



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES SOBRE
LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A
CONDICIONES ACELERADAS DE CARBONATACIÓN Y SALES,
PUNO 2023**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. BRYAN GEORGE TAIPE FLORES

Bach. ROMY HANCCO SONCCO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

PUNO – PERÚ

2024



BRYAN GEORGE TAIPE FLORES - ROMY HANCCO S... INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES SOBRE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A CONDICION...

Universidad Nacional del Altiplano

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::8254:416969942

176 Páginas

Fecha de entrega
17 dic 2024, 1:04 p.m. GMT-5

37,557 Palabras

Fecha de descarga
17 dic 2024, 1:12 p.m. GMT-5

206,807 Caracteres

Nombre de archivo
BORRADOR DE TESIS_BRYAN TAIPE_ROMY HANCCO OK.pdf

Tamaño de archivo
3.5 MB

v.B.

18 dic 2024

Ing. Jaime Medina Leiva
DOCENTE UNIVERSITARIO
COD. UNA N° 910545
SUBDIRECTOR INU EPIC





11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 9% Fuentes de Internet
- 2% Publicaciones
- 8% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.



Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.





DEDICATORIA

Esta investigación se la dedico a Dios, por ser mi guía constante, mi refugio en los momentos complicados y sobre todo ser la fuente inagotable de fortaleza en cada paso de esta travesía académica. Este objetivo logrado es testimonio de tu presencia y bendición.

A mis queridos padres Jorge Gerardo y Luz Yolanda, por ser los pilares fundamentales de nuestra familia, por su amor incondicional, por creer en mí y por los incalculables sacrificios que realizaron para que pudiera alcanzar mis metas. Todo lo logrado y lo que soy se lo debo a ustedes.

A mis queridos hermanos Mabel y Fabián, por ser mis compañeros de vida, mis confidentes y mi fuente de apoyo en cada paso de este largo camino. Su cariño y animo me inspiran a ser una mejor persona cada día.

A mi querida sobrina Kendra Araceli, por demostrarme el lado más tierno de la vida y ser el motivo de muchos momentos de felicidad.

A mi querida nona Asunta (†), por todo el amor que me brindó desde siempre, ha dejado en mí una huella imborrable y un motivo más para seguir esforzándome.

Gracias por todo nona un abrazo hasta el cielo.

Bryan George Taipe Flores



DEDICATORIA

Este proyecto de investigación está dedicado con todo mi cariño y gratitud a mis padres, Angela y Jorge, cuyo apoyo constante y amor incondicional han sido mi mayor fuente de motivación. Gracias por estar siempre a mi lado, guiándome con sabiduría y brindándome la fuerza necesaria para superar cada desafío.

A mis queridos hermanos Jasherlin y Joseph, quienes desde el inicio han sido mi inspiración y han compartido conmigo el amor por la ingeniería. Gracias por su ejemplo, apoyo y por ayudarme a descubrir mi verdadera pasión por esta carrera. Sin su presencia y orientación, no habría tenido la determinación de seguir este camino.

A mis queridas hermanas Anais y Kharolay, por ser un ejemplo constante de esfuerzo, pasión y excelencia. Gracias por inspirarme a seguir adelante y brindarme su apoyo cuando más lo necesité.

A mis hermanos Beaker y Vladimir, por su empatía y por hacerme sentir su apoyo en todo momento. Sin su presencia y amor, este proyecto no habría sido posible.

¡Gracias a todos por ser mi pilar!

Romy Hanco Soncco



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno y a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por impartirnos una formación integral e impartirnos conocimientos y orientación sobre la formación profesional.

Al Dr. Ing. Samuel Huaquisto Cáceres, por brindarnos sus conocimientos y guiarnos en el desarrollo de esta investigación.

A nuestro jurado dictaminador conformado por el M.Sc. Ing. Yasmani T. Vitulas Quille, M.C. Ing. Gino Frank Laque Córdova y Mto. Ing. Carlos Alberto Gonzales Gutiérrez por sus recomendaciones brindadas y su juicio prudente e imparcial.

Al Laboratorio de Construcciones, al Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales y al Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, al Laboratorio de Yacimientos Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica, a todo el personal técnico y administrativo de los laboratorios mencionados, por su disposición, orientación y soporte que fueron determinantes en el éxito de esta investigación.

Por último, extendemos nuestra gratitud a nuestros amigos y compañeros de aula, quienes brindaron su apoyo incondicional, compartiendo momentos gratos, colaborando en los estudios, enriqueciendo nuestras experiencias, con conocimientos y anécdotas.

Bryan George Taipe Flores

Romy Hanco Soncco



ÍNDICE GENERAL

| | Pág. |
|---|-----------|
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTOS | |
| ÍNDICE GENERAL | |
| ÍNDICE DE TABLAS | |
| ÍNDICE DE FIGURAS | |
| ÍNDICE DE ANEXOS | |
| ACRÓNIMOS Y NOTACIÓN | |
| RESUMEN | 20 |
| ABSTRACT..... | 21 |
| CAPÍTULO I | |
| INTRODUCCIÓN | |
| 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 23 |
| 1.1.1. Realidad problemática..... | 23 |
| 1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 26 |
| 1.2.1. Pregunta general..... | 26 |
| 1.2.2. Preguntas específicas..... | 26 |
| 1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN | 27 |
| 1.3.1. Hipótesis general | 27 |
| 1.3.2. Hipótesis específicas | 27 |
| 1.4. JUSTIFICACIÓN | 28 |
| 1.4.1. Importancia del estudio | 31 |
| 1.4.2. Relevancia del estudio..... | 32 |
| 1.4.2.1. Credibilidad..... | 32 |



| | |
|--|-----------|
| 1.4.2.2. Transferibilidad..... | 33 |
| 1.4.2.3. Fidelidad..... | 33 |
| 1.4.2.4. Confirmabilidad | 34 |
| 1.4.2.5. Consecuencia del estudio | 34 |
| 1.4.2.6. Limitaciones del estudio | 34 |
| 1.4.2.7. Cuestiones éticas | 35 |
| 1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 36 |
| 1.5.1. Objetivo general | 36 |
| 1.5.2. Objetivos específicos..... | 36 |

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

| | |
|--|-----------|
| 2.1. ANTECEDENTES | 37 |
| 2.2. MARCO TEÓRICO | 50 |
| 2.2.1. Aditivos para el concreto..... | 50 |
| 2.2.1.1. Aditivos minerales impermeabilizantes | 51 |
| 2.2.1.2. Aditivos inclusores de aire | 53 |
| 2.2.1.3. Aditivos retardantes | 54 |
| 2.2.1.4. Aditivos plastificantes..... | 54 |
| 2.2.1.5. Aditivos superplastificantes | 54 |
| 2.2.1.6. Aditivos autocompactantes | 55 |
| 2.2.2. Propiedades del concreto..... | 56 |
| 2.2.2.1. Propiedades del concreto en estado fresco..... | 56 |
| 2.2.2.2. Propiedades del concreto en estado endurecido..... | 57 |
| 2.2.3. Propiedades asociadas a la durabilidad del concreto | 58 |
| 2.2.4. Diseño de mezclas de concreto | 63 |



| | | |
|-------------|--|-----------|
| 2.2.5. | Composición química de materiales | 64 |
| 2.2.5.1. | Fluorescencia de rayos X (FRX)..... | 64 |
| 2.2.5.2. | Difracción de rayos X (DRX) | 65 |
| 2.2.5.3. | Espectrometría infrarroja (IR)..... | 66 |
| 2.2.5.4. | Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) | 67 |
| 2.3. | MARCO CONCEPTUAL | 68 |
| 2.3.1. | Concreto | 68 |
| 2.3.2. | Composición del concreto..... | 68 |
| 2.3.2.1. | Cemento | 68 |
| 2.3.2.2. | Agregado fino | 73 |
| 2.3.2.3. | Agregado grueso | 73 |
| 2.3.2.4. | Agua | 74 |
| 2.4. | MARCO NORMATIVO | 75 |
| 2.4.1. | Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)..... | 75 |
| 2.4.2. | ASTM C1202-22, 2022..... | 76 |
| 2.4.3. | ASTM C1012-18b, 2018..... | 76 |
| 2.4.4. | UNE-EN 12390-12, 2020..... | 76 |
| 2.4.5. | ACI-318, 2019..... | 76 |

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

| | | |
|-------------|--------------------------------------|-----------|
| 3.1. | LUGAR DE ESTUDIOS | 78 |
| 3.2. | MÉTODO DE INVESTIGACIÓN | 79 |
| 3.2.1. | Enfoque de la investigación | 79 |
| 3.2.2. | Tipo de investigación | 80 |
| 3.2.3. | Nivel de investigación..... | 80 |



| | |
|---|-----------|
| 3.2.4. Diseño de investigación | 80 |
| 3.3. POBLACIÓN | 82 |
| 3.4. MUESTRA..... | 82 |
| 3.4.1. Primer objetivo específico..... | 82 |
| 3.4.2. Segundo objetivo específico..... | 83 |
| 3.4.3. Tercer objetivo específico | 84 |
| 3.4.4. Cuarto objetivo específico..... | 85 |
| 3.4.5. Quinto objetivo específico | 85 |
| 3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES | 86 |
| 3.6. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 87 |
| 3.6.1. Primer objetivo específico..... | 87 |
| 3.6.1.1. Descripción de variables analizadas | 87 |
| 3.6.1.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros | 87 |
| 3.6.1.3. Instrumentos..... | 92 |
| 3.6.1.4. Aplicación de prueba estadística..... | 93 |
| 3.6.2. Segundo objetivo específico..... | 94 |
| 3.6.2.1. Descripción de variables analizadas | 94 |
| 3.6.2.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros | 94 |
| 3.6.2.3. Instrumentos..... | 97 |
| 3.6.2.4. Aplicación de prueba estadística..... | 98 |
| 3.6.3. Tercer objetivo específico | 98 |
| 3.6.3.1. Descripción de variables analizadas | 98 |
| 3.6.3.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros | 99 |
| 3.6.3.3. Instrumentos..... | 105 |
| 3.6.3.4. Aplicación de prueba estadística..... | 106 |



| | |
|--|------------|
| 3.6.4. Cuarto objetivo específico..... | 106 |
| 3.6.4.1. Descripción de variables analizadas | 106 |
| 3.6.4.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros | 107 |
| 3.6.4.3. Instrumentos..... | 111 |
| 3.6.4.4. Aplicación de prueba estadística..... | 112 |
| 3.6.5. Quinto objetivo específico | 113 |
| 3.6.5.1. Descripción de variables analizadas | 113 |
| 3.6.5.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros | 113 |
| 3.6.5.3. Instrumentos..... | 118 |
| 3.6.5.4. Aplicación de prueba estadística..... | 119 |
| 3.7. INSTRUMENTOS | 120 |

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

| | |
|--|------------|
| 4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 121 |
| 4.1.1. Resultados de prueba piloto | 121 |
| 4.1.2. Resultados de asentamiento del concreto..... | 122 |
| 4.1.3. Resultados de densidad, absorción y porcentaje de poros permeables . | 123 |
| 4.1.4. Resultados de resistencia a la compresión de especímenes de concreto | 123 |
| 4.1.5. Resultados de ensayo de carbonatación acelerada | 124 |
| 4.1.6. Resultados de resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro | 126 |
| 4.1.7. Resultados de composición química del concreto expuesto a sulfatos . | 126 |
| 4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS | 128 |
| 4.2.1. Primer objetivo específico..... | 128 |
| 4.2.2. Segundo objetivo específico..... | 131 |
| 4.2.3. Tercer objetivo específico | 138 |



| | |
|---|------------|
| 4.2.4. Cuarto objetivo específico..... | 141 |
| 4.2.5. Quinto objetivo específico | 144 |
| 4.3. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS | 148 |
| 4.3.1. Primer objetivo específico..... | 148 |
| 4.3.2. Segundo objetivo específico..... | 149 |
| 4.3.3. Tercer objetivo específico | 150 |
| 4.3.4. Cuarto objetivo específico..... | 150 |
| 4.3.5. Quinto objetivo específico | 151 |
| 4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 152 |
| 4.4.1. Primer objetivo específico..... | 153 |
| 4.4.2. Segundo objetivo específico..... | 155 |
| 4.4.3. Tercer objetivo específico | 156 |
| 4.4.4. Cuarto objetivo específico..... | 157 |
| 4.4.5. Quinto objetivo específico | 158 |
| V. CONCLUSIONES..... | 159 |
| VI. RECOMENDACIONES | 161 |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 163 |
| ANEXOS..... | 172 |

Área: Gerencia y Construcciones

Tema: Tecnología del Concreto

Línea de investigación: Tecnología de los Materiales en la Construcción - Calidad del concreto

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 26 de diciembre del 2024



ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1 Tipos de cementos hidráulicos | 71 |
| Tabla 2 Características químicas del cemento Portland Yura tipo IP..... | 72 |
| Tabla 3 Número de muestras para el primer objetivo específico..... | 83 |
| Tabla 4 Número de muestras para el segundo objetivo específico | 83 |
| Tabla 5 Número de muestras para el tercer objetivo específico..... | 84 |
| Tabla 6 Número de muestras para el cuarto objetivo específico..... | 85 |
| Tabla 7 Número de muestras para el quinto objetivo específico | 86 |
| Tabla 8 Operacionalización de variables..... | 86 |
| Tabla 9 Condiciones para el ensayo de carbonatación acelerada..... | 102 |
| Tabla 10 Resultados de resistencia a la compresión de la prueba piloto | 121 |
| Tabla 11 Comparación del asentamiento del concreto con la adición de aditivos | 122 |
| Tabla 12 Comparación del volumen de espacio de poros permeables..... | 123 |
| Tabla 13 Comparación de resistencia a la compresión | 125 |
| Tabla 14 Comparación de carga y penetrabilidad del ion cloruro | 126 |
| Tabla 15 Comparación de resistencias a la compresión post exposición a sulfatos..... | 127 |
| Tabla 16 Prueba de normalidad de datos..... | 129 |
| Tabla 17 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión y asentamiento | 131 |
| Tabla 18 Prueba de normalidad de datos..... | 132 |
| Tabla 19 Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión y asentamiento | 134 |
| Tabla 20 Prueba paramétrica Tukey - Post Hoc para comparación en pares | 136 |
| Tabla 21 Prueba paramétrica Tukey - Post Hoc para para comparación en pares | 136 |
| Tabla 22 Prueba de normalidad de datos de profundidad de carbonatación | 139 |
| Tabla 23 Prueba ANOVA para la profundidad de carbonatación..... | 140 |



| | |
|---|-----|
| Tabla 24 Prueba de normalidad de datos de la penetración del ion cloruro..... | 142 |
| Tabla 25 Prueba ANOVA para la resistencia a la penetración del ion cloruro..... | 143 |
| Tabla 26 Prueba de normalidad de datos de la variación de composición química..... | 145 |
| Tabla 27 Prueba T de Student de muestras para la composición química | 147 |
| Tabla 28 Cuadro resumen de comparación con investigaciones similares | 152 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|---|-------------|
| Figura 1 Factores que afectan la resistencia a compresión del concreto | 57 |
| Figura 2 Esquema de factores que afectan la durabilidad del concreto armado..... | 58 |
| Figura 3 Componentes de una cámara de carbonatación acelerada..... | 61 |
| Figura 4 Mecanismos de corrosión del acero de refuerzo | 63 |
| Figura 5 Presentación del cemento Yura tipo IP | 73 |
| Figura 6 Lugar de estudios | 79 |
| Figura 7 Esquema de procesos de la investigación..... | 81 |
| Figura 8 Ensayo de asentamiento en concreto fresco..... | 91 |
| Figura 9 Esquema de equipos utilizados para el ensayo de carbonatación acelerada . | 101 |
| Figura 10 Rociado de la muestra con solución de fenolftaleína..... | 102 |
| Figura 11 Muestras expuestas a carbonatación acelerada..... | 103 |
| Figura 12 Marcado de cuadrantes para tomar lecturas de carbonatación | 103 |
| Figura 13 Medición de la profundidad de carbonatación por cuadrantes..... | 104 |
| Figura 14 Forma adecuada de medición de la carbonatación..... | 104 |
| Figura 15 Cámara de vacíos | 109 |
| Figura 16 Esquema de celdas de voltaje para el ensayo de ion cloruro | 109 |
| Figura 17 Esquema del ensayo de ion cloruro..... | 110 |
| Figura 18 Medición de corriente en las celdas de voltaje..... | 111 |
| Figura 19 Preparación de la solución sulfato de magnesio heptahidratado..... | 116 |
| Figura 20 Equipo para realizar el ensayo de Fluorescencia de Rayos X..... | 117 |
| Figura 21 Comparación de resistencias a la compresión del concreto | 124 |
| Figura 22 Comparación de profundidad de carbonatación por periodos..... | 125 |
| Figura 23 Comparación de la composición química del concreto..... | 127 |



