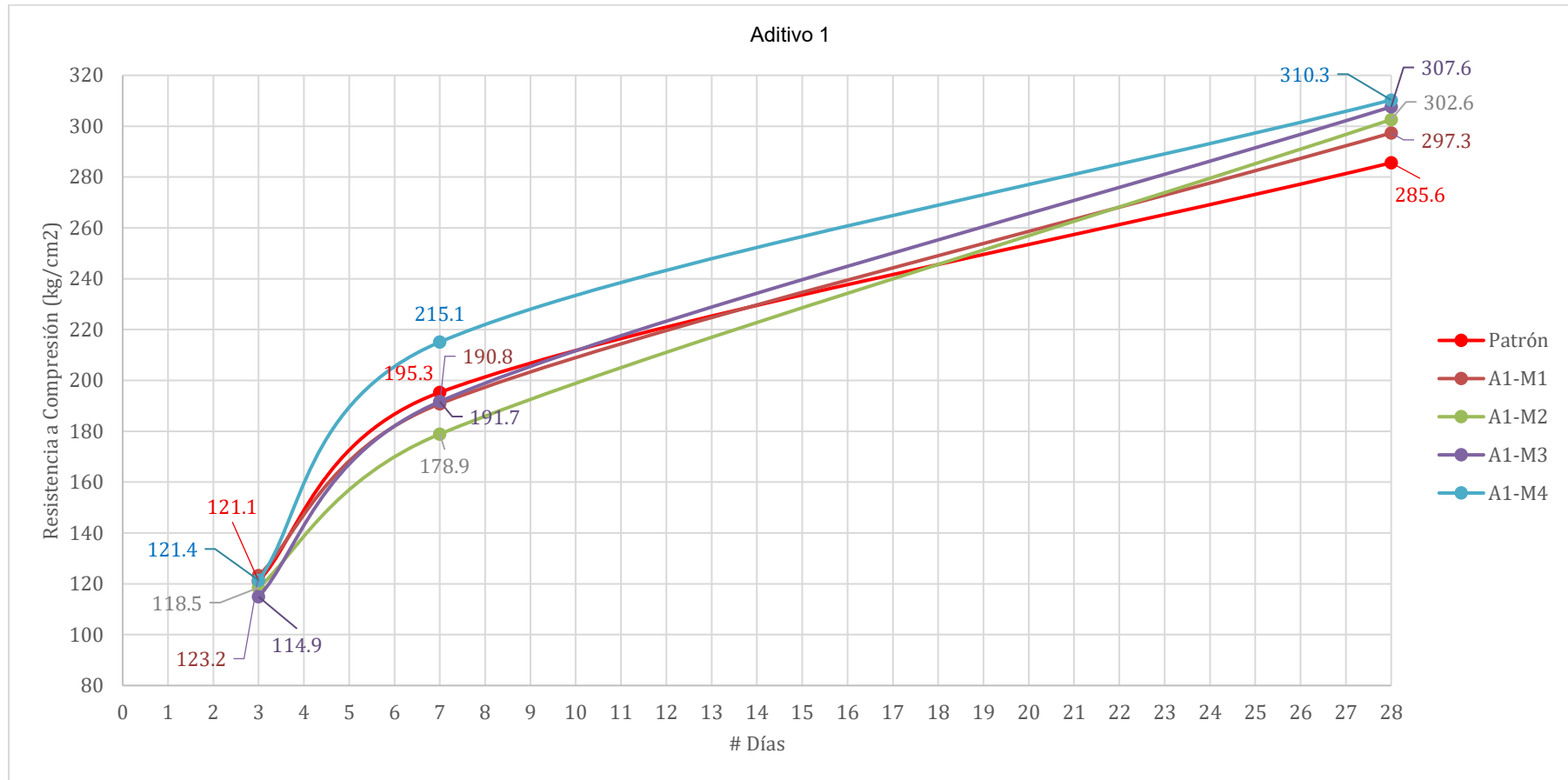


5.1.2.1.2 Comparación de todas las mezclas de la investigación

Para comparar el desarrollo de resistencia de las mezclas con aditivo en diferentes dosificaciones, y la mezcla patrón, se elaboran las siguientes gráficas. Respecto al aditivo 1:

Figura 39.

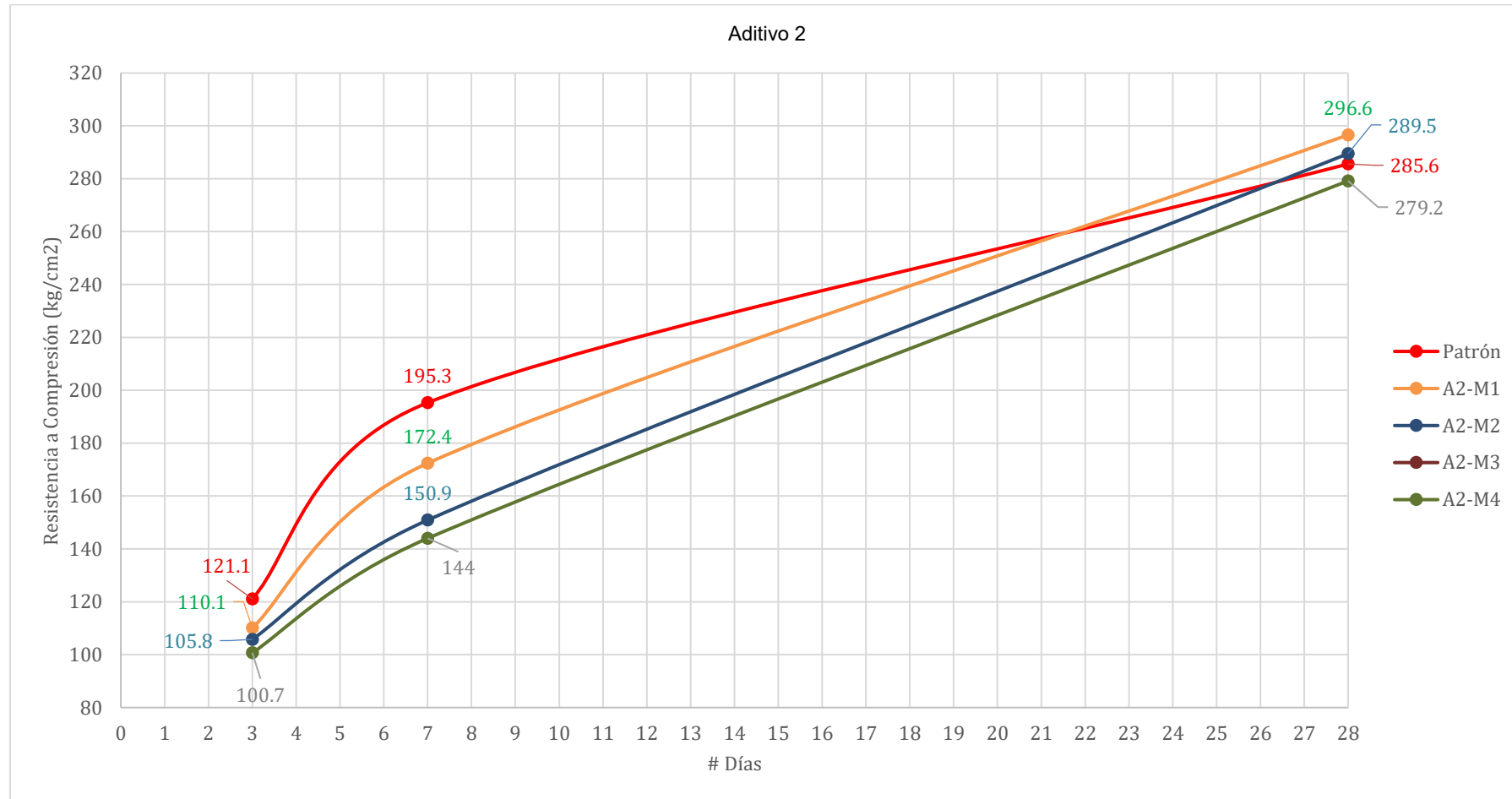
Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 1 y mezcla patrón



De manera similar para las mezclas con el aditivo 2:

Figura 40.

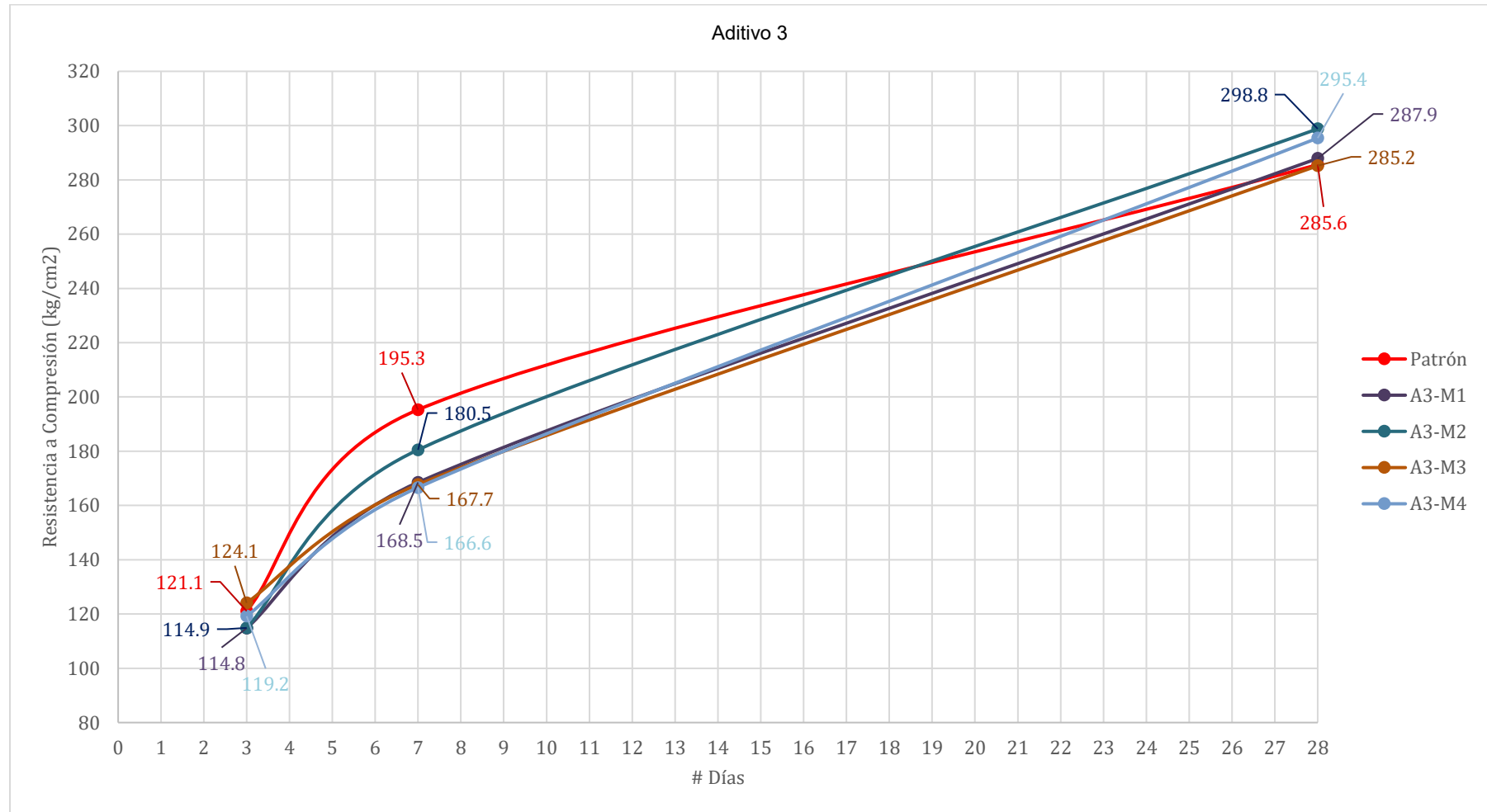
Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 2 y mezcla patrón