ÍNDICE DE ANEXOS

| | Pág. |
|--|-------------|
| ANEXO 1 Matriz de Consistencia..... | 177 |
| ANEXO 2 Certificado de ensayos de Laboratorio de Construcciones de la EPIC... | 180 |
| ANEXO 3 Certificado de ensayos de Laboratorio de Yacimiento Minerales de la EPIG..... | 182 |
| ANEXO 4 Certificación de calibración de equipos de laboratorio..... | 190 |
| ANEXO 5 Resultados del diseño de mezclas..... | 207 |
| ANEXO 6 Resultados del asentamiento del concreto..... | 239 |
| ANEXO 7 Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes..... | 241 |
| ANEXO 8 Resultados de densidad, absorción y porcentaje de poros permeables... | 256 |
| ANEXO 9 Resultados del ensayo de Carbonatación Acelerada..... | 259 |
| ANEXO 10 Resultados del ensayo de Penetración de Ion Cloruro..... | 287 |
| ANEXO 11 Ficha técnica de cemento Yura Tipo IP..... | 316 |
| ANEXO 12 Ficha técnica del aditivo Humo de Sílice..... | 321 |
| ANEXO 13 Ficha técnica del aditivo Silicato de Sodio..... | 329 |
| ANEXO 14 Ficha técnica del aditivo Plastificante..... | 331 |
| ANEXO 15 Panel fotográfico..... | 339 |



ACRÓNIMOS Y NOTACIÓN

| | |
|--------------------------|---|
| <i>MK:</i> | Adiciones de metacaolín |
| <i>H₂O:</i> | Agua |
| <i>HS:</i> | Alta resistencia a sulfatos |
| <i>HE:</i> | Alta resistencia inicial |
| <i>ACI:</i> | American Concrete Institute |
| <i>ASTM:</i> | American Society for Testing and Materials |
| <i>ANOVA:</i> | Analysis of variance |
| <i>PSA:</i> | Ataque físico de sal |
| <i>R:</i> | Baja reactividad a los álcalis |
| <i>LH:</i> | Bajo calor de hidratación |
| <i>BID:</i> | Banco Interamericano de Desarrollo |
| <i>Ca:</i> | Calcio |
| <i>ACC:</i> | Camara de carbonatación acelerada |
| <i>CaCO₃:</i> | Carbonato de Calcio |
| <i>PSA:</i> | Cemento Adicionado con Material Cementoso |
| <i>SCM:</i> | Cemento Adicionado sin Material Cementoso |
| <i>OPC:</i> | Cemento Portland no Adicionado |
| <i>IP:</i> | Cemento Portland Puzolanico |
| <i>cm²:</i> | Centímetros cuadrados |
| <i>cm:</i> | Centímetros |
| <i>NaCl:</i> | Cloruro de Sodio |
| <i>BNBC:</i> | Codigo Nacional de Construcción de Bangladesh |
| <i>GU:</i> | Construcciones generales |
| <i>C:</i> | Coulombs |



| | |
|----------------------------|---|
| <i>DRX:</i> | Difracción de Rayos X |
| <i>CO₂:</i> | Dióxido de Carbono |
| <i>GGBFS:</i> | Escoria Granulada Triturada de Alto Horno |
| <i>EPIC:</i> | Escuela Profesional de Ingeniería Civil |
| <i>EPIG:</i> | Escuela Profesional de Ingeniería Geológica |
| <i>IR:</i> | Espectrometría Infraroja |
| <i>FRX:</i> | Fluorescencia de Rayos X |
| <i>°C:</i> | Grados Celcius |
| <i>g.l.:</i> | Grados de libertad |
| <i>g:</i> | Gramos |
| <i>Ca(OH)₂:</i> | Hidróxido de Calcio |
| <i>NaOH:</i> | Hidroxido de Sodio |
| <i>H₁:</i> | Hipótesis alterna |
| <i>H₀:</i> | Hipótesis nula |
| <i>HAC:</i> | Hormigón autocompactante |
| <i>H.R.:</i> | Humedad Relativa |
| <i>SF:</i> | Humo de Sílice |
| <i>kcal:</i> | Kilocaloría |
| <i>kg:</i> | Kilogramo |
| <i>kg/cm²:</i> | Kilogramo – fuerza por centímetro cuadrado |
| <i>kg/m³:</i> | Kilógramos por metro cúbico |
| <i>kN:</i> | Kilonewton |
| <i>PSI:</i> | Libra de fuerza por pulgada cuadrada |
| <i>Mpa:</i> | Megapascales |
| <i>SEM:</i> | Microscópio electrónico de barrido |



| | |
|----------------|---|
| <i>mbar:</i> | Milibar |
| <i>mm:</i> | Milímetros |
| <i>MS:</i> | Moderada resistencia a sulfatos |
| <i>M.F.:</i> | Modulo de fineza |
| <i>EN:</i> | Norma Española |
| <i>N.T.P.:</i> | Norma Técnica Peruana |
| <i>ppm:</i> | Partes por millón |
| <i>pH:</i> | Potencial de Hidrogeno |
| <i>pulg:</i> | Pulgadas |
| <i>RNE:</i> | Reglamento Nacional de Edificaciones |
| <i>a/c:</i> | Relacion agua – cemento |
| <i>f'c:</i> | Resistencia a la compresión especificada del concreto |
| <i>MH:</i> | Resistencia moderada a sulfatos |
| <i>Sig.:</i> | Significancia |
| <i>SCM:</i> | Sin material cementoso |
| <i>SPSS:</i> | Software de procesamiento estadístico |
| <i>IP:</i> | Tipo 1 con adición de puzolana |
| <i>IPM:</i> | Tipo 1 con adición de puzolana modificado |
| <i>IS:</i> | Uso general |



RESUMEN

La ciudad de Puno ha experimentado un incremento en las construcciones que emplean concreto con fines estructurales, lo que expone su desempeño a factores ambientales como el dióxido de carbono y la acción de sales. Esta investigación busca determinar cómo influye la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales. Se adoptó un enfoque cuantitativo de tipo explicativo, con un diseño cuasi experimental. Se elaboraron especímenes de concreto de 4"x8" con una resistencia de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ y se incorporaron diferentes proporciones de humo de sílice y silicato de sodio. Los resultados mostraron que las resistencias promedio a los 28 días fueron de 315.21 kg/cm^2 y 287.88 kg/cm^2 para las dosificaciones de 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio, respectivamente. La profundidad de carbonatación se redujo en un 4.43% con 7.50% de humo de sílice y en un 6.62% con 0.50% de silicato de sodio en comparación con el concreto control. La carga de ion cloruro disminuyó un 24.08% con 7.50% de humo de sílice y aumentó un 98.68% con 0.50% de silicato de sodio. La variación de la composición química tras la exposición a sulfato de magnesio heptahidratado fue significativa: el concreto control mostró 32,300 ppm de Ca, mientras que con 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio, los valores fueron de 4,630 ppm y 770 ppm, respectivamente. Se concluye que el humo de sílice mejora notablemente la resistencia a carbonatación, cloruros y sulfatos, mientras que el silicato de sodio influye en la resistencia a carbonatación y sulfatos, pero afecta adversamente la resistencia a cloruros.

Palabras claves: Durabilidad, Carbonatación acelerada, Exposición a sulfatos, Ión cloruro, Humo de Sílice, Silicato de Sodio, Análisis químico.



ABSTRACT

The city of Puno has experienced an increase in the number of constructions that use concrete for structural purposes, which exposes its performance to environmental factors such as carbon dioxide and the action of salts. This research seeks to determine how the incorporation of waterproofing admixtures influences the properties of concrete exposed to accelerated conditions of carbonation and salts. A quantitative explanatory approach was adopted, with a quasi-experimental design. Concrete specimens of 4 “x8” with a strength of $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ were prepared and different proportions of silica fume and sodium silicate were incorporated. The results showed that the average strengths at 28 days were 315.21 kg/cm^2 and 287.88 kg/cm^2 for the dosages of 7.50% silica fume and 0.50% sodium silicate, respectively. The carbonation depth was reduced by 4.43% with 7.50% silica fume and by 6.62% with 0.50% sodium silicate compared to the control concrete. Chloride ion loading decreased by 24.08% with 7.50% silica fume and increased by 98.68% with 0.50% sodium silicate. The variation in chemical composition after exposure to magnesium sulfate heptahydrate was significant: the control concrete showed 32,300 ppm Ca, while with 7.50% silica fume and 0.50% sodium silicate, the values were 4,630 ppm and 770 ppm, respectively. It is concluded that silica fume significantly improves the resistance to carbonation, chlorides and sulfates, while sodium silicate influences the resistance to carbonation and sulfates, but adversely affects the resistance to chlorides.

Keywords: Durability, Accelerated Carbonation, Sulfate Exposure, Chloride Ion, Silica Fume, Sodium Silicate, Chemical Analysis.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El concreto es un material ampliamente utilizado en la construcción, pero su desempeño puede verse comprometido por factores ambientales adversos, como la carbonatación y la acción de sales, que pueden provocar deterioro estructural. La carbonatación es un proceso químico que involucra el efecto del dióxido de carbono presente en el medio ambiente con la cal libre del concreto, llegando a reducir significativamente su resistencia y acelerar la corrosión de las armaduras de acero del concreto estructural, especialmente en climas húmedos y fríos. De similar manera, la exposición a cloruros y sulfatos provenientes de sales en el ambiente o en el suelo puede afectar la integridad estructural del concreto, incrementando su porosidad y disminuyendo su vida útil.

Con el propósito de mejorar las propiedades del concreto y mejorar su resistencia frente a estas condiciones, la investigación sobre el uso de aditivos impermeabilizantes ha cobrado relevancia en los últimos años. En particular, sobre el silicato de sodio y el humo de sílice se han explorado ampliamente como materiales capaces de reducir la porosidad del concreto al rellenar micro poros y formar una barrera adicional contra agentes externos (Shi et al., 2011).

La presente investigación es de nivel explicativo, en la que se plantearon objetivos específicos con la cual se pretende contribuir al conocimiento científico sobre cómo la incorporación de estos aditivos impermeabilizantes afecta las características físicas y mecánicas del concreto, así como actúa frente a la carbonatación, penetración de cloruros y exposición a sulfatos, fomentando así la investigación multidisciplinaria, con el



propósito de explorar su aplicabilidad en concretos estructurales que estén en situaciones similares a las que se estudió en la investigación. El principal propósito de la investigación se sitúa en evidenciar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales, Puno 2023. Es necesario recalcar que se buscó el porcentaje adecuado de aditivos impermeabilizantes que maximice estas propiedades sin comprometer otras características del material.

La investigación está estructurada en seis capítulos: En el primer capítulo se presenta la introducción de la investigación, el planteamiento del problema, los objetivos, la justificación de la investigación y la hipótesis. En el segundo capítulo se desarrollan los antecedentes y el marco teórico. El tercer capítulo se detalla los materiales y métodos empleados, la población y la muestra de la investigación, operacionalización de variables y la descripción detallada de los métodos por objetivos. Los hallazgos obtenidos en la investigación y su discusión se desarrollan en el cuarto capítulo. Las últimas secciones lo integran las conclusiones y recomendaciones de los investigadores y finalmente comprende las referencias bibliográficas consultadas en la investigación.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Realidad problemática

En un contexto internacional, donde la durabilidad de las estructuras de concreto es un tema crucial. Este material se posiciona como uno de los más utilizados en la construcción a nivel global, representando aproximadamente el 70% del volumen total de materiales de construcción (Global Cement and Concrete Association, 2021). No obstante, su porosidad lo hace susceptible a la



penetración de agua y agentes agresivos que pueden comprometer su integridad estructural. La carbonatación y la exposición a sales son fenómenos que afectan significativamente las propiedades mecánicas del concreto, provocando una reducción en su vida útil y aumentando los costos de mantenimiento (Kumar Mehta & Monteiro, 2006).

En América Latina, el uso del concreto es igualmente de predominante. Sin embargo las condiciones climáticas y ambientales adversas, como la alta humedad, el incremento de dióxido de carbono (CO_2) en el medio ambiente y la presencia de sales en el suelo, han incrementado en la necesidad de soluciones que mejoren su resistencia. Según datos del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), se estima que más del 60% de las infraestructuras en estas regiones requieren algún tipo de rehabilitación debido a problemas relacionados con la durabilidad del concreto (Brichetti et al., 2021). En este contexto, los aditivos impermeabilizantes han emergido como una solución efectiva para mitigar estos problemas, permitiendo mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

En el Perú, el problema radica en el desconocimiento, por parte de los diseñadores estructurales y constructores, que limita el uso de aditivos impermeabilizantes, así como la falta de normativas específicas que regulen su aplicación dentro de la industria de la construcción. La investigación realizada por Alaya Zelada & Alvarez Vasquez (2022) evidenció que la resistencia a compresión simple del concreto puede aumentar significativamente con la incorporación de aditivos adecuados.

Por otro lado Castañeda Cisneros & Salguero Sandoval (2020) demostraron que la incorporación de nanosílice al concreto incrementa su



resistencia a la compresión y a la tracción en un 3.41% y 19.48%, respectivamente, además de presentar una permeabilidad baja. Así mismo, Cerna Landa (2019) señaló en su investigación que la adición de un 4% de silicato de sodio mejora significativamente el desempeño del concreto, incrementando la resistencia a compresión. No obstante, persiste la incertidumbre sobre el porcentaje óptimo de aditivos que maximice estas propiedades sin comprometer otras características del material. Este vacío en el conocimiento plantea interrogantes fundamentales sobre cómo influye la incorporación de estos aditivos en las características físicas y mecánicas del concreto.

En la presente investigación se abordaron preguntas específicas relacionadas con este tema. Se buscó determinar cómo influye la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades como la resistencia a la compresión y el asentamiento en concreto. Asimismo, se evaluó el porcentaje apropiado de estos aditivos que puede mejorar efectivamente las propiedades del concreto sin afectar negativamente su comportamiento en general. Además, se analizaron aspectos críticos como la profundidad de carbonatación, la penetración del ion cloruro y la variación de la composición química del concreto expuesto a sulfatos, con el objetivo de comprender mejor el impacto del uso de aditivos impermeabilizantes.

Los resultados preliminares sugieren que el uso adecuado de aditivos impermeabilizantes no solo incrementa la resistencia a compresión del concreto, sino que también reduce su permeabilidad y aumenta su durabilidad frente a condiciones adversas, como la carbonatación y la acción de sales. Por ejemplo, estudios previos han mostrado que ciertos aditivos pueden reducir hasta un 30%



la penetración de agua bajo presión (Sika Perú, 2024). También Arévalo Villacorta (2001) señala que la adición de humo de sílice (microsílice) al concreto, genera incrementos significativos en su resistencia a compresión, al punto de ser clasificado como concreto de alta resistencia. No obstante, se requiere una mayor investigación para establecer estándares claros sobre su aplicación y dosificación apropiada.

En el planteamiento del problema de la presente investigación se resalta la necesidad de analizar con mayor detalle los efectos específicos de los aditivos impermeabilizantes en el concreto estructural expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales. La incorporación adecuada de estos materiales podría ser clave para mejorar no solo la durabilidad del concreto en el Perú, sino también para promover prácticas constructivas más sostenibles y eficientes, además de fomentar un mayor uso de estos aditivos en la industria.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Pregunta general

¿Cómo influye la incorporación de aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales, Puno 2023?

1.2.2. Preguntas específicas

- P.E. 1: ¿De qué manera influye la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades físicas y mecánicas del concreto?
- P.E. 2: ¿Cuáles son los porcentajes apropiados de aditivos impermeabilizantes que mejoran las propiedades del concreto?



- P.E. 3: ¿De qué manera influye la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la profundidad de carbonatación del concreto?
- P.E. 4: ¿De qué manera influye la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto?
- P.E. 5: ¿De qué manera influye la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos?

1.3. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Hipótesis general

La incorporación de aditivos impermeabilizantes al concreto, influyen significativamente en sus propiedades además de su resistencia a la durabilidad cuando está expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales, Puno 2023.

1.3.2. Hipótesis específicas

- H.E. 1: La incorporación de aditivos impermeabilizantes influyen significativamente en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- H.E. 2: Existen porcentajes apropiados de aditivos impermeabilizantes que mejoran considerablemente las propiedades del concreto.
- H.E. 3: La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influyen considerablemente en la profundidad de carbonatación del concreto.



- H.E. 4: La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influyen considerablemente en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto.
- H.E. 5: La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influyen considerablemente en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, el principal material constructivo empleado en obras civiles es el concreto, debido a su versatilidad y resistencia. Giaretton Cappelleso et al. (2016) indican que, en los últimos años, se ha prestado especial atención a la durabilidad de las estructuras de concreto. Durante la segunda mitad del siglo XX, se produjo un aumento de los daños causados por el deterioro de los edificios, lo que ha intensificado las reparaciones en las estructuras de hormigón y ha incrementado la preocupación por su durabilidad. Por otro lado, Flores Yucra et al. (2024) señalan en su investigación que la concentración de dióxido de carbono CO_2 en Puno varía entre el 1.10% y el 18.70%, con un promedio del 11.99%, lo que indica una alta posibilidad de acumular niveles significativos de contaminantes en el futuro debido a la limitada dispersión atmosférica entre las edificaciones. Así mismo, Maldonado Bandala et al. (2018) mencionan que, en el contexto mundial, el mecanismo que gobierna la corrosión en las estructuras estudiadas es la carbonatación, atribuida a la elevada concentración de CO_2 en el ambiente y una humedad relativa considerable. Este fenómeno ha originado la reducción del pH en el concreto, provocando la despasivación del acero de refuerzo y comprometiendo la durabilidad de las estructuras.



Según Mehta y Monteiro (2017), el uso de aditivos impermeabilizantes ha demostrado ser una de las soluciones más efectivas para reducir la permeabilidad del concreto, permitiendo que las estructuras sean más resistentes a condiciones climáticas extremas y a la corrosión. En este sentido, Pigeon et al. (2019) sostienen que los aditivos impermeabilizantes no solo incrementan la resistencia del concreto, sino que también previenen la penetración de agentes agresivos, mejorando significativamente su durabilidad y longevidad.

Por otro lado, la investigación de Zhang y Lu (2020) destaca que la elección adecuada de los aditivos impermeabilizantes es esencial para garantizar su efectividad. Estos aditivos deben seleccionarse en función de las condiciones específicas de exposición, ya que no todos los productos disponibles ofrecen la misma protección frente a los distintos agentes agresivos. Esto refuerza la importancia de llevar a cabo investigaciones precisas sobre los efectos de los aditivos impermeabilizantes, con el objetivo de optimizar su uso en diversas condiciones.

Además, el estudio de Kumar y Ranjan (2019) destaca que, al mejorar la resistencia a la penetración de agua y reducir la corrosión, los aditivos impermeabilizantes se constituyen como una herramienta esencial para las estructuras de concreto expuestas a condiciones severas, como las que se encuentran en áreas costeras o regiones con climas extremadamente húmedos.

En tal sentido, el concreto sufre deterioros que alteran sus propiedades mecánicas y físicas debido a exposiciones de sulfatos, cloruros, CO_2 , así como también, debido a reacciones químicas propias de la composición de los materiales utilizados en la mezcla. Estos deterioros pueden ocasionar afectaciones irreversibles que limitan el funcionamiento de las estructuras de concreto.



La presente investigación contribuirá a la mejora de la calidad del concreto, ya que, con su desarrollo, se obtendrán proporciones óptimas de aditivos impermeabilizantes para emplear en el concreto y conocer su desempeño frente a agentes externos, como el medio ambiente en el que se encuentra. Además, los resultados podrán complementar investigaciones y estudios que propongan nuevos materiales como alternativas para mejorar la durabilidad del concreto, aportando nuevos conocimientos científicos sobre la adicción de aditivos impermeabilizantes y sus efectos en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, así como su exposición a carbonatación y sales. Estos aspectos serán analizados y cuantificados con la finalidad de brindar un aporte significativo a nuestra línea de investigación.

También es importante mencionar que los resultados de este estudio son fundamentales para el desarrollo de nuevas alternativas económicas, utilizando alternativas de materiales de mayor valor agregado, las cuales son esenciales para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto expuesto a agentes externos. La ciencia debe responder a los problemas de la demanda social y global. El impacto social del estudio se define como los efectos positivos o negativos que puede tener en la población, originados por la incorporación de conocimientos científicos y tecnológicos. Esta investigación otorgará a la población nuevos conocimientos sobre la implementación de alternativas que mejoren la durabilidad del concreto, con el propósito de contribuir a la mejora de la sociedad.

Finalmente, la investigación se justifica también por la necesidad de contribuir al conocimiento en la ingeniería civil, ya que las soluciones actuales para mitigar los efectos de la carbonatación y la agresión por sales aún no han sido suficientemente exploradas, especialmente en lo que respecta a la incorporación de aditivos impermeabilizantes en el concreto. Este estudio busca llenar ese vacío, proporcionando una base de datos sólida



que pueda servir como referencia para mejorar la práctica del diseño y la construcción de estructuras de concreto más duraderas.

1.4.1. Importancia del estudio

El presente estudio reviste una importancia significativa, ya que no solo aporta al entendimiento y análisis del impacto de los aditivos impermeabilizantes en las propiedades del concreto, sino que también en cómo estos influyen en el comportamiento del concreto frente a agentes externos. Este es un aspecto crucial tanto para el diseño de mezclas de concreto, así como para elección adecuada de aditivos según las condiciones de sollicitación a las que se someterá la estructura. En la actualidad, las construcciones están expuestas de manera constante agentes externos como el dióxido de carbono, cloruros y sulfatos, que modifican y aceleran la degradación del concreto, afectando negativamente al acero de refuerzo con el cual interactúa el concreto.

En este contexto, la investigación sobre la influencia de aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales se torna crucial para garantizar la durabilidad y seguridad estructural de las construcciones. La falta de un análisis detallado de estos efectos podría llevar a la ejecución de estructuras deficientes, que no respondan adecuadamente a las sollicitaciones a las que se verán expuestas a lo largo del tiempo. Además, la normativa peruana no aborda de manera específica este tema, lo que convierte este estudio en una valiosa aportación para la mejora de las prácticas constructivas. En consecuencia, los resultados de esta investigación contribuirán al diseño y construcción de estructuras de concreto más resistentes y eficientes, en su búsqueda de garantizar un mejor desempeño frente



a los desafíos ambientales, físicos y mecánicos que enfrentan las construcciones en la actualidad.

1.4.2. Relevancia del estudio

La relevancia de este estudio radica en la creciente necesidad de garantizar la durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto, puesto que las edificaciones modernas están expuestas constantemente a condiciones ambientales adversas, como la carbonatación, ataque de cloruros y sulfatos, los cuales aceleran la degradación tanto del concreto como del acero. En este contexto, el estudio del uso de aditivos impermeabilizantes surge como una búsqueda de alternativas y soluciones que mejoren las propiedades del concreto, de modo que se pueda para mitigar los efectos negativos que poco se estudia en el campo de la ingeniería. Basándonos en sus especificaciones técnicas, estos aditivos tienen la capacidad de mejorar las propiedades del concreto, incrementando su resistencia a la infiltración de agua y, por lo tanto, protegiéndolo de los daños que estos agentes pueden causar.

1.4.2.1. Credibilidad

La credibilidad del presente estudio se fundamenta en su enfoque metodológico detallado, asegurando una evaluación precisa y objetiva sobre el impacto de los aditivos impermeabilizantes en las propiedades del concreto expuesto a carbonatación y sales. Los resultados obtenidos provienen de ensayos experimentales cuidadosamente realizados, los cuales contribuyeron a abordar la problemática planteada. Además, este estudio se apoya en una revisión exhaustiva de la literatura actual, así como



en normativas y en investigaciones previas de instituciones y expertos en el área, lo que proporciona una base teórica sólida y confiable.

1.4.2.2. Transferibilidad

Los conocimientos, resultados y metodologías empleadas en la presente investigación pueden ser adaptados, extrapolados o servir de guía en otras investigaciones que aborden el comportamiento del concreto frente a efectos ambientales, como dióxido de carbono y la exposición a sales. esta capacidad de transferibilidad en diversos escenarios constructivos refuerza la importancia y el potencial de implementación de los hallazgos del estudio en la industria. Además, las conclusiones sobre el uso de aditivos impermeabilizantes pueden ser implementadas en una amplia variedad de obras de infraestructura, desde edificaciones residenciales hasta proyectos de gran envergadura, mejorando la durabilidad y la seguridad estructural en diversas condiciones ambientales.

1.4.2.3. Fidelidad

La fidelidad de los resultados de la presente investigación se ve reforzada por la transparencia en el uso de un diseño metodológico experimental, la ejecución detallada de los diferentes procedimientos y la objetividad de los investigadores en el análisis de los datos. Estos aspectos garantizan que los hallazgos del estudio de la influencia de los aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto expuesto a carbonatación y sales sean confiables, teniendo en consideración que se



emplearon equipos e instrumentos de medición que ayudaron a representar las diferentes condiciones de exposición.

1.4.2.4. Confirmabilidad

Cada fase de la investigación, incluyendo la selección de materiales, los métodos de medición y criterios de análisis, han sido cuidadosamente documentados, permitiendo una revisión externa. Asegurando que los resultados obtenidos reflejan fielmente los efectos de los aditivos impermeabilizantes en las propiedades del concreto expuesto al dióxido de carbono, cloruros y sulfatos.

1.4.2.5. Consecuencia del estudio

Los hallazgos de este estudio podrían abrir nuevas líneas de investigación en áreas relacionadas, como el desarrollo de aditivos más eficaces o la mejora de la resistencia del concreto frente a otros agentes agresivos. En su conjunto, las implicaciones de este estudio tienen el potencial de modificar la industria de la construcción, promoviendo la creación de infraestructuras más seguras, duraderas y económicamente eficientes, con un impacto positivo a largo plazo en la sostenibilidad y la eficiencia de los proyectos constructivos.

1.4.2.6. Limitaciones del estudio

Dentro de las limitaciones del presente estudio esta que la investigación se centró únicamente en la evaluación de los efectos de los aditivos impermeabilizantes en el concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y agresión por sales, lo que limita la



generalización de los hallazgos a otras formas de deterioro o efectos ambientales. Además, los ensayos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, lo cual no refleja lo complejo de las condiciones reales, que son infinitas.

Otra limitación importante es que la investigación se basa en una selección específica de aditivos impermeabilizantes, por lo que los resultados no pueden extrapolarse a todos los aditivos disponibles en el mercado. Estas limitaciones sugieren la necesidad de investigaciones adicionales que aborden estos aspectos para ofrecer una visión más completa y representativa.

1.4.2.7. Cuestiones éticas

El presente estudio se compromete plenamente con los principios éticos en la divulgación de los resultados, garantizando que todos los hallazgos sean presentados de manera objetiva, precisa y sin distorsión, asegurando que los datos obtenidos no se alteren para ajustarse a expectativas previas. Este enfoque ético es esencial para mantener la confianza en la investigación, lo que a su vez permite que los resultados contribuyan de manera efectiva al avance del conocimiento en el ámbito de la ingeniería civil. Además, se respeta rigurosamente la propiedad intelectual, otorgando el crédito adecuado a todas las fuentes bibliográficas y estudios previos utilizados como base teórica, lo que evita el plagio y garantiza la transparencia en el proceso de revisión de la literatura.



1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Evidenciar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales, Puno 2023.

1.5.2. Objetivos específicos

- O.E. 1: Evaluar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- O.E. 2: Identificar los porcentajes apropiados de aditivos impermeabilizantes que mejoren las propiedades del concreto.
- O.E. 3: Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la profundidad de carbonatación del concreto.
- O.E. 4: Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto.
- O.E. 5: Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES

Moreno et al. (2004) estudiaron cuatro tipos de mezclas de concreto con diferentes relaciones agua-cemento (0.55, 0.62, 0.70, 0.70 y 0.80) en ambientes acelerados de CO_2 (cámara de carbonatación acelerada), con una concentración de 4% de CO_2 y un 60% de humedad relativa, para determinar sus coeficientes de carbonatación para cada tipo de concreto. La investigación, de nivel explicativo, incluyó la elaboración de 12 testigos cilíndricos de concreto simple de 7.50 cm de diámetro y 15.00 cm de altura para determinar la profundidad de carbonatación, 4 testigos de 10.00 cm de diámetro y 20.00 cm de altura para determinar la porosidad y 3 testigos de 15.00 cm de diámetro y 30.00 cm de altura para determinar la resistencia a compresión. Los resultados mostraron que el diseño de mezcla con $a/c=0.80$ presentó profundidades de carbonatación muy similares para 7 días de exposición al 4% de CO_2 y tras un año de exposición al ambiente normal. Sin embargo, en los diseños con $a/c=0.55$ y $a/c=0.62$, los valores de profundidad de carbonatación en la exposición acelerada durante siete días fueron casi el doble de los valores tras un año en un ambiente normal. Comparando las concentraciones de CO_2 , se observó que la del ambiente acelerado (4%) es 100 veces mayor que la concentración en el ambiente normal (0.04%). Considerando que un año equivale a 52 semanas, se deduce, mediante la razón $100/52$, que una semana (siete días) en ambiente al 4% de CO_2 equivale, aproximadamente, al doble de un año de exposición en ambiente normal (0.04% de CO_2), lo cual se evidenció con los diseños con relaciones $a/c=0.62$ y $a/c=0.55$. Los investigadores concluyeron que la profundidad de carbonatación varía según el tipo de



mezcla, siendo mayor la profundidad de carbonatación a medida que aumenta el contenido de CO_2 . Además, identificaron una relación entre la profundidad de carbonatación y el contenido de cemento: a menor contenido de cemento, mayor profundidad de carbonatación. Los resultados obtenidos en el ambiente acelerado fueron comparables a los de las muestras de control en el ambiente de laboratorio, lo que respalda el diseño y la funcionalidad de la cámara de carbonatación acelerada.

Sakr & Bassuoni (2021) investigaron mezclas de concreto utilizando aglomerantes simples y binarios sometidos a un ataque físico de sal acelerado (PSA) y carbonatación, simulando elementos estructurales que sirven en zonas industriales y de tráfico pesado. Esta investigación, de nivel explicativo, empleó mezclas de concreto cemento Portland de uso general en diferentes relaciones agua-cemento (a/c) de 0.40, 0.50 y 0.60. Para las mezclas con adición de cenizas volantes, se utilizó una relación a/c fija de 0.50, incorporando proporciones del 20% y 40% de cenizas volantes, así como del 30% y 60% de escorias. Los resultados mostraron que el concreto con un 20% de cenizas volantes mostró una reducción moderada en la absorción (11%) y la desorción (14%) en comparación con el concreto de referencia sin materiales cementosos suplementarios (SCM). Sin embargo, al aumentar la dosis de cenizas volantes al 40%, las propiedades de transporte del concreto tendieron a incrementarse, con porcentajes de absorción (4%) y desorción (5%) ligeramente superiores en comparación con el concreto normal. Por otro lado, la resistencia del concreto a la carbonatación aumentó, conforme disminuía la relación a/c, independientemente del tipo de cemento utilizado. A su vez, la incorporación del 30% de escoria mostraron reducciones del 8% en la absorción y del 11% en la desorción en comparación con el concreto normal. No obstante, al incorporar el porcentaje más alto (60%) incrementaron estos porcentajes de absorción y desorción en 17% y un 20% respectivamente. Los investigadores concluyeron que la exposición



combinada al ataque físico de sal y a la carbonatación acelerada generó efectos sinérgicos potenciales en el concreto, causando mecanismos complejos de deterioro, como cristalización de sales, descalcificación tras el consumo de portlandita, formación de natrita y taumasita, dependiendo de los componentes de la mezcla. Además, la pasta de concreto endurecida con adiciones moderadas de SCM (20% de cenizas volantes o 30% de escoria) mostró mejoras en la resistencia al ataque físico de sal debido a la reactividad puzolánica. Sin embargo, el uso de proporciones más altas (40% de cenizas volantes o 60% de escoria) resultó en una pasta endurecida con menor madurez, lo que aumentó los factores de absorción y, por ende, el daño a la superficie del concreto.