La comparación con las mezclas con el aditivo 3:

Figura 41.

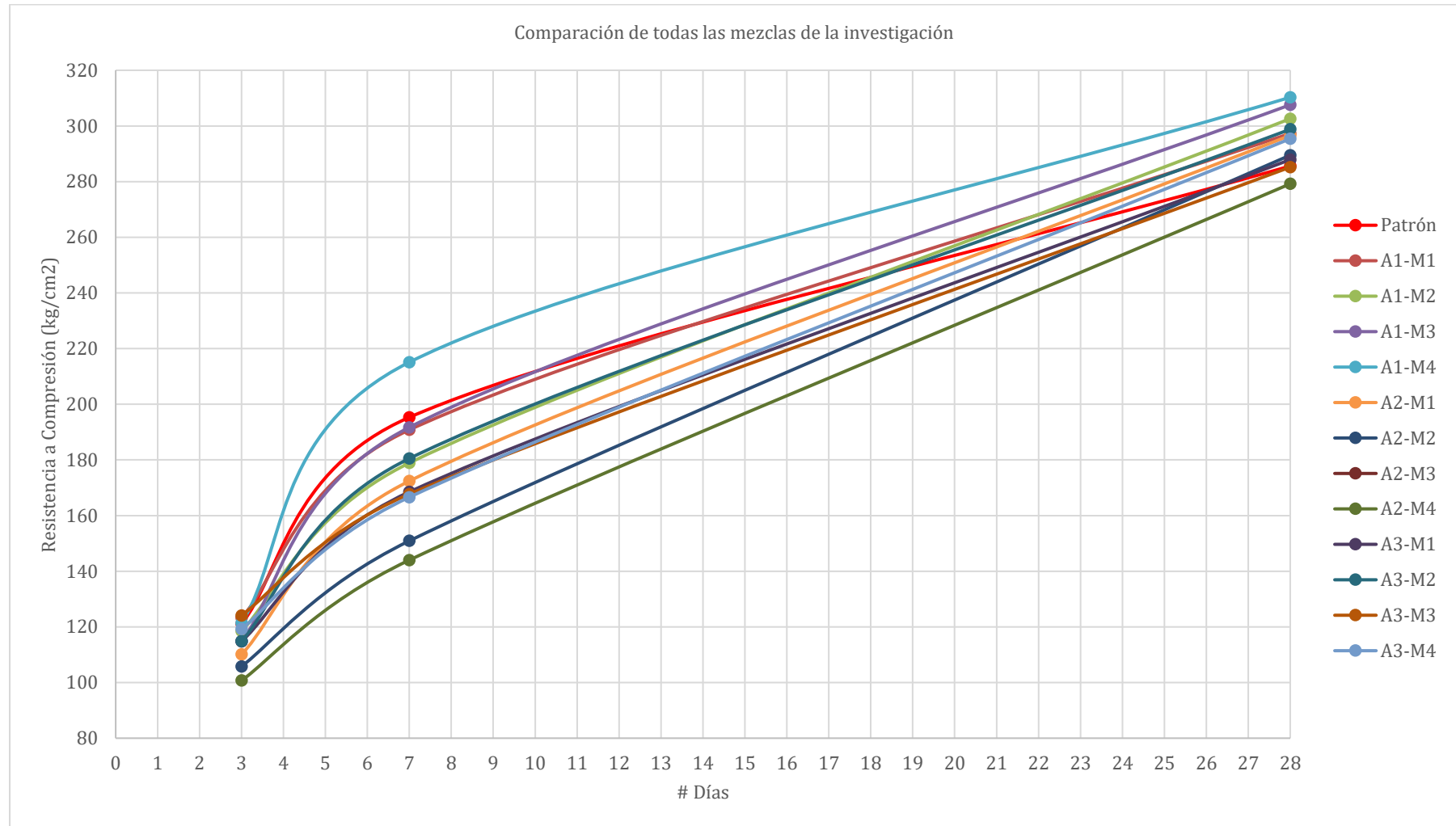
Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas con aditivo 3 y mezcla patrón



Finalmente, se presenta una comparación total empleando las 13 mezclas de la investigación:

Figura 42.

Comparación del desarrollo de resistencia de todas las mezclas de la investigación



5.1.2.2 Profundidad de penetración del agua

Se observa que las variaciones en la profundidad de penetración del agua, o permeabilidad, pueden llegar hasta un 71%. No se identifica un patrón claro, ya sea directa o inversamente proporcional, en relación con la dosificación del aditivo.

Tabla 35.*Variación de profundidad de penetración en diseños de mezcla*

Diseño de mezcla	Profundidad de penetración (mm)	Variación (Reducción de permeabilidad)
Patrón	14.6	0%
A1-M1	13.8	-5%
A1-M2	7.8	-47%
A1-M3	5.8	-60%
A1-M4	4.3	-71%
A2-M1	11.4	-22%
A2-M2	6.7	-54%
A2-M3	11.9	-18%
A2-M4	4.9	-66%
A3-M1	14.4	-1%
A3-M2	10.1	-31%
A3-M3	6.1	-58%
A3-M4	6.4	-56%

Tabla 36.*Profundidad de penetración ordenada de manera ascendente*

Diseño de mezcla	Profundidad de penetración (mm)	Variación (Reducción de permeabilidad)
Patrón	14.6	0%
A3-M1	14.4	-1%
A1-M1	13.8	-5%
A2-M3	11.9	-18%
A2-M1	11.4	-22%
A3-M2	10.1	-31%
A1-M2	7.8	-47%
A2-M2	6.7	-54%
A3-M4	6.4	-56%
A3-M3	6.1	-58%
A1-M3	5.8	-60%
A2-M4	4.9	-66%
A1-M4	4.3	-71%

Las tres dosificaciones que lograron la mayor impermeabilización del concreto fueron: el aditivo 1 con una dosificación del 2% respecto al peso del cemento, logrando una reducción del 71% en comparación con la mezcla patrón; el aditivo 2 con una dosificación del 2%, que resultó en una reducción del 66%; y nuevamente el aditivo 1 con una dosificación del 1.5%, alcanzando una reducción del 60% respecto al patrón.

5.1.2.2.1 Concreto Patrón con aditivo 1

Se presentan los resultados de la profundidad de penetración las mezclas elaboradas con el aditivo 1 y la comparación con la mezcla patrón.

Figura 43.

Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 1

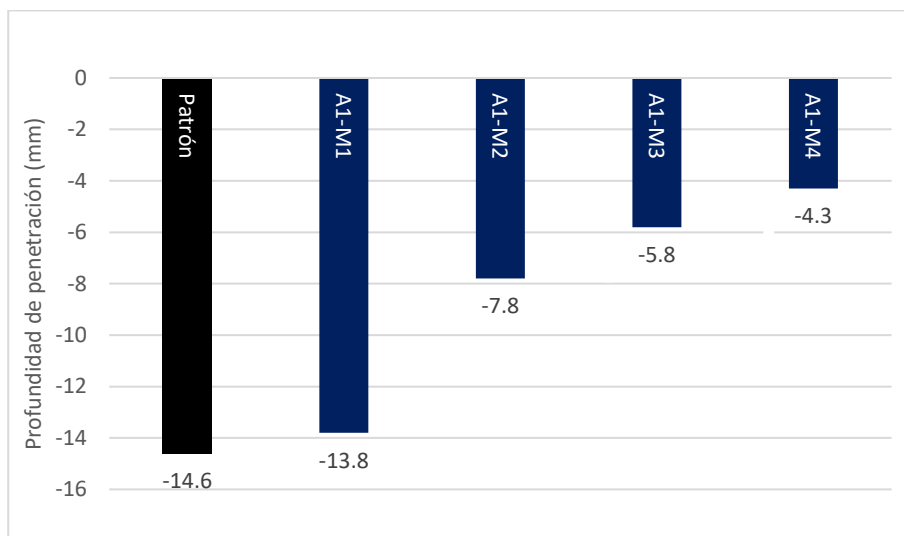
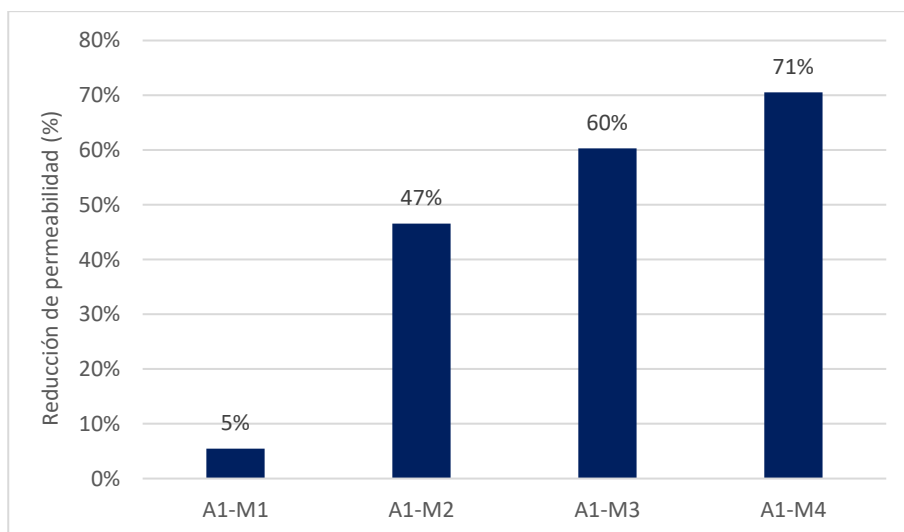


Figura 44.

Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 1 en comparación a mezcla patrón



5.1.2.2.2 Concreto Patrón con aditivo 2

Se presentan los resultados de la profundidad de penetración las mezclas elaboradas con el aditivo 2 y la comparación con la mezcla patrón.

Figura 45.

Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 2

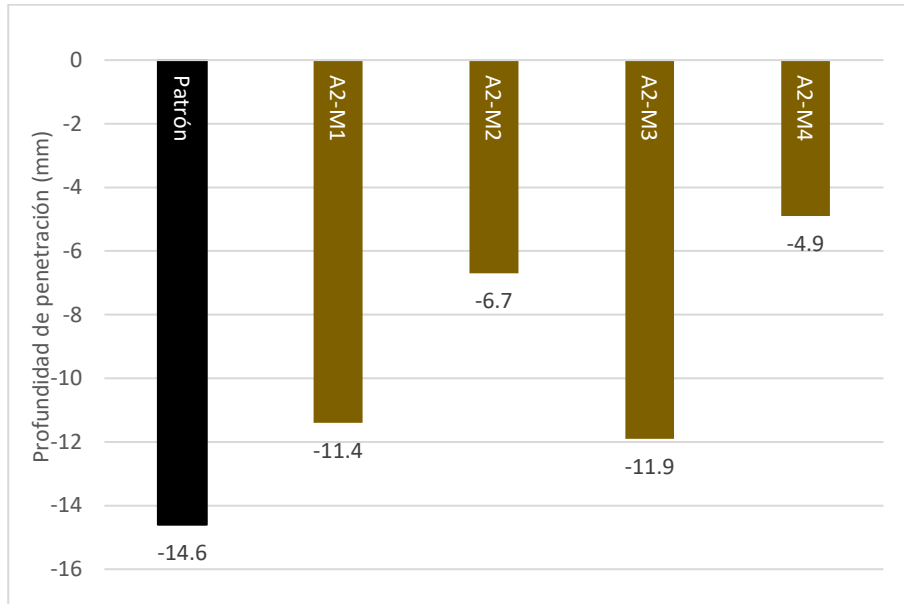
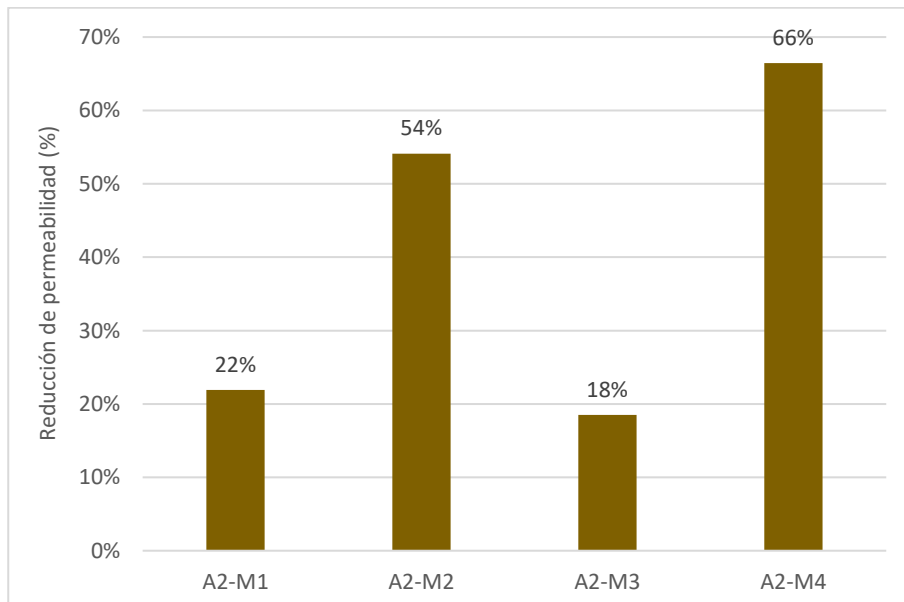


Figura 46.

Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 2 en comparación a mezcla patrón



5.1.2.2.3 Concreto Patrón con aditivo 3

Se presentan los resultados de la profundidad de penetración las mezclas elaboradas con el aditivo 2 y la comparación con la mezcla patrón.

Figura 47.

Profundidad de penetración de mezclas con aditivo 3

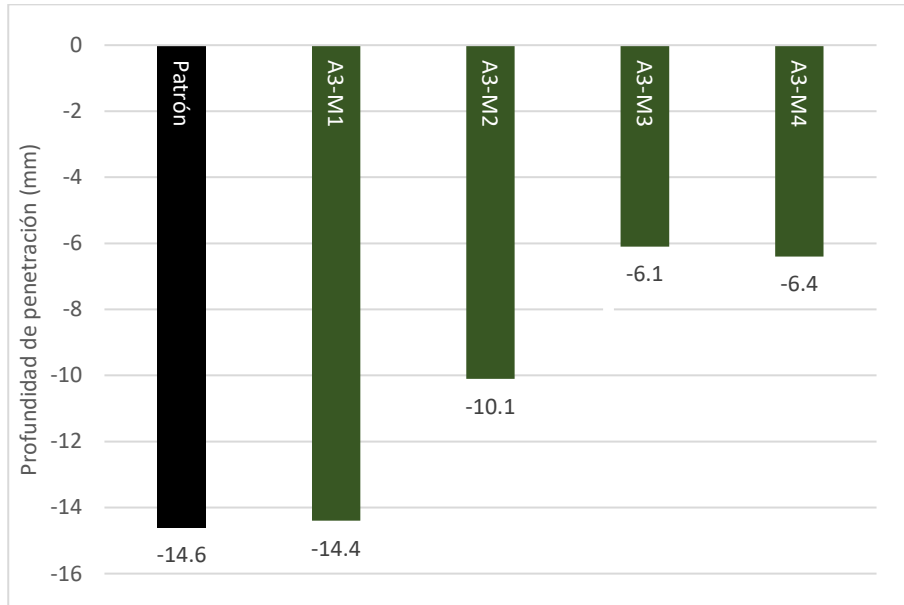
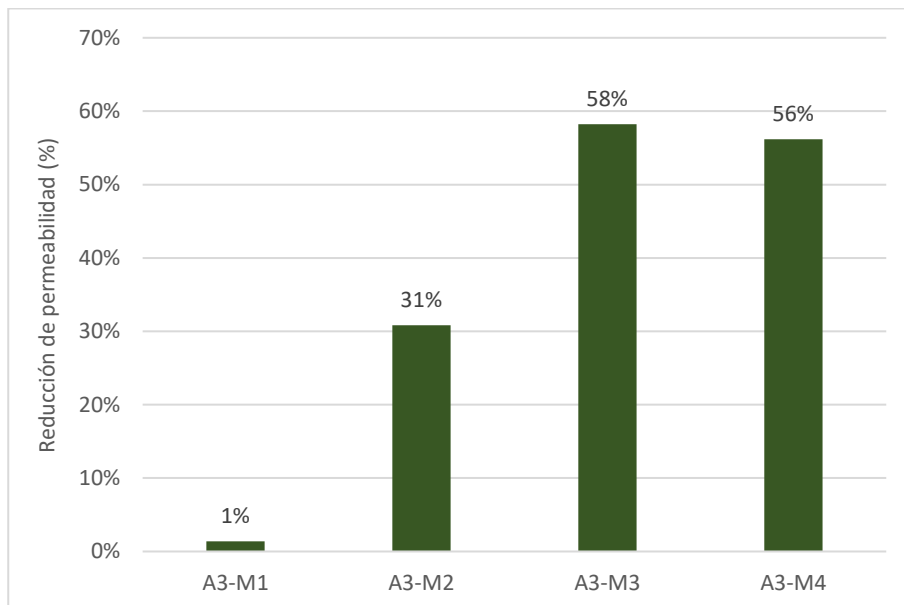


Figura 48.

Reducción de permeabilidad de mezclas con aditivo 3 en comparación a mezcla patrón



5.2 Discusión

5.2.1 Comparación de resultados

En esta sección, se comparan y analizan los resultados obtenidos de los ensayos realizados tanto en estado fresco como endurecido de las diferentes mezclas de concreto, con y sin la incorporación de aditivos impermeabilizantes por cristalización. Se busca identificar la existencia de correlaciones entre las dosificaciones de los aditivos y las propiedades mecánicas del concreto, como la resistencia a la compresión y la permeabilidad. Se presentan los resultados compilados de acuerdo con las dosificaciones empleadas. Primeramente, aquellos correspondientes a las mezclas con dosificación 0.50% del peso del cemento.

Tabla 37.

Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 0.50% del peso del cemento

Concreto patrón + Aditivo con dosificación de 0.50% del peso del cemento											
Aditivo	Temperatura (°C)	Asentamiento		Peso Unitario (kg/m ³)	% aire		Compresión 28d		Permeabilidad		
		Pulg	Variación		Contenido	Variación	kg/cm ²	Variación	mm	Variación	
Patrón	25.5	4	0%	2298.15	2.2	0%	285.60	0%	14.6	0%	
Aditivo 1	25	4	0%	2303.84	2.1	-5%	297.30	4%	13.8	-5%	
Aditivo 2	25	4	0%	2298.15	2.3	5%	296.60	4%	11.4	-22%	
Aditivo 3	25	3.75	-6%	2300.99	2.2	0%	287.90	1%	14.4	-1%	

Los datos presentados en la Tabla 37 revelan cierto efecto en la resistencia a la compresión y una ligera reducción en la permeabilidad en comparación con la mezcla patrón. Si bien la reducción en la profundidad de penetración de agua no es tan significativa como en otras

dosificaciones mayores, se observa que incluso con una baja dosificación de aditivo se consigue una mejora en la impermeabilidad. Estos resultados podrían ser particularmente relevantes en proyectos donde se requiera un equilibrio entre costo y efectividad sin sacrificar demasiado la mejora en la durabilidad del concreto.