Mejía de Gutiérrez et al. (2009) estudiaron mezclas de concreto compuestas por un 90% de cemento Portland no adicionado (OPC) y un 10% de adiciones de metacaolín (MK) y humo de sílice (SF), Para el metacaolín, se emplearon cuatro tipos diferentes: dos obtenidos mediante tratamiento térmico de caolines colombianos y los otros dos provenientes del mercado internacional (Europa y Estados Unidos). Este estudio, de nivel explicativo, elaboró seis tipos de mezclas con una relación a/c de 0.40, de los cuales cinco contenían un 10% adiciones y otra sin ningún tipo de adición. En todas las mezclas mencionadas se incorporó un aditivo superplastificante en concentraciones del 0.90% y 1.80% para mantener la relación a/c constante. Posteriormente se vaciaron en moldes para obtener especímenes cilíndricos de concreto, de 76.20 mm de diámetro, fueron curados en condiciones controladas en una cámara climática (30 °C, 70% de humedad relativa. y 2.25% dióxido de carbono). Los resultados mostraron que las mezclas adicionadas con metacaolín alcanzaron resistencias a compresión hasta un 18.5% mayores que las mezclas sin adiciones. A 180 días de curado, los concretos con metacaolín lograron una resistencia de hasta 66.4 MPa, solo un 9% inferior a la resistencia del concreto adicionado con humo de sílice. En cuanto a la carbonatación, la profundidad en concretos adicionados con 28



días de curado fue mayor que en los concretos sin adición, aunque no superó los 10 mm, incluso en condiciones aceleradas. Sin embargo, al incrementar la edad de curado previo a la exposición al ambiente agresivo, se observó una reducción en la velocidad de carbonatación, con un mejor desempeño de las mezclas adicionadas con metacaolín. Así mismo, los especímenes adicionados con metacaolín experimentaron un incremento de hasta un 31% en la resistencia a compresión tras la carbonatación. Los investigadores concluyeron que, aunque los concretos adicionados mostraron mayor susceptibilidad a la carbonatación a los 28 días de curado, conforme aumentaba la edad de curado, la resistencia frente a la carbonatación mejoró significativamente. Además, los concretos adicionados presentaron menor absorción capilar y mayor resistencia a la penetración de iones cloruro en comparación con el concreto sin adiciones.

Hossain et al. (2024) investigaron el grado de carbonatación en el concreto construido con agregados de ladrillos como agregado grueso. El nivel de investigación es explicativo, incluyó la extracción de 84 muestras de núcleos de concreto, con diámetros de 67 mm y 50 mm, obtenidas de componentes estructurales (vigas, columnas y losas) de cuatro estructuras de concreto armado preexistentes que utilizaban agregados de ladrillo. Las muestras, de edades comprendidas entre 17 y 73 años, se recolectaron cumpliendo con la norma ASTM C42. De las 84 muestras, 42 se sometieron a pruebas de resistencia a la compresión del núcleo según ASTM C39, mientras que las otras 42 se evaluaron con una solución de fenolftaleína para determinar las profundidades de carbonatación de acuerdo con la norma EN 14630. Todo el proceso de extracción y evaluación se llevó a cabo según los métodos estándar ASTM pertinentes. Los resultados revelaron que la resistencia a compresión del núcleo en las vigas de todas las estructuras evaluadas era inferior a 20 MPa, salvo en dos estructuras. Por otro lado, la resistencia del concreto en la mayoría de las columnas estructurales era inferior a la de otros elementos estructurales,



alcanzando valores por debajo de 10 MPa. Aunque estas columnas soportaban las cargas estructurales, presentaban una calidad de construcción inferior en comparación con las vigas y losas. Según el Código Nacional de Construcción de Bangladesh (BNBC), el concreto estructural debe tener una resistencia mínima de 20 MPa, un contenido de cemento de al menos 315 kg/m³ y una relación agua-cemento límite de 0.50, lo que destaca las deficiencias en las estructuras analizadas. Además, se observó que la profundidad de carbonatación era mayor en el edificio de 73 años en comparación con el de 20 años. Sin embargo, otras estructuras mostraron resultados irregulares, atribuibles a la heterogeneidad en las mezclas de concreto durante su construcción. Los investigadores concluyeron que concretos con grados inferiores están asociados con niveles más altos de carbonatación, lo que sugiere una relación directa entre la calidad del concreto y su susceptibilidad a este fenómeno.

Rojas Bejar (2022) llevó a cabo una investigación comparativa sobre la resistencia a la compresión de concretos expuestos a carbonatación acelerada en diferentes niveles de pH, utilizando fenolftaleína como indicador. El nivel de su investigación es de tipo relacional, para ello empleó el uso de agua de tres zonas de la ciudad de Quillabamba: Quillabamba, Ajuajuyoc y Pintobamba. Se prepararon 63 especímenes, divididos en tres grupos de 21 especímenes según cada fuente de agua. Dentro de cada grupo, se seleccionaron tres especímenes para ensayos de resistencia a la compresión simple y cuatro especímenes para ensayos de carbonatación acelerada. El proceso de carbonatación consistió en exponer los especímenes a dióxido de carbono (CO₂) en una concentración de 40,000 ppm, utilizando una cámara hermética que simulaba un ambiente totalmente saturado. Los resultados indicaron que el pH en el agua de Quillabamba, Ajuajuyoc y Pintobamba cumplía con los parámetros establecidos por la Norma Técnica Peruana según los ensayos fisicoquímicos del agua. En cuanto a la resistencia a la



compresión, la producción de concretos con agua de Quillabamba alcanzaron 234.09 kg/cm², los de Ajuajuyoc 166.36 kg/cm² y los de Pintobamba 111.66 kg/cm², destacando Quillabamba con la mayor resistencia. En cuanto a la profundidad de carbonatación al día 28, se observaron valores de 4.61 mm en Quillabamba, 8.39 mm en Ajuajuyoc y 8.80 mm en Pintobamba, mostrando una relación inversa entre la alcalinidad del agua utilizada y el avance de la carbonatación. Finalmente, el investigador concluyó que las consecuencias de la carbonatación en cuanto a la resistencia a la compresión simple dependen significativamente de la variación en la alcalinidad del concreto y el pH del agua utilizada en su diseño, además de las condiciones de humedad relativa del ambiente en Quillabamba.

Mosqueira Ramirez (2019) realizó un estudio sobre el efecto del tiempo de exposición al dióxido de carbono (CO₂) en la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión de concreto con una resistencia de diseño de $f^c = 210$ kg/cm². El nivel del estudio que realizó fue correlacional, para ello se elaboró 140 especímenes cilíndricos de concreto de 6 pulgadas de diámetro y 12 pulgadas de altura, utilizando agregados provenientes de una cantera comúnmente empleada en la producción de concreto. De los cuales cinco especímenes se destinaron para el ajuste del diseño de mezclas, 15 especímenes para el concreto control, 120 especímenes se dividieron en cuatro grupos de 30 unidades, expuestas a CO₂ por 30, 60, 90 y 120 días, respectivamente. Cada grupo incluyó 15 especímenes de concreto control y 15 con recubrimiento de aditivo durable a la intemperie. Al finalizar los períodos de exposición, se realizaron ensayos de resistencia a compresión en una máquina universal, y se determinó la profundidad de carbonatación mediante el test de fenolftaleína. Este método empleó una solución al 1% de fenolftaleína en una mezcla hidro alcohólica (70% alcohol y 30% agua), donde las zonas alcalinas presentaban un tono violáceo y las carbonatadas permanecían incoloras,



midiendo la profundidad con un vernier en seis puntos por muestra. Los hallazgos que se obtuvieron en lo que concierne a la resistencia a la compresión simple fue que las muestras recubiertas inicialmente incrementaron su resistencia hasta un 13% en comparación con los testigos patrón. Sin embargo, con el tiempo de exposición, esta resistencia disminuyó de manera progresiva y las muestras no recubiertas mostraron una disminución gradual desde el inicio del ensayo. En cuanto a la profundidad de carbonatación en el concreto sin recubrimiento, la profundidad de carbonatación dependió directamente de la concentración de CO_2 , la permeabilidad del concreto, la presencia de micro y macroporos, y la humedad relativa del ambiente. Finalmente concluyó que la resistencia a compresión en concretos de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ expuestos a CO_2 mostró un incremento inicial debido a la compactación interna, pero períodos prolongados de exposición indujeron una reducción del pH, volviendo el concreto ácido. Esta condición alcalina provocó la pérdida progresiva de resistencia del concreto. Además, se identificó una relación significativa entre la profundidad de carbonatación y la resistencia a compresión del concreto.

Hussain et al. (2016) estudiaron sobre el efecto de la carbonatación en las propiedades del concreto, como la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, durabilidad, profundidad de carbonatación y el volumen de los poros permeables. Utilizaron diferentes relaciones agua-cemento (0.35, 0.50 y 0.65) y los expusieron a una cámara de carbonatación acelerada (ACC) con una concentración de CO_2 al 5%, humedad relativa del 60% al 70%, y temperatura de 25 °C a 35 °C. El nivel del estudio fue explicativo. Para ello elaboraron cubos de 150x150x150 mm para cada tipo de relación agua-cemento. Obtuvieron como resultado que los volúmenes de poros permeables disminuyeron con el tiempo de exposición en la cámara de carbonatación debido a la formación de carbonato de calcio CaCO_3 , que ocupa mayor volumen que el hidróxido de



calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, esta reducción fue más notable en la mezcla con a/c 0.35, mientras que para las relaciones 0.50 y 0.65 no se encontraron diferencias significativas. En lo que respecta a la resistencia a la compresión y a flexión, ambas propiedades mecánicas mejoraron con el aumento del tiempo de exposición en la cámara, debido a la disminución de la porosidad, lo que mejora la estructura interna del concreto. Sin embargo, a mayor relación agua-cemento, la resistencia a compresión disminuyó, evidenciando que la relación agua-cemento influye negativamente en la resistencia mecánica. Por otro lado, afirman que la profundidad de carbonatación aumentó tanto con el periodo de exposición como con el incremento de la relación agua-cemento, lo que sugiere que un concreto más poroso permite una mayor penetración del CO_2 . Finalmente concluyen que la porosidad del concreto disminuye con una mayor duración de la carbonatación, lo que reduce su permeabilidad y proporciona un endurecimiento superficial. Esto se traduce en una mejora significativa en las resistencias a compresión y a flexión, especialmente en concretos con menor relación agua-cemento.

Vilches et al. (2020) investigaron sobre el análisis de la carbonatación en concreto normal con diferentes porcentajes de adición de caucho de neumáticos (0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60%) sustituyendo al agregado fino. El nivel de la investigación fue explicativo, y se utilizaron cámaras herméticas a presión constante de 20 mbar para los ensayos de carbonatación en lapsos de 2, 4, 6 y 24 horas. Para ello se elaboraron seis tipos de mezclas de concreto, 3 probetas cúbicas y 4 probetas cilíndricas (10 cm de diámetro y 20 cm de alto) para cada porcentaje de adición de caucho de neumático sustituyendo al agregado fino, con la intención de evaluar la resistencia a la compresión y la profundidad de carbonatación. Posteriormente obtuvieron como resultados que el concreto con adición de caucho de neumático mostró una disminución de densidad que varió entre 0.3% y 8.46% en comparación con la muestra de control (sin caucho). Respecto a la resistencia



a la compresión muestran que, mientras se incrementa el porcentaje de caucho, se reduce la resistencia a la compresión, debido a que la disminución de la resistencia varió entre -10.00% y -51.53% en relación al espécimen de control. En cuanto a la profundidad de carbonatación en los concretos con 0% a 30% de caucho, disminuyó respecto al control. Sin embargo, para concretos con 40% a 60% de caucho, la profundidad de carbonatación fue igual o mayor que la del control. Finalmente concluyeron que adición de caucho en rangos de 10% a 30% redujo la penetración de dióxido de carbono (CO_2), posiblemente debido a un efecto de sellado que limita el avance de la carbonatación. Sin embargo, para porcentajes superiores al 40% incrementaron significativamente la profundidad de carbonatación, en comparación con la muestra sin caucho. Este estudio resalta cómo las modificaciones en la composición del concreto afectan simultáneamente su densidad, resistencia mecánica y durabilidad frente a la carbonatación.

Gonzales Gomez (2023) investigó el impacto de la adición del silicato de sodio en el concreto con una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, con el objetivo de mejorar su comportamiento mecánico y físico. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los agregados y el diseño de mezclas del concreto base. Posteriormente, se incorporaron aditivos en proporciones del 2%, 5%, 7% y 10%, y se realizaron ensayos de compresión, tracción y asentamiento, para los cuales se elaboraron 90 probetas, evaluadas a los 7, 14 y 28 días. Los resultados mostraron que el rendimiento del concreto mejoró a medida que aumentaba el porcentaje de adición de silicato de sodio. En el ensayo de asentamiento se observó una disminución progresiva, con valores de 4.50", 4.50", 3.50", 2.50" y 2" para las adiciones de 2%, 5%, 7% y 10%, respectivamente. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, se reportaron incrementos aproximados del 5%, 9.70% y 13.6% para las adiciones de 2%, 5% y 7%, respectivamente, mientras que la adición del 10% resultó en una disminución en la



resistencia. Finalmente, concluye que la adición óptima de silicato de sodio fue la de 7%, que mostró el mayor aumento en la resistencia a la compresión, alcanzando un incremento del 13.6% aproximadamente.

Caiza Yungán (2020) investigó el impacto de la adición del silicato de sodio y nano sílice en el concreto, con una resistencia de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, con el objetivo de comparar las propiedades mecánicas. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los agregados, así como el diseño de mezclas. Posteriormente, se incorporó el silicato de sodio en proporciones del 4%, 8% y 12%. Se realizaron ensayos de compresión, tracción y asentamiento, para los cuales se prepararon 63 probetas para ser evaluadas a los 7, 14 y 28 días. Los resultados del ensayo de asentamiento, se observó una disminución progresiva en el asentamiento conforme aumentó el porcentaje de adición. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, se reportaron incrementos aproximados del 5.15%, 12.62%, 18.94% para las adiciones de 4%, 8% y 12%, respectivamente. No obstante, la adición del 10% resultó en una disminución en la resistencia. Finalmente, concluye la adición óptima de silicato de sodio fue la de 8%, que mostró el mayor aumento en la resistencia a la compresión, alcanzando un incremento del 12.62% aproximadamente.

Da Silva Munhoz et al. (2022), investigaron la utilización de cenizas volantes (35%) como reemplazo del cemento y la adición de silicato de sodio en el concreto, con una resistencia de $f'c = 60 \text{ MPa}$, con la finalidad de comparar las propiedades de resistencia frente a la exposición a ácido sulfúrico. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los agregados y el diseño de mezclas de concreto. Posteriormente, se incorporó el silicato de sodio en concentraciones de 1%, 5% y 10% respecto de la dosificación del aglutinante. Se



realizaron ensayos de compresión, variación dimensional y difracción de rayos X, para los cuales se elaboraron probetas para ser evaluadas a 14, 56, 91 y 182 días. En cuanto a la composición química se observó una disminución de portlandita, un incremento de etringita y un aumento significativo de silicato de calcio hidratado. Asimismo, se detectó la formación de yeso debido al deterioro del concreto ocasionado por la exposición a ácido sulfúrico. Se reportaron aumentos en la resistencia a la compresión en las primeras edades de exposición, atribuidos a la formación de compuestos expansivos. Sin embargo, conforme avanzaba el deterioro, la resistencia a la compresión disminuía progresivamente.

Lone et al. (2015) investigaron el impacto de la adición del silicato de sodio en el concreto, con una relación agua-cementante de 0.50, con el objetivo de comparar sus propiedades. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los agregados, así como el diseño de mezclas de concreto. Posteriormente, se incorporó el silicato de sodio en proporciones del 1%, 1.40%, 1.80% y 2.20%. Se realizaron ensayos de compresión, evaluadas a los 7, 14 y 28 días, reportando variaciones de la resistencia a la compresión de 9.09%, - 18.18%, - 27.27% y -21.42% para las proporciones de aditivo al 1%, 1.40%, 1.80% y 2.20%, respectivamente. Se observó que la aplicación de silicato de sodio disminuye la resistencia del concreto; no obstante, produjo un endurecimiento acelerado.

Gonzales Jesus (2016) investigó el impacto de la adición de microsílíce en el concreto, con una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, con el objetivo de comparar sus propiedades. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los agregados y el diseño de mezclas de concreto. Posteriormente, se incorporó microsílíce en proporciones de 5%, 7.50% y 10%. Se prepararon 120 probetas



para ser evaluadas a los 7, 14 y 28 días, reportando variaciones en la resistencia a la compresión a los 28 días de aproximadamente 18.97%, 44.27% y 74.31% para las proporciones de aditivo al 5%, 7.50% y 10%, respectivamente. Por lo tanto, la adición óptima de microsílíce o humo de sílice fue la de 10%, mostrando el mayor aumento en la resistencia a la compresión, con un incremento aproximado del 74.31%.

Pachacutec Gutierrez & Vilca Salazar (2018) investigaron el impacto de la adición de microsílíce y nanosílíce en el concreto, con una relación agua-cemento de 0.4 y una resistencia a la compresión de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, con el objetivo de comparar las propiedades mecánicas. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los materiales empleados, así como el diseño de mezclas de concreto. Posteriormente, se incorporó microsílíce en proporciones de 5%, 10% y 15%, y se realizaron ensayos de compresión y asentamiento, preparando 105 probetas para ser evaluadas a los 7, 14 y 28 días. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, se reportaron aumentos aproximados del 45.71%, 59.83% y 54.28% para las adiciones de 5%, 10% y 15%, respectivamente. No obstante, no presentaron variaciones en cuanto al ensayo de asentamiento, el cual se encontró en el rango de 6" a 7". Por lo tanto, la adición óptima de microsílíce o humo de sílice fue la de 10%, mostrando mayor aumento en la resistencia a la compresión, alcanzando un incremento del 59.83% aproximadamente.

Ahmad et al. (2022) investigaron el impacto de la adición de humo de sílice al concreto, con el objetivo de comparar sus propiedades de durabilidad, como la resistencia a la carbonatación. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los materiales empleados, así como el diseño de mezclas de concreto. Posteriormente, se incorporó humo de sílice en una proporción del 5% y se



realizaron exposiciones aceleradas de carbonatación. Se obtuvieron profundidades de carbonatación a los 90 y 180 días, evidenciándose un incremento del 88% en la profundidad de carbonatación del concreto respecto al control a los 90 días de exposición, y un incremento del 100% a los 180 días de exposición. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, se reportó un aumento a los 28 días. Asimismo, se realizaron ensayos de exposición a sulfatos, obteniéndose resultados mecánicos posteriores a la exposición, que mostraron una disminución del 94% en la resistencia a la compresión del concreto en comparación con el control.

Li et al. (2019) investigaron el impacto de la adición de humo de sílice al concreto, con el objetivo de comparar sus propiedades de durabilidad, como la resistencia a cloruros y sulfatos. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los materiales empleados, así como el diseño de mezclas de concreto control. Posteriormente, se incorporó humo de sílice en una proporción del 5% y se realizaron exposiciones aceleradas para evaluar la carga del ion cloruro, obteniendo una resistencia un 68.45% mayor que la del concreto control. Asimismo, se llevaron a cabo ensayos de exposición a sulfatos, donde los resultados mecánicos posteriores a la exposición mostraron un incremento en la resistencia a la compresión del concreto en comparación con el control.

Barbhuiya & Qureshi (2016) investigaron el impacto de la adición de humo de sílice al concreto, con relaciones agua-cemento de 0.30 y 0.35, con el fin de comparar las propiedades de durabilidad del concreto, como la resistencia a cloruros y la absorción. Para ello, se utilizó un diseño experimental que incluyó la recopilación de información sobre los materiales empleados, así como el diseño de mezclas de concreto base. Posteriormente, se incorporó el humo de sílice en proporciones del 10% y 15%, y se



realizó el ensayo de exposición acelerada para evaluar la carga del ion cloruro, obteniendo resistencias un 102% y 150% mayores que las del concreto control para la relación agua-aglutinante de 0.35. Además, se realizaron ensayos de absorción, donde se observó que, cuando la relación agua-aglutinante se incrementó de 0.30 a 0.35, hubo un aumento del 44% en la absorción de agua para el concreto de referencia, un incremento del 40% para el concreto con un 10% de humo de sílice y un aumento del 2% en el concreto con un 15% de humo de sílice.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Aditivos para el concreto

Sanjuán Barbudo & Castro Borges (2001) definen a los aditivos como compuestos inorgánicos u orgánicos que se incorporan al concreto en forma sólida o líquida, con una proporción que no supera el 5% del peso del cemento. Estos compuestos tienen como objetivo modificar una o varias propiedades del concreto a través de procesos físicos, químicos o químico-físicos, para mejorar su calidad. Estos pueden ser plastificantes, fluidificantes, retardadores o aceleradores de fraguado, agentes inclusores de aire, anticongelantes, etc. Además, los aditivos pueden cambiar significativamente la porosidad y la fase acuosa del concreto, por ende, son fundamentales para optimizar el desempeño del concreto en aplicaciones específicas y condiciones ambientales diversas.

Nilson et al. (2010) mencionan que los aditivos se utilizan con el propósito de mejorar las propiedades del concreto, además de los componentes principales, como el cemento, el agua y los agregados. Estos aditivos son compuestos que, en pequeñas proporciones, pueden alterar las características del concreto de manera



significativa. Entre los principales efectos que los aditivos pueden tener sobre el concreto se incluyen la aceleración o el retraso del fraguado y endurecimiento, la mejora de la trabajabilidad, el crecimiento de la resistencia, el incremento de la durabilidad, la reducción de la permeabilidad y otras propiedades específicas según las necesidades del proyecto. De los cuales Nilson et al. (2010) detalla algunos tipos de aditivos.

2.2.1.1. Aditivos minerales impermeabilizantes

Las cenizas volantes y el humo de sílice son puzolanas, sílices muy activas, que se combinan con hidróxido de calcio, el producto soluble de la hidratación del cemento, para formar más hidrato de silicato de calcio, el producto insoluble de la hidratación del cemento. Las puzolanas son materiales cementantes suplementarios, también denominados aditivos minerales, que se utilizan para sustituir una parte del cemento portland en las mezclas de hormigón. Las cenizas volantes, que se especifican en la norma ASTM C618 «Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcified Natural Pozzolan for Use in Concrete», se precipitan electrostáticamente como subproducto de los gases de escape de las centrales eléctricas de carbón. Este material fino reacciona con el hidróxido de calcio en presencia de humedad para formar un material cementante. Tiende a aumentar la resistencia del hormigón a edades superiores a 28 días. El humo de sílice, que se especifica en ASTM C1240 «Especificación estándar para el humo de sílice utilizado en mezclas cementosas», es un subproducto resultante de la producción, en hornos de tipo arco eléctrico, de aleaciones de ferrosilicio y silicio



metálico. Está extremadamente finamente dividido y es altamente cementante cuando se combina con cemento portland. A diferencia de las cenizas volantes, el humo de sílice contribuye principalmente a aumentar la resistencia a edades tempranas, de 3 a 28 días. Tanto las cenizas volantes como el humo de sílice, especialmente este último, han sido importantes en la producción de hormigón de alta resistencia.

La escoria granulada triturada de alto horno (GGBFS), que se especifica en la norma ASTM C989, «Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortar», es otro material cementante suplementario. Se produce enfriando con agua y moliendo escoria de la producción de arrabio, el ingrediente clave utilizado para fabricar acero. El GGBFS se compone principalmente de silicatos de calcio, por lo que es muy similar al cemento portland. Como resultado de esta similitud, la escoria puede utilizarse en mayores cantidades que las cenizas volantes o el humo de sílice, y el material resultante tiene generalmente propiedades similares o mejoradas a las que presenta el hormigón fabricado con cemento portland al 100%.

Cuando se utiliza escoria de alto horno, humo de sílice, cenizas volantes o una combinación de ambos, es habitual referirse a la relación agua-material cementante en lugar de la relación agua-cemento.

El silicato de sodio es generalmente un polvo blanco incoloro o un sólido transparente, soluble en agua en diversas cantidades. El vidrio soluble o el vidrio líquido contienen principalmente meta-silicato, los



compuestos que contienen meta-silicato se denominan técnicamente silicato de sodio.

Por otro lado, Medeiros et al. (2013) indica que el silicato de sodio se utiliza en la industria del cemento para diversas aplicaciones. Por ejemplo: como reductor de humedad en el proceso de producción de Clinker; como activador de cemento de escoria, como acelerador de fraguado de hormigón proyectado; como aditivo protector para fibras vegetales en compuestos de fibras cemento, como sistema de protección superficial del hormigón

2.2.1.2. Aditivos inclusores de aire

Probablemente, los aditivos más empleados son los inclusores de aire, que provocan el arrastre de aire en forma de pequeñas burbujas dispersas en el hormigón. Estos aditivos mejoran la trabajabilidad y la durabilidad, primordialmente la resistencia a la congelación y descongelación, y reducen la segregación en el transcurso la colocación. Disminuyen la densidad del concreto debido a un aumento de la relación de vacíos y, por tanto, de la resistencia; sin embargo, este descenso puede compensarse parcialmente mediante una reducción del agua de amasado, sin pérdida de trabajabilidad. El principal uso de los concretos aireados es en pavimentos, aunque también se utilizan para estructuras, especialmente para elementos expuestos.



2.2.1.3. Aditivos retardantes

Los aditivos retardantes de fraguado son fundamentales cuando se trabaja en condiciones de alta temperatura o cuando el concreto necesita permanecer trabajable durante un periodo extendido. Su función principal es retrasar el proceso de fraguado del concreto, lo que proporciona un tiempo adicional para su colocación y acabado. Esto ayuda a eliminar las fisuras debidas a la deflexión del encofrado y también mantiene el concreto trabajable, la duración necesaria para que los vaciados sucesivos puedan colocarse sin que se desarrollen juntas frías.

2.2.1.4. Aditivos plastificantes

Ciertos compuestos orgánicos se utilizan para reducir las necesidades de agua de una mezcla de hormigón para un asentamiento determinado. Estos compuestos se denominan plastificantes. La reducción de la demanda de agua puede dar lugar a una reducción de la relación agua-cemento para un asentamiento y un contenido de cemento dados o a un aumento del asentamiento para la misma relación agua-cemento y el mismo contenido de cemento. Los plastificantes actúan reduciendo las fuerzas inter partculares que existen entre los granos de cemento en la pasta fresca, aumentando así la fluidez de la pasta.

2.2.1.5. Aditivos superplastificantes

Los aditivos reductores de agua de alto rango, o superplastificantes, se emplean para producir hormigón de alta resistencia, con una relación agua-cemento muy baja, manteniendo al mismo tiempo los asentamientos



más altos necesarios para una correcta colocación y compactación del hormigón. También se utilizan para producir hormigón fluido con relaciones agua-cemento convencionales. Los superplastificantes difieren de los aditivos reductores de agua convencionales en que no actúan como retardadores a altas dosis; por lo tanto, pueden ser utilizados a dosis más altas sin ralentizar severamente la hidratación. Los efectos específicos de los aditivos reductores de agua varían con los diferentes cementos, los cambios en la relación agua-cemento, la temperatura de remezclado, la temperatura ambiente y otras condiciones de trabajo, y generalmente se requieren lotes de prueba.

2.2.1.6. Aditivos autocompactantes

Cuando los superplastificantes se combinan con aditivos modificadores de la viscosidad, pueden utilizarse para producir hormigón autocompactante (HAC). El concreto autocompactante es muy fluido y no requiere vibración para eliminar el aire atrapado. Los agentes modificadores de la viscosidad permiten que el hormigón se mantenga cohesivo, incluso con un grado muy alto de fluidez. Como resultado, el HAC puede utilizarse para elementos con armaduras congestionadas, como las uniones viga-columna en estructuras sismorresistentes, y es ampliamente utilizado para prefabricados de hormigón, especialmente el hormigón pretensado prefabricado, un producto manufacturado. Sin embargo, se ha demostrado que la alta fluidez de la mezcla tiene un impacto negativo en la resistencia de la adherencia entre el hormigón y el acero de pretensado situado en las partes superiores de una viga, una



deficiencia que debería tenerse en cuenta en el diseño pero que actualmente no se aborda en el Código ACI, y la composición de las mezclas de HAC puede dar lugar a módulos de elasticidad, fluencia y propiedades de retracción que difieren de las de las mezclas más tradicionales.

2.2.2. Propiedades del concreto

Portugal Barriga (2007) clasifica las propiedades del concreto de la siguiente manera:

2.2.2.1. Propiedades del concreto en estado fresco

Todas las propiedades del concreto endurecido dependen en gran o menor medida de sus propiedades en su estado fresco, ya que de estas dependen su proceso de transporte mezclado, colocado, compactado y acabado.

a) Trabajabilidad

Conocida también como manejabilidad, es una propiedad por la cual se puede determinar su capacidad de ser colocado y acabado adecuadamente, evitando la segregación. Pero se puede definir de mejor manera como la cantidad de actividad interna útil y necesaria para obtener una compactación completa, ya que la fricción interna es una propiedad intrínseca de la mezcla.

2.2.2.2. Propiedades del concreto en estado endurecido

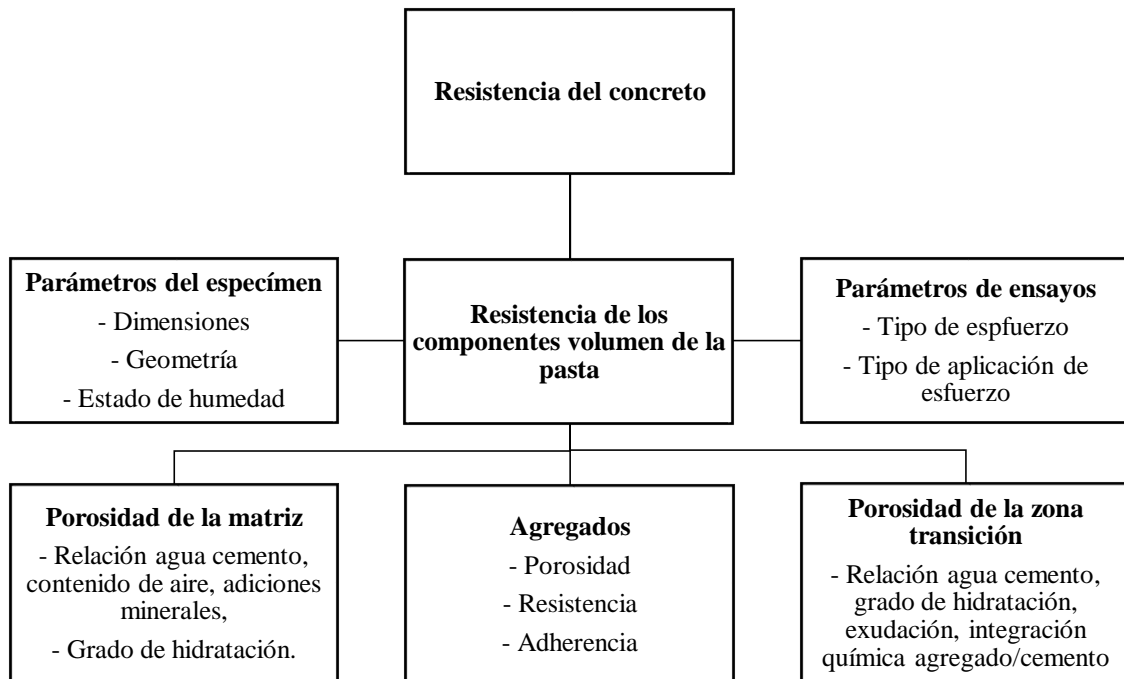
a) Resistencia a la compresión

La relevancia de la resistencia a la compresión del concreto reside en las funciones estructurales de este material, rigiéndose primordialmente por la resistencia e interacción de sus componentes:

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

Figura 1

Factores que afectan la resistencia a compresión del concreto



Nota: Adaptado de Tecnología del Concreto de algo Desempeño, Portugal Barriga (2007).