La siguiente tabla presenta los resultados para las mezclas con aditivos con dosificación de 1.00% del peso del cemento.

Tabla 38.

Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 1.00% del peso del cemento

Concreto patrón + Aditivo con dosificación de 1.00% del peso del cemento											
Aditivo	Temperatura (°C)	Asentamiento		Peso Unitario (kg/m ³)	% aire		Compresión 28d		Permeabilidad		
		Pulg	Variación		Contenido	Variación	kg/cm ²	Variación	mm	Variación	
Patrón	25.5	4	0%	2237.07	2.2	0%	285.60	0%	14.6	0%	
Aditivo 1	25.5	4	0%	2302.41	2.2	1%	302.60	6%	7.8	-47%	
Aditivo 2	25	4	0%	2302.41	2.2	1%	289.50	1%	6.7	-54%	
Aditivo 3	25	3.75	-6%	2299.57	2.3	6%	298.80	5%	10.1	-31%	

La Tabla 38 muestra una mejora más significativa en la reducción de la permeabilidad. Esto podría indicar que, al aumentar la cantidad de aditivo, el concreto mejora en términos de durabilidad, logrando una reducción más marcada en la profundidad de penetración del agua. Este nivel de dosificación podría representar una opción óptima para proyectos donde se busca una buena relación costo-beneficio respecto al aditivo 2, porque, como se verá en los siguientes resultados, esta reducción en la profundidad de penetración del agua cae. Respecto a la resistencia a la compresión, no se aprecian variaciones notables.

A continuación, se presentan los resultados para las mezclas con aditivos con dosificación de 1.50% del peso del cemento.

Tabla 39.

Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 1.50% del peso del cemento

Concreto patrón + Aditivo con dosificación de 1.50% del peso del cemento											
Aditivo	Temperatura (°C)	Asentamiento		Peso Unitario (kg/m ³)	% aire		Compresión 28d		Permeabilidad		
		Pulg	Variación		Contenido	Variación	kg/cm ²	Variación	mm	Variación	
Patrón	25.5	4	0%	2237.07	2.2	0%	285.60	0%	14.6	0%	
Aditivo 1	25.5	4	0%	2303.84	2.2	2%	307.60	8%	5.8	-60%	
Aditivo 2	25	4	0%	2303.84	2.2	2%	284.60	0%	11.9	-18%	
Aditivo 3	25	4.5	13%	2302.41	2.3	5%	285.20	0%	6.1	-58%	

Los resultados condensados en la Tabla 39 indican una mayor reducción de la permeabilidad para las mezclas con aditivo 1 y aditivo 3. La tendencia observada en las dosificaciones anteriores se mantiene, con mejoras progresivas a medida que se incrementa la cantidad de aditivo. Los resultados respecto a la permeabilidad de la mezcla con aditivo 2 indicarían determinada ineficiencia al emplear la dosificación 1.50% del peso de cemento. No se evidencian efectos negativos sobre las propiedades mecánicas del concreto. Adicionalmente, las variaciones en temperatura, asentamiento y contenido de aire son mínimas.

La última compilación presenta los resultados para las mezclas con aditivos con dosificación de 2.00% del peso del cemento.

Tabla 40.

Compilación de resultados para mezclas patrón y con aditivos con dosificación de 2.00% del peso del cemento

Concreto patrón + Aditivo con dosificación de 2.00% del peso del cemento										
Aditivo	Temperatura (°C)	Asentamiento		Peso Unitario (kg/m ³)	% aire		Compresión 28d		Permeabilidad	
		Pulg	Variación		Contenido	Variación	kg/cm ²	Variación	mm	Variación
Patrón	25.5	4	0%	2237.07	2.2	0%	285.60	0%	14.60	0%
Aditivo 1	25.5	4.5	13%	2306.68	2.2	1%	310.30	9%	4.3	-71%
Aditivo 2	25	4.25	6%	2302.41	2.4	9%	279.20	-2%	4.9	-66%
Aditivo 3	25	4.25	6%	2306.68	2.2	1%	295.40	3%	6.4	-56%

La Tabla 40, correspondiente a la dosificación del 2.00%, presenta el mayor incremento en la resistencia a la compresión y la mayor reducción en la profundidad de penetración de agua. Aparentemente el aditivo 1, en la mayor dosificación, provoca el mayor incremento en esta propiedad mecánica, indicando un 9% de variación respecto al patrón. Esta misma configuración de mezcla provocó la mayor reducción a la profundidad de penetración, con una reducción del 71% respecto al patrón.

5.2.2 Efectos sobre la permeabilidad

Los resultados obtenidos sugieren que la mayor dosificación de aditivos impermeabilizantes involucra la mayor reducción de la permeabilidad. Sin embargo, es importante señalar que este alto incremento en la dosificación también podría implicar un incremento significativo en los costos de producción del concreto. Por ello, la evaluación del costo-beneficio debe ser cuidadosamente considerada, tomando en cuenta las exigencias específicas de cada proyecto.

La Figura 49 permite observar que, existe una gran reducción entre la profundidad de penetración del agua entre las dosificaciones 0.50% y 1.00% del aditivo 1. Con una reducción de 43.5%, representa el mayor efecto del aditivo impermeabilizante, considerando que el cambio entre la dosificación 1.00% y 1.50% del aditivo 2 resulta particularmente anómalo. En base a esta observación, puede establecerse una dosificación eficiente en términos de minimizar el empleo de aditivo.

En situaciones donde se requiera máxima durabilidad y una alta resistencia a la penetración de agua, la dosificación del 2.00% del aditivo 1 aparece como la opción más adecuada, garantizando un desempeño óptimo en ambientes exigentes. No obstante, en proyectos con restricciones presupuestarias o donde se priorice la optimización del costo-beneficio, la dosificación del 1.00% representa una alternativa viable. Esta dosificación ha demostrado generar interesantes variaciones relativas en la reducción de la permeabilidad. Particularmente, el aditivo 1 mantiene una tendencia estable en la mejora de la impermeabilidad del concreto sin incurrir en costos significativamente elevados. El uso de una dosificación del 1.00% de este aditivo sería recomendable en proyectos donde se busque un equilibrio entre costo y eficiencia, sin sacrificar las propiedades esenciales del concreto en términos de impermeabilidad.

Figura 49.

Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 1 en distintas dosificaciones

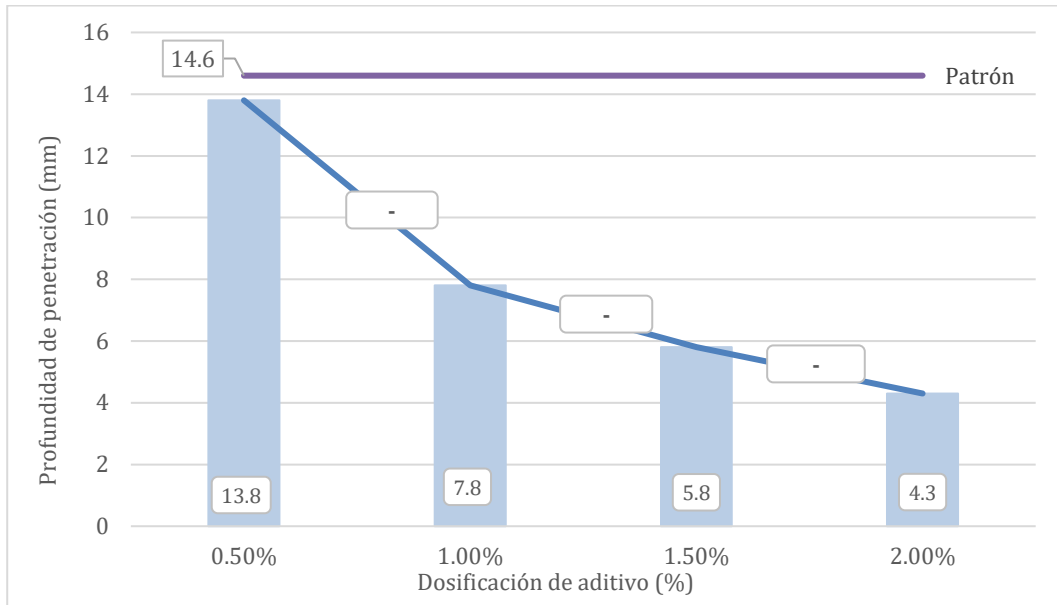


Figura 50.

Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 2 en distintas dosificaciones

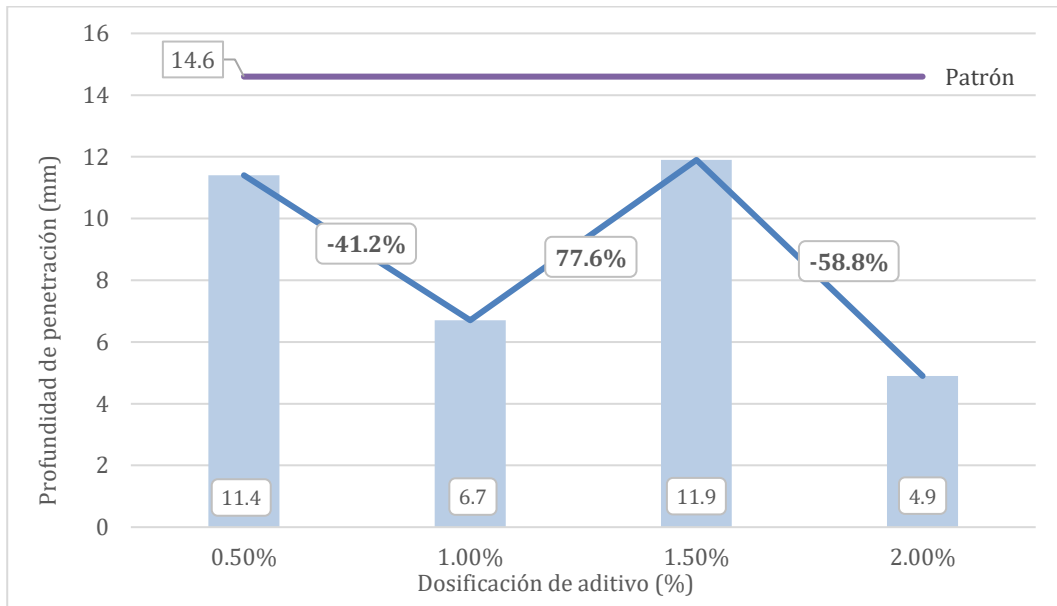
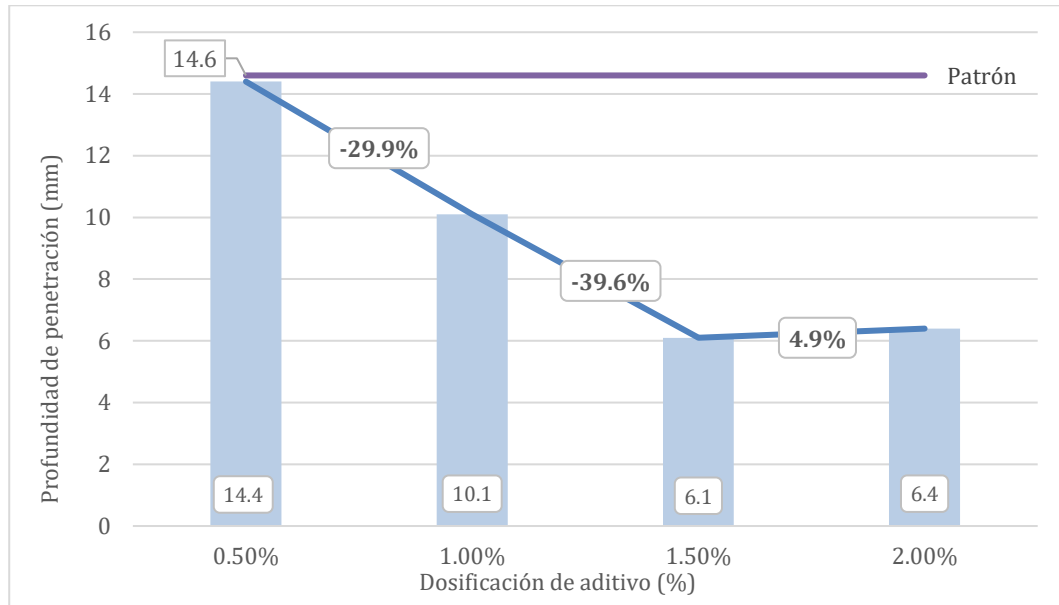


Figura 51.

Variación relativa de la profundidad de penetración para las mezclas con aditivo 3 en distintas dosificaciones



El uso de aditivos cristalizantes para impermeabilizar estructuras de concreto ha demostrado ser altamente beneficioso, superando en muchos casos la eficacia de otros tipos de aditivos impermeabilizantes, como los hidrofóbicos (Minaya, 2019). Diversas investigaciones han abordado el desempeño de estos aditivos, evaluando su impacto en la durabilidad y resistencia del concreto.

Minaya (2019) realizó una evaluación comparativa entre aditivos cristalizantes e hidrofóbicos, centrada en la profundidad de penetración de agua bajo presión. Los resultados de su investigación mostraron una clara tendencia a la reducción de la penetración a medida que se incrementaba la dosificación de aditivos cristalizantes, alcanzando una disminución del 56.43% con una dosificación del 3.0% en peso del cemento. Esto sugiere que una mayor dosificación del aditivo cristalizante está directamente relacionada con mejoras en la durabilidad del concreto. En contraste, los aditivos hidrofóbicos presentaron un desempeño inferior en términos de reducción de la permeabilidad.

En nuestro estudio, los resultados también evidencian un rendimiento favorable de los aditivos cristalizantes, con una reducción de hasta el 71% en la profundidad de penetración del agua en comparación con la muestra patrón, y hasta un 54% con solo la mitad de esa dosificación. Estos hallazgos confirman la eficacia del uso de aditivos

cristalizantes para mejorar la durabilidad de las estructuras. No obstante, no se identificó una tendencia clara entre el aumento de la dosificación y la reducción de la permeabilidad.

5.2.3 Efecto sobre la resistencia a la compresión

Los resultados reflejan un comportamiento inconsistente en lo que respecta a la resistencia a la compresión. La mayor dosificación de aditivos impermeabilizantes produjo las mayores variaciones en los valores de resistencia. En particular, la dosificación del 2.00% del aditivo 1 generó el mayor incremento, alcanzando un 9%. En contraste, la única disminución registrada en la resistencia a la compresión, con un valor de -2%, se observó al emplear la misma dosificación, pero con el aditivo 2.

Cusihuaman (2022) observó en su investigación que la incorporación de aditivos cristalizantes redujo la resistencia a la compresión en sus diseños de mezcla, con disminuciones del 4.2% para una relación a/c de 0.40 y hasta un 11% para una relación de 0.50. Sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación no reflejan reducciones de tal magnitud. De hecho, se registraron ligeros aumentos en la resistencia a medida que se incrementaban las dosificaciones de los aditivos, aunque estos aumentos no fueron lo suficientemente significativos como para establecer una relación concluyente.

Estudios internacionales, como el de Jahandari et al. (2023), respaldan parcialmente los resultados de Cusihuaman, señalando que los aditivos cristalizantes tienden a mejorar la resistencia a la compresión cuando se utilizan en concretos con bajas relaciones a/c. El mencionado estudio concluye que se pueden lograr incrementos considerables en la resistencia a la compresión cuando la relación a/c es inferior a 0.37, mientras que mezclas con relaciones superiores a 0.40 tienden a experimentar pérdidas de entre el 20% y el 30% en comparación con una mezcla patrón. Además, el metaanálisis realizado también indicó que, en algunos casos, la resistencia a la compresión de concretos con aditivos cristalizantes aumentó hasta un 37% tras 28 días de curado. Por el contrario, los aditivos hidrofóbicos generalmente tienen un impacto negativo en la resistencia a la compresión, con reducciones de al menos un 10% o más, lo que los hace menos recomendables en términos de desempeño mecánico.

La presente investigación empleó un diseño de mezcla con una relación a/c de 0.45, por tanto, se esperarían pérdidas en lo que refiere a la resistencia mecánica, de

acuerdo con Jahandari et al. (2023). Sin embargo, no se presentaron reducciones considerables, al igual que tampoco se presentaron aumentos concluyentes que indiquen clara influencia de estos aditivos para el particular diseño creado, en ninguna de las dosificaciones provistas para los tres aditivos empleados. Cabe resaltar que el empleo de cemento tipo HS podría tener influencia en los resultados particulares de esta investigación.

5.2.4 Efecto sobre propiedades en estado fresco

Las variaciones registradas para las propiedades de las mezclas en estado fresco no resultan significativas al ser de muy poca magnitud. En cuanto al asentamiento (slump), se observaron variaciones de hasta un 13% con respecto a la mezcla patrón, lo que equivale a un incremento de $\frac{1}{2}$ pulgada. Cabe destacar que la norma aplicable establece que la precisión del ensayo es de $\frac{1}{4}$ de pulgada. Sin embargo, no se identificó un patrón consistente entre la dosificación de los aditivos y las variaciones en el slump. Resulta destacable el comportamiento de las mezclas con el aditivo 3, ya que a bajas dosificaciones presentaron ligeras disminuciones en el slump, mientras que, con el incremento de la dosificación, dicha variación se tornó positiva. A pesar de ello, se detectó una tendencia a presentar cierta variación cuando se emplea la máxima dosificación

Esto último es coherente con lo reportado por Jahandari et al. (2023), quienes, tras revisar múltiples investigaciones, concluyeron que la trabajabilidad del concreto tiende a incrementarse al adicionar una dosificación igual o superior al 2.00% de aditivo cristalizante. Esta inclusión, según los autores, no genera efectos negativos como segregación o fisuración térmica, incluso en mezclas con alta relación a/c. Otros estudios también refuerzan esta postura, sugiriendo que el rango óptimo de dosificación se encuentra entre el 2.00% y el 4.00%.

Por otro lado, los resultados de los ensayos de temperatura no mostraron variaciones significativas, siendo estas iguales a la precisión establecida en la norma correspondiente. Por tanto, se puede afirmar con certeza que no existe una influencia importante ni una relación clara entre el uso de aditivos impermeabilizantes por cristalización y la temperatura del concreto en estado fresco.

De manera similar, no se puede establecer un patrón o relación entre la dosificación de los aditivos y el contenido de aire en las mezclas en estado fresco. Los resultados no evidencian una correlación directa entre la incorporación de aditivos cristalizantes y el contenido de aire, lo que sugiere que este parámetro permanece independiente de la adición de los aditivos en cuestión.

Conclusiones

Reducción de la Permeabilidad del Concreto: La incorporación de aditivos cristalinos redujo la penetración de agua entre un 47% y un 71% en el caso de Penetron Admix (0.5–2%), entre 18% y 66% para Krystol KIM y entre 1% y 58% para Idrocrete KR 1000. El mayor efecto (–71%) se obtuvo con 2% de Penetron Admix. No obstante, la eficacia no mostró una relación lineal con la dosificación, sugiriendo dependencia de la composición de la mezcla y condiciones de curado. (Objetivo específico 1 cumplido; hipótesis de reducción $\geq 50\%$ parcialmente confirmada en dosificaciones $\geq 1\%$)

Efecto en la Resistencia a la Compresión Axial: Los resultados mostraron incrementos marginales en la resistencia a la compresión axial en algunas mezclas, con un aumento máximo del 9% (Penetron Admix 2%) en una de las dosificaciones evaluadas. Estos incrementos no fueron consistentes ni proporcionales a la cantidad de aditivo utilizado, indicando que el efecto de los aditivos impermeabilizantes por cristalización sobre la resistencia mecánica del concreto no es concluyente ni predecible en las condiciones evaluadas.

Comportamiento del Concreto en Estado Fresco: La adición de los aditivos no afectó significativamente las propiedades del concreto en estado fresco. Las pruebas de asentamiento (slump), contenido de aire y temperatura mostraron variaciones mínimas, manteniéndose dentro de los rangos esperados para este tipo de mezclas. Esto indica que el uso de aditivos impermeabilizantes por cristalización no compromete la trabajabilidad del concreto.