Desde luego que muchos son los agentes que interrelaciona la resistencia del material compuesto con la resistencia de las etapas individuales y la resistencia de la interfase de adherencia; mediante la

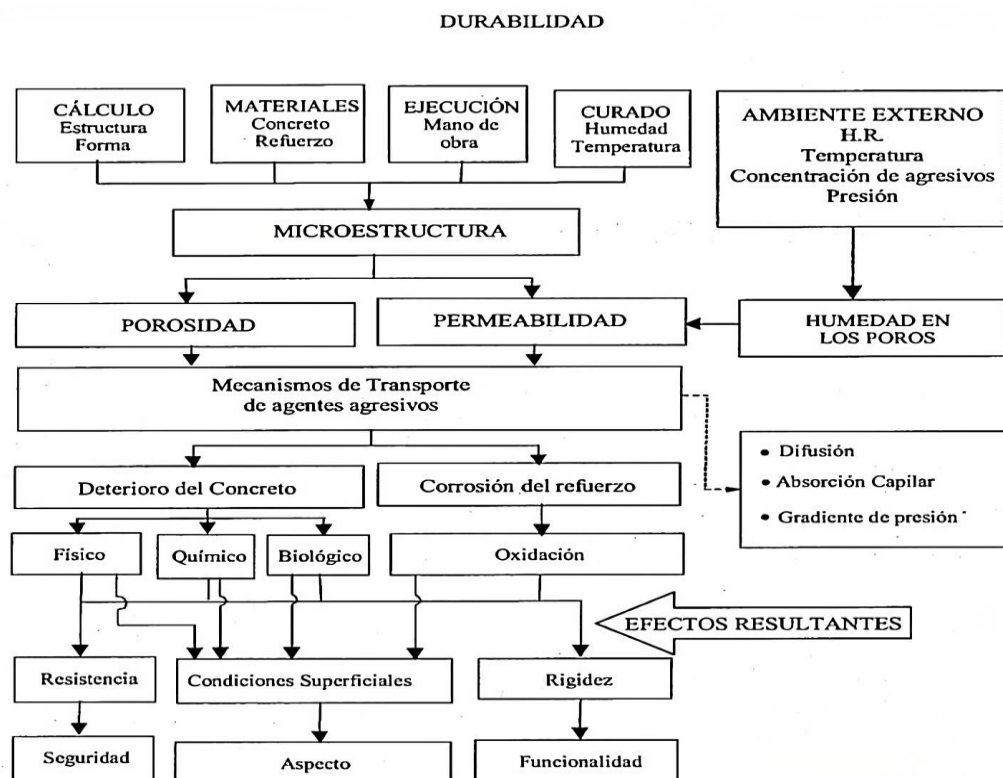
Figura 1, se resume los diferentes factores que afectan la resistencia a compresión del concreto.

2.2.3. Propiedades asociadas a la durabilidad del concreto

Según el comité 201 del ACI (2019), 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 duradero debe preservar su forma original, su calidad y sus propiedades funcionales cuando esté expuesto a su medio ambiente. Por lo tanto, la durabilidad depende del ambiente al que se exponga el concreto o de causas internas del concreto mismo (Ver Figura 2).

Figura 2

Esquema de factores que afectan la durabilidad del concreto armado



Nota: Extraído de Acción de los Agentes Químicos y Físicos Sobre el Concreto, Sanjuán Barbudo & Castro Borges (2001).



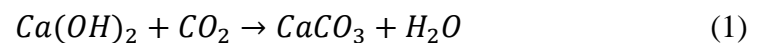
a) Permeabilidad del concreto

La permeabilidad del concreto, como la de cualquier material, consiste en que este pueda ser atravesado por un fluido (agua, aire, vapor de agua) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material. La permeabilidad del concreto no es únicamente una función de su porosidad, sino que también depende también del tamaño, distribución y continuidad de los poros.

b) Carbonatación

La estructura porosa del concreto está expuesta siempre más a procesos de corrosión atmosférica, siendo la carbonatación uno de los mecanismos principales de corrosión. Este fenómeno afecta también acero de refuerzo del concreto estructural (Chinè Polito et al., 2019).

La carbonatación del concreto como se observa en la ecuación (1), es un proceso por el cual el dióxido de carbono CO_2 del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos, tales como los hidróxidos de calcio $Ca(OH)_2$ para formar carbonatos de calcio (Kosmatka et al., 2004).



En el proceso el CO_2 se difunde a través de los poros del concreto y en presencia de la humedad se forma el carbonato de calcio $CaCO_3$. Este fenómeno comienza en la superficie del concreto y avanza lentamente hacia el interior. La carbonatación tiene varias implicancias, la principal es que baja la alcalinidad del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para proteger la



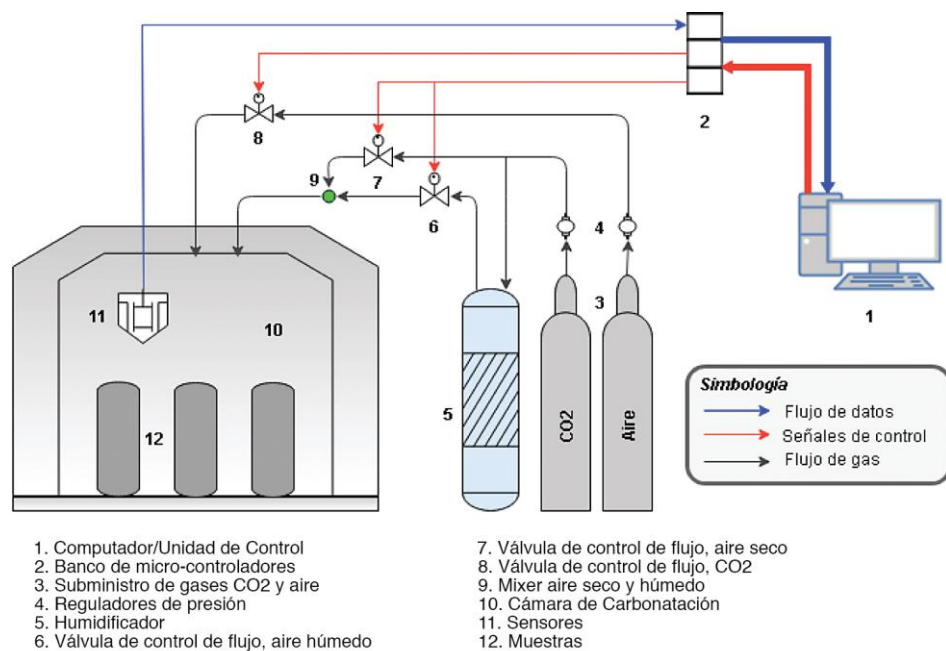
armadura de la corrosión. De esta manera, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para ayudar a prevenir la corrosión (Kosmatka et al., 2004).

Además, Sanjuán Barbudo & Castro Borges (2001) indica que la carbonatación es una reacción exotérmica que produce 19,2 kcal y que afecta a las propiedades físico-químicas de la pasta conglomerante, provocando una modificación lenta de su estructura, variando así la resistencia mecánica y química, originando retracciones, y reduciendo la porosidad en concretos de cemento portland.

Por otro lado, carbonatación acelerada tiene el propósito de realizar estudios sobre el efecto de carbonatación que ocurre en el concreto, simulando ambientes de concentraciones controladas de CO_2 y de humedad relativa. Para lograr este proceso, se necesita una cámara de carbonatación acelerada y hermética, debe contar con dispositivos que permitan la regulación de concentración y monitorear la temperatura (Ver Figura 3). Debido que la concentración atmosférica de CO_2 es de 0.03%, por lo que, para realizar un estudio tomaría años. Por otro lado, la humedad relativa es importante debido a que si supera los valores máximos, los poros se obstruyen y no hay transporte del CO_2 , mientras si los valores son mínimos, no hay suficiente fase acuosa para que se desarrollen las reacciones de carbonatación, con sucesiva disolución de hidróxido de calcio y precipitación de calcita (Chinè Polito et al., 2019).

Figura 3

Componentes de una cámara de carbonatación acelerada



Nota: Extraído de Estudio experimental de la carbonatación del concreto, Chinè Polito et al. (2019).

c) Resistencia a los sulfatos

Los sulfatos que afectan la durabilidad se hallan usualmente en el suelo en contacto con el concreto, en agua de lluvia, en aguas contaminadas por desechos industriales o por flujo en suelos agresivos (Pasquel Carbajal, 1998).

El sistema de acción de los sulfatos genera dos tipos de reacciones químicas:

- La combinación del sulfato con hidróxido de calcio libre, forma sulfato de calcio (yeso) que tiene propiedades expansivas.
- La integración de yeso con aluminato cálcico hidratado para formar sulfoaluminato de calcio (etringita) de igual forma con cualidades expansivas.



La etringita primaria formada a edades tempranas, se convierte en un problema cuando se forman cantidades excesivas de etringita secundaria, debido a la reacción con sulfatos externos, lo que puede provocar una expansión no controlada dentro del concreto. Esta expansión, puede generar fisuras y deterioro estructural, afectando negativamente la durabilidad y resistencia del concreto. La formación de etringita secundaria es particularmente problemática en ambientes donde hay alta concentración de sulfatos, lo que favorece su crecimiento y puede llevar a un aumento significativo en volumen (Barger et al., 2001).

d) Contenido de ion cloruro

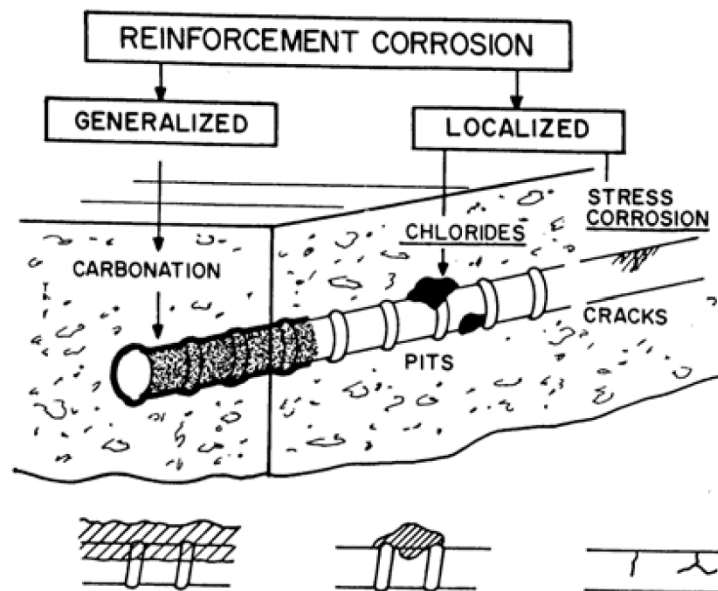
Los cloruros se encuentran de manera habitual en el ambiente, en las zonas próximas al mar como el agua marina y en ciertos suelos y aguas contaminadas, de manera natural o artificial. Los cloruros no tienen acción perjudicial directa sobre el concreto sino es a través de su participación en la corrosión de metales embebidos en el concreto, generando compuestos de hierro, que al expandirse fragmenta la estructuras de la pasta y agregados (Pasquel Carbajal, 1998).

El acero de refuerzo del concreto estructural tiende a pasivarse debido a la alcalinidad que le puede ofrecer la portlandita o el hidróxido de calcio. Sin embargo, cuando los iones cloruro alcanzan al acero de refuerzo embebido, el acero tiende a despasivarse como se muestra en la Figura 4. Esto sucede cuando la concentración de cloruros supera el umbral crítico de cloruros, que depende del pH del concreto y de la calidad del acero. Los iones cloruros es una de las

principales causas de corrosión localizada y de la reducción de la durabilidad del concreto armado, especialmente en entornos agresivos (Tinoco, 2014).

Figura 4

Mecanismos de corrosión del acero de refuerzo



Fuente: Adaptado de Protección Superficial del Hormigón Armado: Cloruros y Carbonatación Tinoco (2014).

2.2.4. Diseño de mezclas de concreto

El diseño de mezclas es un procedimiento que implica la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregado fino, agregado grueso, agua y aditivos) y la determinación de sus características y cantidades relativas para producir un concreto que sea lo más económico posible. Es decir que el concreto diseñado deba cumplir con el grado requerido de manejabilidad además que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario y apariencia adecuada. Estas cantidades de materiales dependen de las características de cada uno de los materiales utilizados, así como de las propiedades particulares del concreto especificado y de las condiciones



particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado (Sánchez De Guzmán, 2001).

Las propiedades requeridas del concreto fresco están regidas por la función al que estará destinado el concreto y por las disposiciones esperadas en el momento del vaciado y por otro lado las propiedades en el estado endurecido se encuentran especificadas por el responsable técnico de la estructura de acuerdo a las condiciones de servicio y exposición que estará sometida. Finalmente, un aspecto importante que se debe tomar en cuenta es el realizar un diseño de mezclas con la tecnología existente en el sitio en el que se va a producir debido a que hay diferentes sistemas de dosificación, mezclado, transporte, colocación y curado que tienen mucha influencia en las propiedades del concreto (Sánchez De Guzmán, 2001).

2.2.5. Composición química de materiales

2.2.5.1. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Los espectrómetros de fluorescencia de rayos X son altamente flexibles y sensibles, lo que los hace ideales para el análisis cuantitativo. Los espectrómetros de dispersión de longitud de onda de un canal son utilizados para el análisis rutinario y no rutinario de una amplia gama de muestras. Sin embargo, son más lentos en comparación con los espectrómetros multicanal. Estos últimos, se utilizan principalmente en análisis rutinarios de alto rendimiento, donde la rapidez y precisión son fundamentales y la flexibilidad no es tan importante. Los espectrómetros de dispersión de energía tienen la ventaja de mostrar información sobre



todos los elementos simultáneamente, aunque tienen menos resolución que los sistemas de dispersión por longitud de onda. Estos espectrómetros son utilizados en el control de calidad, resolución de problemas y otros campos como la clasificación de aleaciones de chatarra, ciencia forense y suministro de datos elementales para complementar los datos de difracción de polvos de rayos X (Jenkins, 1999).

El método de fluorescencia de rayos X ha evolucionado para ser lo suficientemente sensible para medir directamente niveles de contaminantes en muestras de aire y agua sin la necesidad de pre concentración. Esto ha llevado a un aumento en su aplicación en el análisis de metales traza en dichas muestras. Un ejemplo destacado es su uso en la industria papelera para analizar una amplia variedad de compuestos, como cal, calcita, dolomitas, silicatos, entre otros. También se ha utilizado para evaluar la presencia de sustancias como pentaclorofenol y arseniato de cobre amónico, azufre, cloro, bromo y titanio en papel, pulpa, brea y asfalto, así como para medir la imprimibilidad del papel y la retención de tinta. En resumen, la sensibilidad mejorada del método de fluorescencia de rayos X ha permitido su uso en múltiples aplicaciones industriales (Jenkins, 1999).

2.2.5.2. Difracción de rayos X (DRX)

El análisis cualitativo y cuantitativo de una sustancia se realiza mediante la identificación de su patrón de difracción, el cual es característico de esa sustancia, ya sea en estado puro o como parte de una mezcla. Esto permite detectar la presencia de una sustancia en una muestra



de manera precisa. Además, el análisis de difracción también sirve para distinguir entre diferentes modificaciones alotrópicas de la misma sustancia. Un ejemplo de esto es la sílice sólida, que puede existir en una forma amorfa y seis formas cristalinas distintas, y cada una de estas formas tiene un patrón de difracción diferente. La ventaja de utilizar el análisis de difracción es que revela la presencia de una sustancia tal y como existe en realidad en la muestra, sin tener en cuenta sus elementos químicos constituyentes (Cullity & Stock, 2014).

El análisis por difracción es útil para determinar el estado de combinación química de los elementos y las fases en las que están presentes. Este método se ha utilizado ampliamente en el análisis de minerales, arcillas, aleaciones y otros materiales. A diferencia del análisis químico convencional, la difracción ofrece ventajas como la rapidez, la necesidad de una pequeña muestra y su carácter no destructivo (Cullity & Stock, 2014).

2.2.5.3. Espectrometría infrarroja (IR)

La espectroscopia infrarroja es una técnica analítica importante que permite estudiar muestras en diferentes estados (líquidos, soluciones, pastas, polvos, etc.). Esta técnica se basa en las vibraciones de los átomos de una molécula y se obtiene al hacer pasar radiación infrarroja a través de una muestra y determinar qué fracción de la radiación se absorbe a una energía específica. Las mejoras en la instrumentación han permitido desarrollar nuevas técnicas sensibles para analizar muestras difíciles de examinar anteriormente. Cada pico en un espectro de absorción



corresponde a la frecuencia de una vibración de una parte de la molécula de la muestra. En resumen, la espectroscopia infrarroja es una técnica versátil y útil que proporciona información sobre las vibraciones de las moléculas en diferentes tipos de muestras (Stuart, 2004).

2.2.5.4. Microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS)

La microscopía electrónica se fundamenta a través de la emisión de un barrido de haz de electrones sobre la muestra, los cuales interaccionan con la misma produciendo diferentes tipos de señales que son recogidas por detectores. Posteriormente, la información obtenida en los detectores es transformada para dar lugar a una imagen de alta definición, con una resolución de 0.4 a 20 nanómetros (Atria, 2020).

Goldstein et al. (2003) indica que el beneficio del SEM se debe a la capacidad de obtener imágenes tridimensionales de las superficies de una amplia gama de materiales. Las imágenes obtenidas mediante SEM se utilizan en una variedad de medios, desde revistas científicas hasta publicaciones populares relacionadas con el tema. Su principal ventaja es la alta resolución, que permite estudiar tanto la microestructura como la composición química de diversos materiales.

Además, la microscopía electrónica es una técnica muy útil en la caracterización de materiales, ya que se necesita muy poca cantidad de muestra y se trata de una técnica no destructiva (mientras no haya que cortar la muestra para que quepa en el portaobjetos o recubrir). Esto



significa que la muestra no se ve perjudicada y se puede recuperar (Atria, 2020).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. Concreto

Según Sánchez De Guzmán (2001) manifiestan que, una forma de definir el concreto es como la mezcla de cemento (aglutinante), agregados (aporta volumen), agua y a menudo aditivos, lo cual al momento de endurecer conforman una sola unidad, y que a medida que el tiempo transcurre, tiene la capacidad de soportar esfuerzos de compresión mayores.

Sanjuán Barbudo & Castro Borges (2001) señala que la estructura del concreto depende principalmente de: a) las características fisicoquímicas y distribución de los componentes empleados en su elaboración (agregados, cemento, agua, aditivos, adiciones y acero en el caso del concreto armado), b) de las acciones realizadas para la puesta en obra y c) del tipo de curado.

2.3.2. Composición del concreto

2.3.2.1. Cemento

Enrique Rivva López (2000) define que, el cemento es un componente en polvo que, al mezclarse con una cantidad de agua, produce una pasta aglomerante con propiedades de solidificarse, tanto en ambientes acuáticos como aéreos. Se excluyen las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos.



Nilson et al. (2010) manifiesta que, un material cementante es aquel que posee propiedades adhesivas y cohesivas para unir agregados inertes en una masa sólida de suficiente resistencia y durabilidad. Aparte de los cementos propiamente dichos, las cales, los asfaltos y los alquitranes son algunos de los materiales que también se encuentran dentro de esta categoría de materiales de gran importancia tecnológica, ya que se utilizan en la construcción de carreteras, entre otros.

De acuerdo a Enrique Rivva López (2000) los tipos de cemento son:

- Tipo I: De uso general, donde no se requiere propiedades especiales.
- Tipo II: De moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación. Especialmente adecuados para ser empleados en estructuras en ambiente agresivos y/ vaciados masivos.
- Tipo III: Desarrollo rápido de resistencia con elevado calor de hidratación. Especiales para uso en casos en que se necesita adelantar la puesta en servicio de las estructuras, o para uso en climas fríos.
- Tipo IV: de bajo calor de hidratación, recomendables para concretos masivos.
- Tipo V: Recomendables para ambientes muy agresivos por su alta resistencia a los sulfatos.

De estos cinco tipos en Perú solo se fabrican los tipos I, II y V. Por otra parte Enrique Rivva López (2000) indica que, los cementos



adicionados, son la mezcla de cemento y un material con propiedades puzolánicas molidas conjuntamente. En el Perú se fabrican los Tipos IP, IPM, IS y ISM.

Kosmatka et al. (2004) menciona que, la norma NTP 334.082 establece los requisitos de desempeño de los cementos Portland para aplicaciones generales y especiales. No hay restricciones en cuanto a la composición o los componentes de estos cementos. La norma se basa en la norma ASTM C 1157. Se distingue entre cementos Portland modificados (con hasta un 15% de adiciones) y cementos adicionados (con más del 15% de adiciones). Estos cementos se clasifican según sus propiedades, como Tipo GU (construcciones generales), HE (alta resistencia inicial), MS (moderada resistencia a los sulfatos), HS (alta resistencia a los sulfatos), MH (resistencia moderada a los sulfatos), LH (bajo calor de hidratación) y opción R de baja reactividad a los álcalis con agregados reactivos. Los cementos comercializados dentro del mercado peruano son: tipo I y tipo I (bajo contenido de álcalis), tipo II y tipo II (bajo contenido de álcalis), tipo V, tipo IP, tipo I(PM), tipo MS, tipo ICo y el cemento de albañilería.

De acuerdo al Reglamento Técnico, sobre cemento Hidráulico Utilizado en Edificaciones y Construcciones en General, define al Cemento hidráulico adicionado tipo IP o cemento Portland puzolánico como: cemento hidráulico constituido por una combinación uniforme y profunda de cemento Portland o cemento de escoria de alto horno Portland y puzolana fina producida al intercalar clínker de cemento Portland y

puzolana; mezclando el cemento Portland o el cemento Portland de escoria de alto horno y la puzolana finamente molida; o por una combinación de molienda y mezcla, en la cual la cantidad del constituyente de la puzolana está dentro de los límites especificados. (NTP 334.001:2019).

A continuación, se presenta la Tabla 1 donde se detallan los cementos hidráulicos:

Tabla 1

Tipos de cementos hidráulicos

| Cementos Hidráulicos | Tipo | Denominación |
|---|----------------|--|
| Cementos Portland | Tipo I | Cemento Portland de uso general |
| | Tipo II | Cemento Portland de uso general de moderada resistencia a los sulfatos |
| | Tipo III | Cemento Portland de alta resistencia inicial |
| | Tipo IV | Cemento Portland de bajo calor de hidratación |
| | Tipo V | Cemento Portland de alta resistencia a los sulfatos |
| Cementos hidráulicos adicionados | Tipo IS | Cemento Portland con escoria de alto horno |
| | Tipo IP | Cemento Portland puzolánico |
| | Tipo I (IM) | Cemento Portland puzolánico modificado Cemento Portland caliza |
| | Tipo IL | |
| | Tipo IT | Cemento adicionado ternario |
| | Tipo ICo | Cemento Portland compuesto |
| | Tipo GU | Cemento Hidráulico de uso general |
| Cementos hidráulicos especificado | Tipo HE | Cemento Hidráulico de alta resistencia inicial |
| | Tipo MS | Cemento Hidráulico de moderada resistencia a los sulfatos |
| | Tipo HS | Cemento Hidráulico de alta resistencia a los sulfatos |
| | Tipo MH | |

| Cementos Hidráulicos | Tipo | Denominación |
|-------------------------|---------|--|
| por desempeño | Tipo LH | Cemento Hidráulico de moderado calor de hidratación Cemento Hidráulico de bajo calor de hidratación |

Nota: Tomado del Reglamento Técnico Sobre Cemento Hidráulico.

El cemento Portland Puzolánico Yura IP, es un cemento adicionado debido a su combinación con puzolana es un producto elaborado a partir de Clinker de elevada calidad, puzolana natural de origen volcánico de elevada reactividad y yeso, cumple con las normas NTP 334.097 y la ASTM C1508, podemos ver sus características químicas y físicas en la Tabla 2, además su elaboración está reglamentada por Gestión de Calidad ISO 9001 y Gestión Ambiental 14001.

Tabla 2

Características químicas del cemento Portland Yura tipo IP

| Requisitos Químicos | Unidad | Cemento Portland Yura Tipo IP | N.T.P. 334.090 ASTM C595 |
|--|--------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Óxido de magnesio (MgO) | % | 1.50 a 3.00 | 6.00 máx. |
| Trióxido de azufre, (SO ₃) | % | 1.50 a 3.00 | 4.00 máx. |
| Perdida por ignición | % | 1.50 a 4.00 | 5.00 máx. |
| Requisitos Físicos | Unidad | Cemento Portland Yura Tipo IP | N.T.P. 334.090 ASTM C595 |
| Densidad | gr/cm ² | 2.70 a 2.80 | - |
| Contracción / Expansión en autoclave | % | -0.09 a 0.05 | -0.20 a 0.80 |
| Tiempo de fraguado inicial Vicat | min | 140 a 260 | 45 a 420 |
| Contenido de aire | % | 3 a 8 | 12 máx. |

Nota: Recuperado de ficha técnica de Cemento Yura tipo IP.

En la Figura 5, se muestra la presentación del cemento Portland Yura Tipo IP de 42.50 kg, de igual forma se puede observar las bolsas de

cemento que se encuentran apiladas en el almacén de la empresa proveedora de materiales de construcción en la ciudad de Puno.

Figura 5

Presentación del cemento Yura tipo IP



Nota: Elaboración propia.

2.3.2.2. Agregado fino

Enrique Rivva López (2000) manifiesta que, se define como agregado fino a aquel material que proviene de la fragmentación artificial o natural de las rocas, el cual pasa el tamiz 3/8” y obedece a los parámetros establecidos en las normas NTP 400.037 ó ASTM C 33. Además, Portugal Barriga (2007) recomienda que las arenas con un módulo de fineza igual o mayor a 3.0 tienen un impacto positivo en la trabajabilidad y resistencia a la compresión del concreto.

2.3.2.3. Agregado grueso

Enrique Rivva López (2000) manifiesta que, se describe como agregado grueso al material que queda retenido en el tamiz N° 4 y que



cumple con los parámetros establecidos en las normas NTP 400.037 ó ASTM C 33. Este agregado se caracteriza por estar constituido por piedra partida, grava natural o triturada, agregados metálicos, naturales o artificiales, concreto triturado, o una integración de ellos. Este material cumple un papel fundamental en la mezcla de concreto, ya que aporta volumen y contribuye significativamente a la resistencia mecánica.

Abanto Castillo (2009) denomina a la piedra chancada como, el agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas o gravas. Teniendo como función principal el de aportar volumen y resistencia, los ensayos demuestran que la piedra chancada produce concretos ligeramente más resistentes que aquellos elaborados con piedra redonda.

El agregado grueso puede ser de grava natural o de piedra triturada, a su vez son esenciales para el diseño de mezclas de concreto, ya que proporcionan no solo el volumen necesario, sino que también una resistencia al concreto.

2.3.2.4. Agua

Portugal Barriga (2007) indica que el agua que se emplee debe cumplir con los parámetros establecidos en la NTP 339.088, siendo preferentemente potable. Si es necesario el uso de un agua no potable, deben realizar estudios comparando el agua a evaluar con agua potable.

Las especificaciones de la norma garantizan que el agua no tenga impurezas o sustancias que pudieran afectar negativamente a las propiedades del concreto.



2.4. MARCO NORMATIVO

2.4.1. Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)

Mediante la Norma E 060 del RNE (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2021), se establecen las normativas técnicas para el diseño y construcción de obras de infraestructura, garantizando la calidad y durabilidad del concreto. El RNE es fundamental para asegurar la resistencia del concreto frente a factores agresivos como la carbonatación, los cloruros y los sulfatos. A continuación, se destacan los artículos relevantes:

- *Artículo 4.5: Resistencia y Durabilidad del Concreto:* Establece los requisitos generales para asegurar la durabilidad del concreto frente a agresiones externas como la carbonatación y la presencia de cloruros y sulfatos.
- *Artículo 4.6: Exposición a Agentes Agresivos:* Detalla los tipos de exposición que afectan la durabilidad del concreto, mencionando ambientes con altos niveles de dióxido de carbono, cloruros y sulfatos.
- *Artículo 5.4: Selección de Materiales para Concreto:* Especifica que los materiales deben cumplir con estándares de calidad para garantizar la durabilidad del concreto frente a la carbonatación y la corrosión provocada por cloruros y sulfatos.
- *Artículo 5.7: Aditivos para Concreto:* Resalta el uso de aditivos impermeabilizantes para mejorar la resistencia del concreto, especialmente frente a la penetración de agua, la corrosión de armaduras y los agentes externos como cloruros y sulfatos.



2.4.2. ASTM C1202-22, 2022

- *Método de ensayo para la resistividad eléctrica del concreto:* Este ensayo se utiliza para evaluar la permeabilidad del concreto, un factor crucial para proteger al concreto contra la carbonatación, cloruros y sulfatos. La baja permeabilidad es esencial para prevenir la penetración de estos agentes.

2.4.3. ASTM C1012-18b, 2018

- *Método de ensayo para la expansión del concreto debido a sulfatos:* Este estándar mide la expansión del concreto debido a la reacción con sulfatos, un factor importante para la durabilidad del concreto en suelos o aguas con alto contenido de sulfatos.

2.4.4. UNE-EN 12390-12, 2020

- *Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón. Método de carbonatación acelerada:* Esta norma determina la resistencia a la carbonatación del concreto empleando condiciones aceleradas mediante una cámara de carbonatación acelerada. Previo un período de acondicionamiento, el ensayo se lleva a cabo siempre y cuando se tenga condiciones de exposición controladas, empleando un incremento en la concentración de dióxido de carbono.

2.4.5. ACI-318, 2019

- *Requisitos de reglamento para concreto estructural:* Este reglamento ACI318R-19 se describe para cubrir todas las categorías usuales de edificaciones, pequeñas y grandes. Brindando al profesional facultado para



realizar un diseño estructural, requisitos de materiales o procedimientos constructivos.



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LUGAR DE ESTUDIOS

La investigación se llevará a cabo en el Laboratorio de Construcciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, ubicado en la ciudad de Puno, Perú (Ver Figura 6). Este laboratorio está equipado adecuadamente para la preparación y análisis de mezclas de concreto, así como para la realización de ensayos físicos y mecánicos pertinentes para evaluar las propiedades del concreto.

El laboratorio proporcionará un entorno controlado para la elaboración de probetas de concreto, donde se incorporarán aditivos impermeabilizantes como la adición de humo de sílice en 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00% y 12.50% y la adición de silicato de sodio en 0.50%, 1.00%, 2.00%, 3.50% y 5.00%.

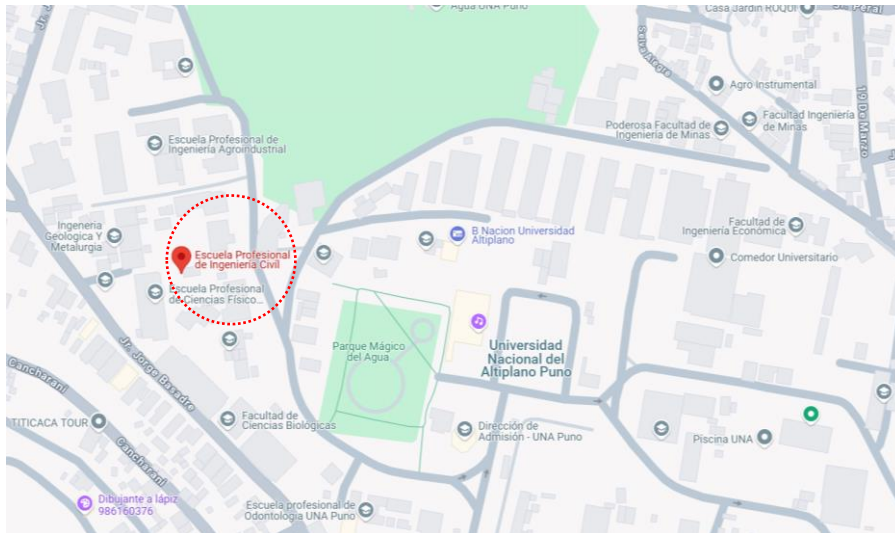
Las condiciones aceleradas de carbonatación y exposición a sales se simularán mediante un sistema específico diseñado por los investigadores para replicar las condiciones ambientales adversas que se presentan en la región como también en otras regiones, caracterizada por su alta humedad y presencia de sales.