Análisis Comparativo con la Mezcla Patrón: Al comparar las mezclas con aditivos impermeabilizantes y la mezcla patrón, se concluye que los aditivos de cristalización mejoran la impermeabilidad del concreto, haciéndolos especialmente útiles para estructuras expuestas a condiciones de humedad o agentes corrosivos. Sin embargo, no se evidenció una influencia clara y consistente en la resistencia a la compresión axial, por lo que su uso no garantiza un aumento significativo en la resistencia mecánica.

Recomendaciones

Ampliación del Estudio con Diferentes Tipos de Cemento: Dado que esta investigación se centró en el uso de cemento tipo HS, se recomienda extender el estudio a otros tipos de cemento, como cementos con adiciones (puzolanas, escorias, filler calcáreo) o cementos de bajo carbono. Esto permitiría obtener resultados más generales y comprender mejor cómo interactúan los aditivos impermeabilizantes por cristalización con diferentes matrices cementicias. Además, sería valioso evaluar el comportamiento de los aditivos en combinación con cementos de uso común en la industria, como el cemento Portland tipo I, para determinar si los beneficios observados se mantienen en diferentes contextos.

Evaluación de la Resistencia a Ciclos de Congelación-Descongelación: Dado que la durabilidad del concreto es un aspecto crítico, se recomienda incluir pruebas de resistencia a ciclos de congelación-descongelación en futuras investigaciones. Esta propiedad está estrechamente relacionada con la durabilidad, especialmente en regiones con climas fríos, y permitiría evaluar si los aditivos impermeabilizantes mejoran la resistencia del concreto a este tipo de deterioro.

Estudio Detallado de la Ganancia de Resistencia: Aunque la resistencia a la compresión se evaluó a los 3, 7 y 28 días, se sugiere reducir los intervalos de tiempo (por ejemplo, 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días) para obtener una curva más precisa de la ganancia de resistencia. Esto permitiría comprender mejor cómo los aditivos influyen en el desarrollo temprano y a largo plazo de la resistencia mecánica. También sería útil evaluar la resistencia a edades mayores (90 o 180 días) para determinar si los aditivos tienen un impacto significativo en la resistencia a largo plazo.

Monitoreo de Propiedades a Largo Plazo: En línea con el objetivo de mejorar la durabilidad, se recomienda realizar estudios a largo plazo (más de un año) para monitorear cómo evolucionan las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto con aditivos impermeabilizantes. Esto incluiría pruebas de permeabilidad, carbonatación, resistencia a sulfatos y corrosión de armaduras en muestras expuestas a condiciones ambientales reales.

Análisis Económico del Uso de Aditivos: Dado que los aditivos demostraron una reducción significativa en la permeabilidad, se recomienda realizar un análisis económico que evalúe el impacto de su uso en los costos de construcción y mantenimiento a largo plazo. Esto podría incluir un estudio de ciclo de vida que compare el costo inicial de los aditivos con los ahorros potenciales en reparaciones y mantenimiento, especialmente en estructuras expuestas a condiciones agresivas.

Investigación con Diferentes Relaciones Agua-Cemento: Siguiendo las sugerencias de Jahandari et al. (2023), se recomienda realizar estudios con diferentes relaciones agua-cemento (por ejemplo, 0.35, 0.40, 0.45) para determinar cómo los aditivos impermeabilizantes afectan la durabilidad y resistencia en mezclas más densas o fluidas. Esto permitiría optimizar los diseños de mezcla para diferentes aplicaciones, como concretos de alta resistencia o mezclas más trabajables.

Limitaciones del Estudio y Recomendaciones para Investigaciones Futuras: Este estudio se centró en mezclas de concreto con una resistencia específica y un tipo particular de cemento, lo que puede limitar la generalización de los resultados a otras condiciones. Además, no se evaluaron otros factores que podrían influir en la eficacia de los aditivos, como diferentes tipos de cemento, relaciones agua/cemento o condiciones de exposición. Se recomienda que futuras investigaciones exploren estas variables para obtener una comprensión más completa del impacto de los aditivos impermeabilizantes por cristalización en las propiedades del concreto.

Referencias Bibliográficas

- Aditivos especiales (2024, 4 de septiembre). *Aditivos para el concreto*. Aditivos especiales. <https://www.aditivosespeciales.com.pe/>
- Alan Neill, D., & Cortez Suárez, L. (2018). Procesos y fundamentos de la investigación científica. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9).
- American Concrete Institute. (2016a). *American Concrete Institute 212. 3R-16 Report on Chemical Admixtures for Concrete*.
- American Concrete Institute. (2016b). *American Concrete Institute 201. 2R-16 Guide to Durable Concrete*.
- American Concrete Institute. (2021). *American Concrete Institute 350.3-20 Code Requirements for Seismic Analysis and Design of Liquid-Containing Concrete Structures (American Concrete Institute 350.3-20) and Commentary*.
- Bastidas, D., y Carvajal, J. J. (2019). *Estudio de patología del sedimentador 8 de la PTAR Cañaveralejo – Cali -Valle Del Cauca* [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas]. <http://hdl.handle.net/11634/22139>.
- Bertolini, L., Elsener, B., Pedferri, P., Redaelli, E., & Polder, R. (2013). *Corrosion of steel in concrete: Prevention, diagnosis, repair* (2., completely rev. and enlarged Ed). Wiley-VCH.
- Building Research Establishment Environmental Assessment Method. (2024, 4 de septiembre). *Certificado de Construcción Sostenible*. Building Research Establishment Environmental Assessment Method. <https://breeam.es/>
- Broto, C. (2005). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. (6). Madrid.
- C09 Committee. (2011). *Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials International https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-11
- American Society for Testing and Materials International- C09 Committee (2020). *Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. American Society for Testing and Materials International. <https://doi.org/10.1520/C1585-20>
- ABINCO. (2024, 25 de agosto). *Carbonatación en estructuras de concreto*. Abinco. <https://www.abinco.com.mx/blog/carbonatacion-en-estructuras-de-concreto>

- Cargua, P. A. (2017). *Análisis comparativo de impermeabilidad del concreto mediante estudio experimental de aditivos por cristalización* [Tesis de pregrado, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. <http://repositorio.uees.edu.ec/123456789/1937>
- Catari, N. Y. (2018). *Evaluación del proceso de carbonatación y cambio de ph del concreto en el canal del túnel - Río Asana, 2018* [Tesis de pregrado, Universidad José Carlos Mariátegui]. <https://hdl.handle.net/20.500.12819/1022>
- Cordero Estevez, G. D., Cárdenas-Gutiérrez, J. A., & Rojas Suarez, J. P. (2022). Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. En *Editorial-ufps*. editorial-ufps. <https://libros.ufps.edu.co/index.php/editorial-ufps/catalog/book/25>
- Cusihuaman, A. N. (2022). *Efecto del aditivo impermeabilizante en las propiedades mecánicas del concreto con cemento Portland del tipo I y tipo ICO* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/24126>
- Figmig, R. (2020). Efficiency of the crystallizing waterproofing admixture in lower-quality concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 867(1), 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012007>
- Garzon Pire, W. (2013). *Estudio de durabilidad del ataque de sulfatos a los concretos con agregado reciclado* [Trabajo de grado - Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/11912>
- Hernandez, Ó. (2016). *Estadística elemental para ciencias sociales*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1998). *Ingeniería civil y arquitectura. Concretos. Métodos de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua*. (Norma Técnica Colombiana 4483:1998)
- Instituto Nacional de Calidad. (2019). *CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del concreto*. 3a Edición (Norma Técnica Peruana 339.046).
- Instituto Nacional de Calidad. (2021). *CONCRETO. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas. Método de ensayo*. 5a Edición (Norma Técnica Peruana 339.034).

- Instituto Nacional de Calidad. (2021). *CONCRETO. Determinación de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado. Método de ensayo. 3ª Edición* (Norma Técnica Peruana 339.184).
- Instituto Nacional de Calidad. (2022). *CONCRETO. Medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. Método de ensayo. 5ª Edición* (Norma Técnica Peruana 339.035).
- Instituto Nacional de Calidad. (2024). *CONCRETO. Método de ensayo para la determinación del contenido de aire en el concreto fresco. Método de presión. 4ª Edición* (Norma Técnica Peruana 339.080).
- Jahandari, S., Tao, Z., Alim, M. A., & Li, W. (2023). Integral waterproof concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 78, 107718. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107718>
- Jianxia, S. (2012). 6.14—Durability Design of Concrete Hydropower Structures. En A. Sayigh, *Comprehensive Renewable Energy* (pp. 377-403). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-087872-0.00619-3>
- Khashman, A., & Akpinar, P. (2017). Non-Destructive Prediction of Concrete Compressive Strength Using Neural Networks. *Procedia Computer Science*, 108, 2358–2362. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.039>
- Kosmatka, S. K., & Panarese, B. y Tanesi, J.(2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*.
- KRYTON. (2024). Krystol Internal Membrane. Obtenido de <https://www.kryton.com/products/krystol-internal-membrane-kim/>
- Kumar, R., & Bhattacharjee, B. (2003). Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 155–164. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00942-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00942-0)
- Lamond, J., & Pielert, J. (2006). *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. American Society for Testing and Materials International. <https://doi.org/10.1520/STP169D-EB>
- Leyva, J. J., & Orbegoso, A. N. (2019). *Estudio comparativo de los aditivos hidrófugos, por cristalización y bloqueadores de poros en la permeabilidad de morteros de cemento tipo I* [Tesis de pregrado, Univerisada Privada Antenor Orrego]. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/5981>

- Lim, S., & Kawashima, S. (2019). Mechanisms Underlying Crystalline Waterproofing through Microstructural and Phase Characterization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31(9), 04019175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002752](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002752)
- López-Roldán, P., & Fachelli, S. (2015). *Metodología de la investigación social cuantitativa*. Barcelona, España: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Mapei Perú (2021). Idrocrete KR 1000. Aditivos Mapei: <https://www.mapei.com/pe/es-pe/productos-y-soluciones/lista-de-productos/detalles-del-producto/idrocrete-kr-1000>
- Metha, K., & Monteiro, P. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. Ciudad de Mexico: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Minaya, H. J. (2019). *Análisis comparativo de la permeabilidad del concreto incorporando Aditivos Impermeabilizantes Cristalizantes frente a Aditivos Impermeabilizantes Hidrofóbicos en Reservorios, Huánuco, 2019* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Hermilio Valdizan]. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/6807>
- Morales, M., & Danisa, V. (2016). *Evaluación del ensayo de volumen de vacíos permeables como método para calificar el grado de durabilidad del hormigón proyectado (shotcrete)* [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/141747>
- Naidenov, V., & Mironova, M. (2020). Investigation on the efficiency of internal crystallization chemical admixtures for cement concrete – structural characteristics. *Machines. Technologies. Materials.*, 14(3), 124-128.
- Neville, A. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education.
- Penetron. (2024). PENETRON ADMIX Tracer. <https://www.penetron.com/penetron-admix-tracer>
- Rodríguez, S. I. (2016). *Estudio de concretos impermeables, según el origen local de materiales y la adición de aditivo impermeabilizante* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato]. <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23635>
- Ruiz, L. A. (2018). *Estado del arte en la impermeabilización de túneles en roca, casos, aplicaciones y recomendaciones* [Tesis de pregrado, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito]. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/739>

- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación*.
- Sánchez, J. (2022). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología - Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico*. Universidad de Salamanca. https://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.pdf
- Sharma, U., Gupta, N., & Saxena, K. K. (2021). Comparative study on the effect of industrial by-products as a replacement of cement in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 45–51. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.211>
- Sonker, T., Rawat, A., & Kumar, R. (2021). Monitoring Methods of Concrete from Early Age Strength Gain of Concrete: A Review. En K. K. Pathak, J. M. S. J. Bandara, & R. Agrawal, *Recent Trends in Civil Engineering* (pp. 659–678). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_52
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B. y Panarese, W. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto (Fundamentos del concreto)*. Portland Cement Association.
- Tahwia, A. M., Fouda, R. M., Abd Elrahman, M., & Youssf, O. (2023). Long-Term Performance of Concrete Made with Different Types of Cement under Severe Sulfate Exposure. *Materials*, 16(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/ma16010240>
- Unacem. (2024, 26 de agosto) – *Características del Cemento Andino*. <https://www.cementoandino.com.pe/cementos/cemento-ultra>
- Usman, J., & Sher, A. (2018). Analysis of Integral Crystalline Waterproofing Technology for Concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology* 5(10), 1076-1085.
- Yang, H., Liu, R., Zheng, Z., Liu, H., Gao, Y., & Liu, Y. (2018). Experimental Study on Permeability of Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 108(2), 022067. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/2/022067>
- Zapata, E. G. (2018). *Determinación y evaluación de patologías en las estructuras de concreto armado en el módulo N° 01 de la planta de tratamiento de agua potable del distrito de Bellavista, Sullana, Piura - abril 2018* [Tesis de pregrado, Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote]. <https://hdl.handle.net/20.500.13032/4523>

Anexos

(PANEL FOTOGRÁFICO)

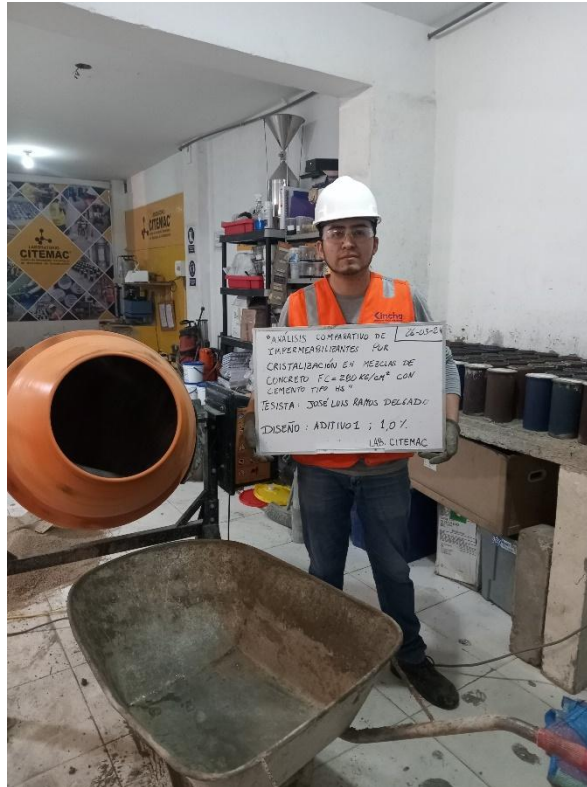
Anexo 1. Producción de la mezcla patrón	1
Anexo 2. Producción de mezcla A1-M1	1
Anexo 3. Producción de mezcla A1-M2	2
Anexo 4. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M2.....	2
Anexo 5. Producción de mezcla A1-M3	3
Anexo 6. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M3.....	3
Anexo 7. Producción de mezcla A1-M4	4
Anexo 8. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M4.....	4
Anexo 9. Producción de mezcla A2-M1	5
Anexo 10. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M1.....	5
Anexo 11. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M2.....	6
Anexo 12. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M3.....	6
Anexo 13. Producción de mezcla A2-M4	7
Anexo 14. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M4.....	7
Anexo 15. Producción de mezcla A3-M1	8
Anexo 16. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M1.....	8
Anexo 17. Producción de mezcla A3-M2	9
Anexo 18. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M2.....	9
Anexo 19. Producción de mezcla A3-M3	10
Anexo 20. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M3.....	10
Anexo 21. Producción de mezcla A3-M4	11
Anexo 22. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M4.....	11
Anexo 23. Vaciado de concreto en probetas y etiquetado	12



Anexo 1. Producción de la mezcla patrón



Anexo 2. Producción de mezcla A1-M1



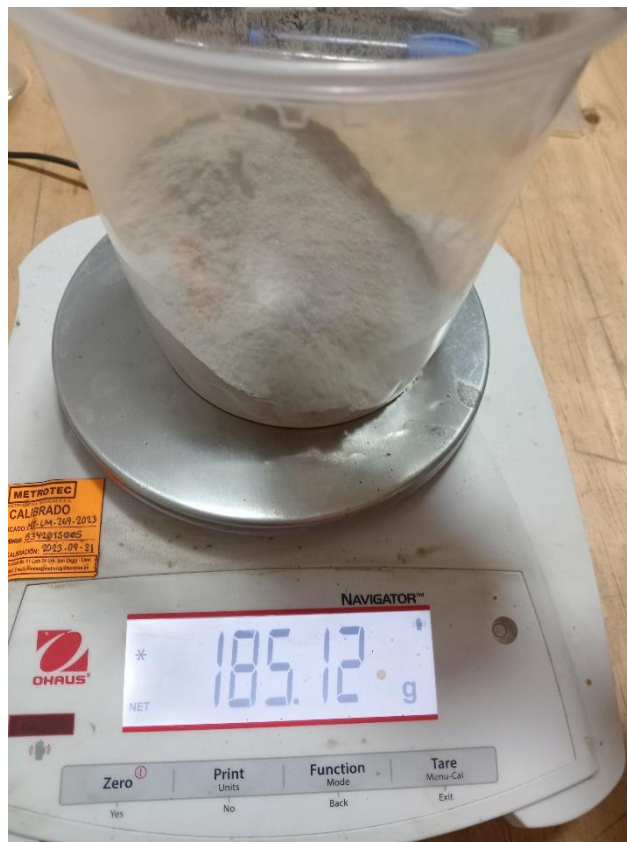
Anexo 3. Producción de mezcla A1-M2



Anexo 4. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M2



Anexo 5. Producción de mezcla A1-M3



Anexo 6. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M3



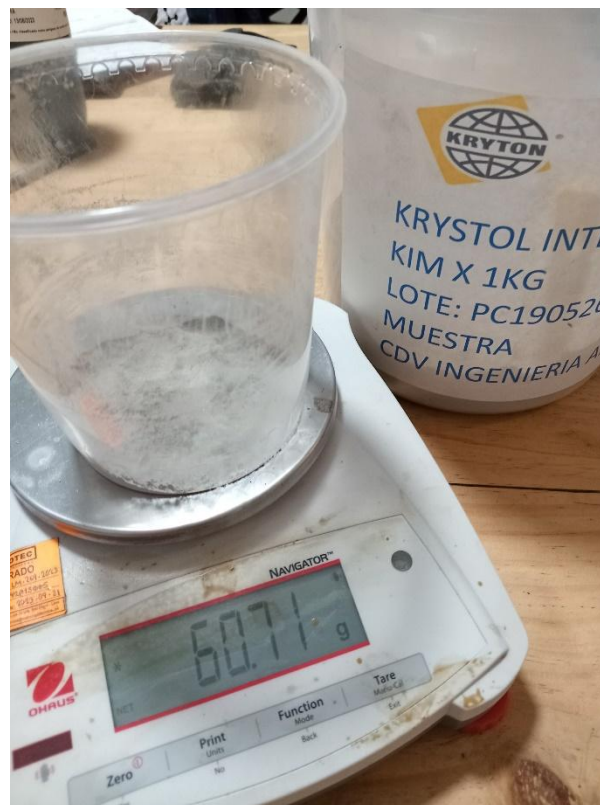
Anexo 7. Producción de mezcla A1-M4



Anexo 8. Pesado de aditivo 1 empleado en mezcla A1-M4



Anexo 9. Producción de mezcla A2-M1



Anexo 10. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M1



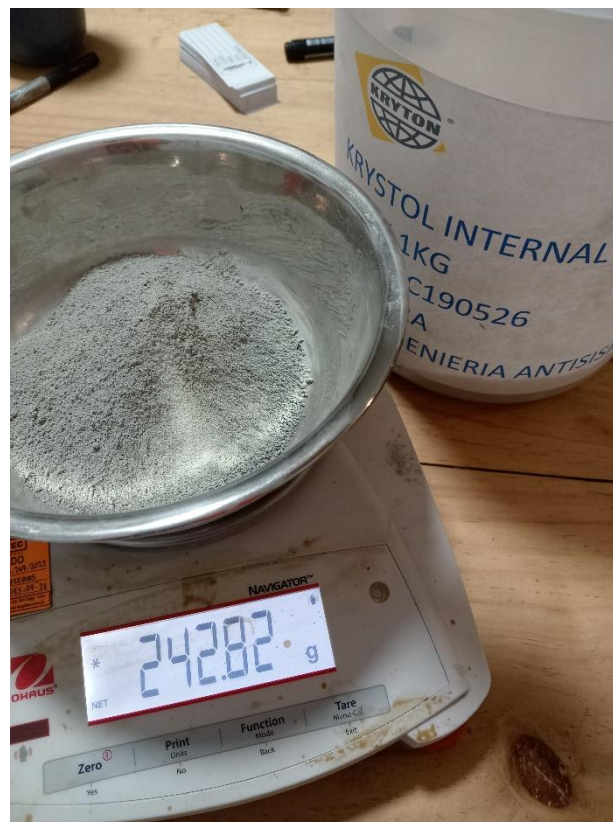
Anexo 11. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M2



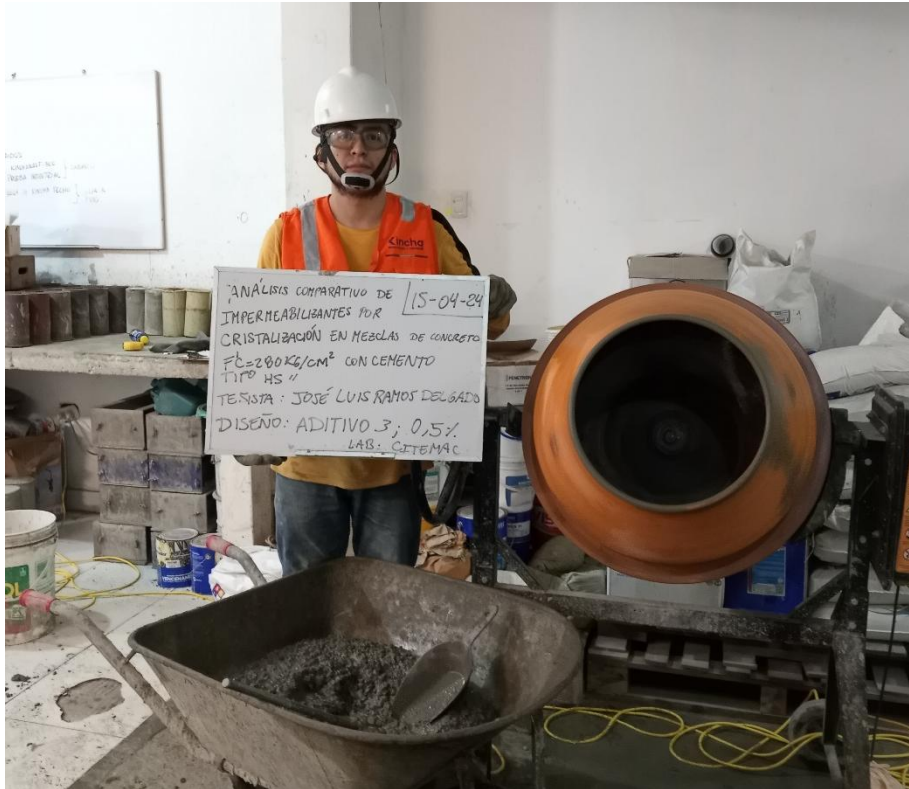
Anexo 12. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M3



Anexo 13. Producción de mezcla A2-M4



Anexo 14. Pesado de aditivo 2 empleado en mezcla A2-M4



Anexo 15. Producción de mezcla A3-M1



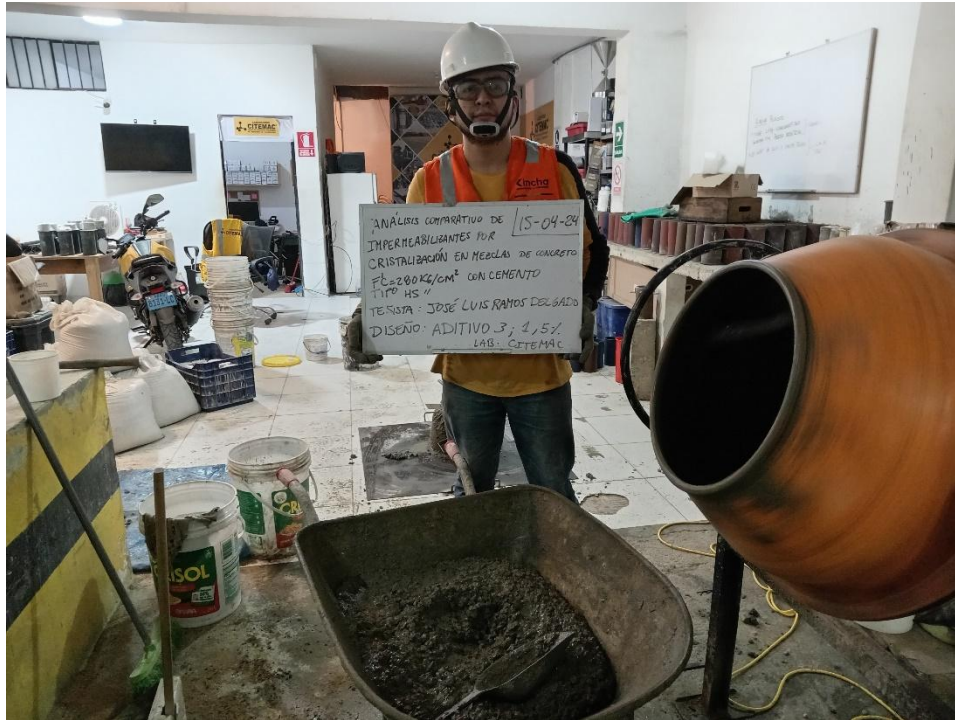
Anexo 16. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M1



Anexo 17. Producción de mezcla A3-M2



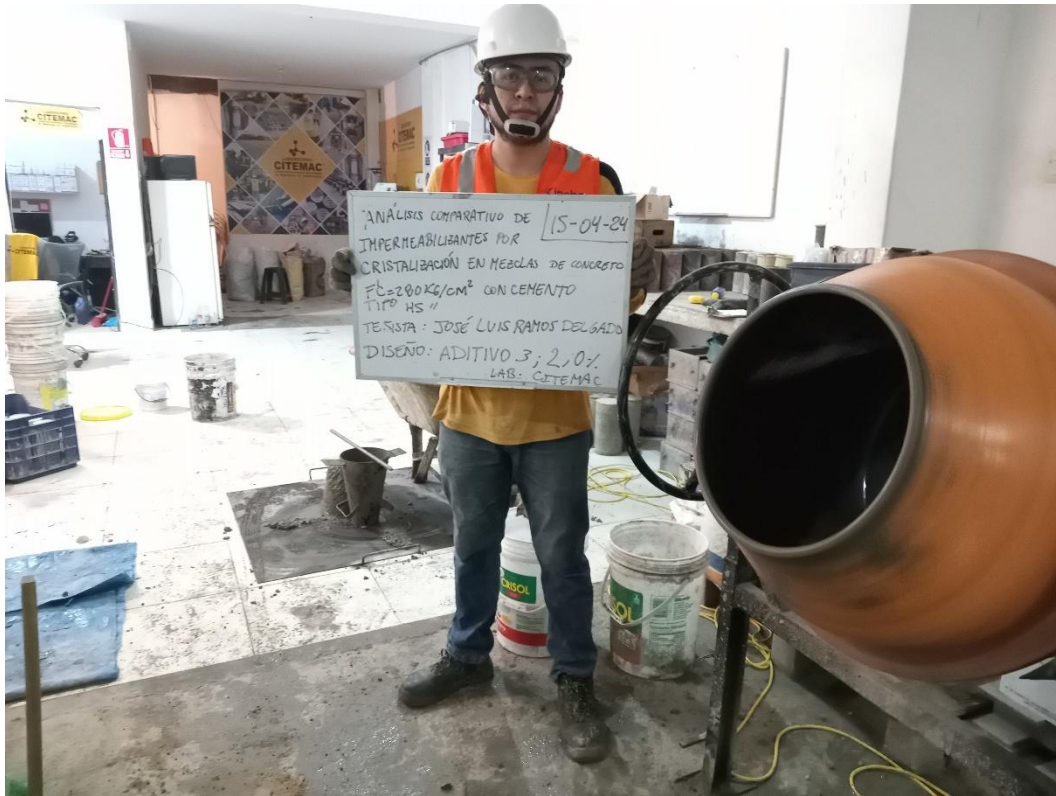
Anexo 18. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M2



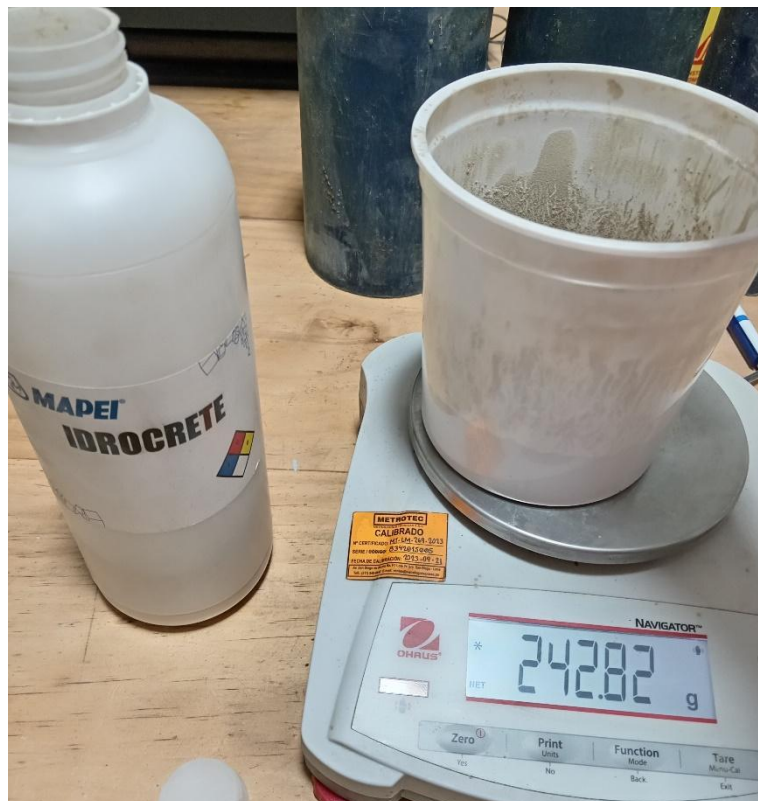
Anexo 19. Producción de mezcla A3-M3



Anexo 20. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M3



Anexo 21. Producción de mezcla A3-M4



Anexo 22. Pesado de aditivo 3 empleado en mezcla A3-M4



Anexo 23. Vaciado de concreto en probetas y etiquetado