Adicionalmente, se realizarán pruebas en condiciones externas representativas del entorno local, donde se recolectarán datos de mediciones en el laboratorio relacionadas con la humedad, temperatura y otros factores ambientales que puedan influir en los resultados del estudio.

Este enfoque permitirá evidenciar con precisión la influencia de los aditivos impermeabilizantes sobre las propiedades del concreto, cumpliendo así con el objetivo general de la investigación.

Figura 6

Lugar de estudios



Nota: Ubicación del Laboratorio de Construcciones de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil – Universidad Nacional del Altiplano de Puno. Fuente: Google Maps.

3.2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

3.2.1. Enfoque de la investigación

El enfoque de la presente investigación es cuantitativo, debido a que se caracteriza por utilizar métodos y técnicas cuantitativas y con lo propuesto por (Carrasco Díaz, 2006) tiene que ver con la medición, el uso de magnitudes, la observación y medición de las unidades de análisis, el muestreo y tratamientos estadísticos. Este enfoque utiliza la recolección de datos y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis formuladas previamente con el uso de estadística descriptiva e inferencial (Ñaupas Paitán et al., 2018).



3.2.2. Tipo de investigación

La propuesta para el desarrollo de la presente investigación, se toma en consideración las condiciones de exhaustivo, excluyente y parsimonia (Supo & Zacarías, 2020). Por lo tanto, la investigación actual se clasifica como prospectivo según el tipo de planificación de la medición; transversal según el período de tiempo y el número de mediciones de la variable de estudio; analítico según el número de variables a analizar; pura, en función de su finalidad y del tipo de conocimientos a obtener; y cuantitativas en función de la naturaleza de la información y del tipo de datos a utilizar.

3.2.3. Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo puesto que estos estudios van más allá de la descripción de situaciones y fenómenos, son estudios dirigidos a responder al por qué ocurren los problemas o fenómenos, cuales son las causas que los ocasionan, las condiciones en que ocurren y la relación entre variables (Rivero Lazo et al., 2021).

3.2.4. Diseño de investigación

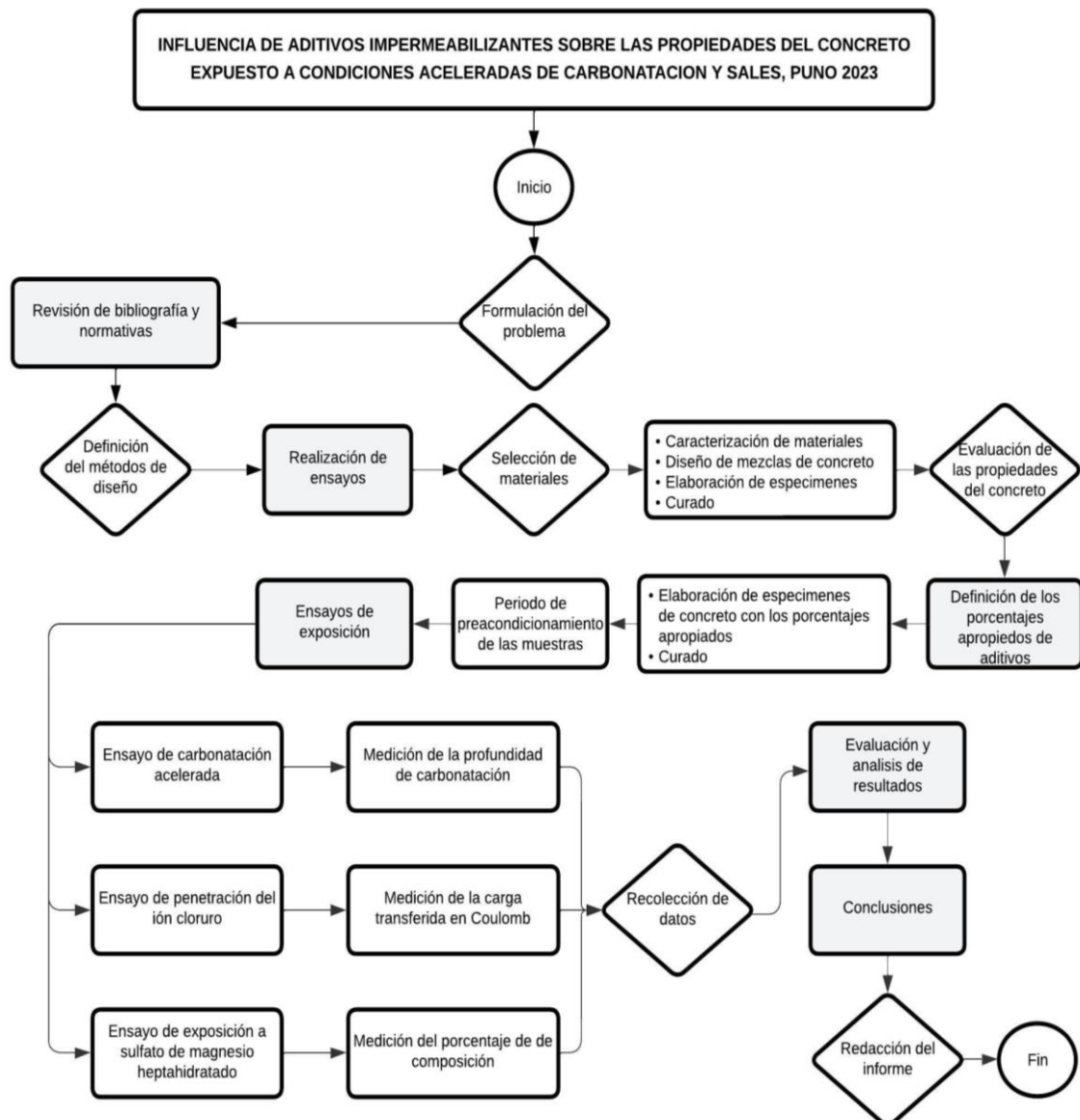
De acuerdo con lo propuesto por Hernandez Sampieri et al. (2014) el diseño de investigación es cuasi experimental puesto que implicó la manipulación de variables independientes para observar su efecto, control, medición y comparación de resultados sobre las variables dependientes entre grupos que no se asignaron aleatoriamente, sino que dichos grupos están conformados previo a realizarse el experimento. Así mismo, la presente investigación se enmarca con enfoque cuantitativo debido al tipo de información y de datos que fueron

obtenidos en los ambientes del laboratorio. Toda esta información se encuentra en la sección Anexos (Anexo 1: Matriz de consistencia)

Las pruebas experimentales se realizaron en el Laboratorio de Construcciones de la EPIC, de acuerdo a los objetivos específicos planteados (Ver Figura 7).

Figura 7

Esquema de procesos de la investigación



Nota: Elaboración propia.

3.3. POBLACIÓN

Es el conjunto de todos los elementos con características específicas que pertenecen al ámbito espacial donde se desarrolla el trabajo de investigación (Carrasco Díaz, 2006). En esta investigación la población de estudio está conformada por el concreto estructural con una resistencia a la compresión de $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$ con la incorporación de humo de sílice y la incorporación de silicato de sodio.

3.4. MUESTRA

La muestra constituye una parte representativa de la población, debe tener las mismas características de la población, debiendo ser seleccionada con la utilización de técnicas adecuadas (Rivero Lazo et al., 2021). Para fines de la presente investigación se realizó muestreos no probabilísticos por conveniencia teniendo en cuenta los objetivos, debido a que la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino con causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra (Behar Rivero, 2008).

3.4.1. Primer objetivo específico

El muestreo que se realizó es no probabilístico a juicio o conveniencia, debido al ensayo programado en el objetivo específico de la investigación y teniendo en cuenta lo que indican los lineamientos del (ACI - 318, 2019), que los resultados de resistencia deben ser el promedio de tres repeticiones de especímenes de 100 mm x 200 mm por edad (7, 14, 28 días). Por lo tanto, para el presente objetivo específico se utilizaron 99 especímenes, 9 por cada porcentaje de adición de aditivo impermeabilizantes (3 por cada edad) tal como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3*Número de muestras para el primer objetivo específico*

| Descripción | Edad | | | Sub total |
|-------------------------|--------|---------|---------|-----------|
| | 7 días | 14 días | 28 días | |
| Concreto control | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 2.50% Humo de Sílice | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 5.00% Humo de Sílice | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 7.50% Humo de Sílice | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 10.00% Humo de Sílice | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 12.50% Humo de Sílice | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 0.50% Silicato de Sodio | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 1.00% Silicato de Sodio | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 2.00% Silicato de Sodio | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 3.50% Silicato de Sodio | 3 | 3 | 3 | 9 |
| 5.00% Silicato de Sodio | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Total | | | | 99 |

Nota: Elaboración propia.

3.4.2. Segundo objetivo específico

El muestreo que se realizó es no probabilístico a juicio o conveniencia, debido al ensayo programado en el objetivo específico de la investigación y teniendo en cuenta lo que indican los lineamientos del (ACI - 318, 2019), que los resultados de resistencia deben ser el promedio de tres repeticiones de especímenes de 100 mm x 200 mm por edad (7, 14, 28 días). Por lo tanto, para el presente objetivo específico se utilizaron 99 especímenes, 9 por cada porcentaje de adición de aditivo impermeabilizantes (3 por cada edad) tal como se expone en la Tabla 4.

Tabla 4*Número de muestras para el segundo objetivo específico*

| Descripción | % de adición | Edad | | | Sub total |
|------------------|--------------|--------|---------|---------|-----------|
| | | 7 días | 14 días | 28 días | |
| Concreto control | 0.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Humo de Sílice | 2.50% | 3 | 3 | 3 | 9 |



| Descripción | % de adición | Edad | | | Sub total |
|-------------------|--------------|--------|---------|---------|-----------|
| | | 7 días | 14 días | 28 días | |
| | 5.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 7.50% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 10.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 12.50% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 0.50% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 1.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Silicato de Sodio | 2.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 3.50% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| | 5.00% | 3 | 3 | 3 | 9 |
| Total | | | | | 99 |

Nota: Elaboración propia.

3.4.3. Tercer objetivo específico

El muestreo que se realizó es no probabilístico a juicio o conveniencia, debido al ensayo programado en el objetivo específico de la investigación y teniendo en cuenta lo que indican los lineamientos de la (UNE-EN 14630, 2007). Por lo tanto, para el presente objetivo específico se utilizaron 144 especímenes, 48 por cada porcentaje adecuado de adición de aditivo impermeabilizante, 8 por cada periodo de carbonatación acelerada (16 lecturas radiales por cada espécimen) tal como se expone en la Tabla 5.

Tabla 5

Número de muestras para el tercer objetivo específico

| Descripción | % de adición apropiada | Carbonatación acelerada | | | | | | Sub total |
|-------------------|------------------------|-------------------------|---------|---------|----------|----------|-----------|------------|
| | | 2 horas | 3 horas | 7 horas | 14 horas | 40 horas | 120 horas | |
| Concreto control | 0.00% | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 48 |
| Humo de Sílice | 7.50% | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 48 |
| Silicato de Sodio | 0.50% | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 48 |
| Total | | | | | | | | 144 |

Nota: Elaboración propia.

3.4.4. Cuarto objetivo específico

El muestreo que se realizó es no probabilístico a juicio o conveniencia, debido al ensayo programado en el objetivo específico de la investigación y teniendo en cuenta lo que indican los lineamientos de la (ASTM C1202-22, 2022). Por lo tanto, para el presente objetivo específico se utilizaron 21 cilindros, 7 por cada porcentaje adecuado de adición de aditivo impermeabilizante tal como se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6

Número de muestras para el cuarto objetivo específico

| Descripción | % de adición apropiada | Número de cilindros |
|-------------------|------------------------|---------------------|
| Concreto control | 0.00% | 7 |
| Humo de Sílice | 7.50% | 7 |
| Silicato de Sodio | 0.50% | 7 |
| Total | | 21 |

Nota: Elaboración propia.

3.4.5. Quinto objetivo específico

El muestreo que se realizó es no probabilístico a juicio o conveniencia, debido al ensayo programado en el objetivo específico de la investigación y teniendo en cuenta lo que indican los lineamientos de la (ASTM C1012-18b, 2018). Por lo tanto, para el presente objetivo específico se utilizaron 18 especímenes, 6 por cada porcentaje adecuado de adición de aditivo impermeabilizante (3 de pre exposición y 3 post exposición) tal como se expone en la Tabla 7.

Tabla 7*Número de muestras para el quinto objetivo específico*

| Descripción | % de adición óptima | Número de especímenes pre exposición | Número de especímenes post exposición | Sub total |
|-------------------|---------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|-----------|
| Concreto control | 0.00% | 3 | 3 | 6 |
| Humo de Sílice | 7.50% | 3 | 3 | 6 |
| Silicato de Sodio | 0.50% | 3 | 3 | 6 |
| Total | | | | 18 |

Nota: Elaboración propia.

3.5. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Es un proceso metodológico que consiste en disgregar deductivamente las variables que componen el problema de investigación, partiendo desde lo más general a lo más específico; es decir, si las variables son complejas se dividen en dimensiones, áreas, aspectos, indicadores, índices, sub índices e ítems; pero si son concretas solamente en indicadores, índices e ítems (Carrasco Díaz, 2006). Para la presente investigación se muestra a detalle las variables en la Tabla 8.

Tabla 8*Operacionalización de variables*

| Variables | Indicador | Índice | Tipo de variable | Dimensión | Técnica |
|--------------------------------------|--|--------------------|----------------------------|-----------|---------------|
| Adición de Humo de Sílice (VI) | Dosificación | % de adición | Numérico de razón continua | Objetiva | Documentación |
| Adición de Silicato de Sodio (VI) | Dosificación | % de adición | Numérico de razón continua | Objetiva | Documentación |
| Resistencia a la Compresión (VD) | Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes | kg/cm ² | Numérica de razón continua | Objetiva | Documentación |
| Asentamiento en concreto Fresco (VD) | Ensayo de prueba Slump - Como de Abrams | mm | Numérica de razón continua | Objetiva | Documentación |
| Profundidad de carbonatación (VD) | Ensayo de profundidad de carbonatación con fenolftaleína | mm | Numérica de razón continua | Objetiva | Documentación |



| Variables | Indicador | Índice | Tipo de variable | Dimensión | Técnica |
|--|--|---------------|----------------------------|------------------|----------------|
| Resistencia a la penetración del ion cloruro (VD) | Ensayo de resistencia a la penetración del ion cloruro | Coulombs | Numérica de razón continua | Objetiva | Documentación |
| Variación de composición química del concreto (VD) | Ensayo de composición química por Fluorescencia de Rayos X | % | Numérica de razón continua | Objetiva | Documentación |

Nota: VI es Variable Independiente y VD es Variable Dependiente. Elaboración propia.

3.6. DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.6.1. Primer objetivo específico

3.6.1.1. Descripción de variables analizadas

Para evaluar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades físicas y mecánicas del concreto fue necesario realizar ensayos de laboratorio, así como la elaboración de especímenes de concreto. A continuación, se detalla las variables identificadas en el objetivo específico, siendo las siguientes:

- Incorporación de aditivos impermeabilizantes (VI)
- Propiedades físicas y mecánicas (VD)

3.6.1.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros

a) Ensayos para el diseño de mezclas

- Análisis granulométrico del agregado fino y grueso. El análisis granulométrico del agregado fino y grueso se realizó de acuerdo a los lineamientos que indica la norma (NTP 400.012, 2021).



- Peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso. El ensayo de peso unitario compactado y suelto tanto para el agregado fino y el agregado grueso se desarrolló en base a los lineamientos que establece la norma (NTP 400.017, 2020).
- Peso específico y absorción del agregado grueso y fino. Los ensayos de peso específico y absorción tanto para el agregado fino y el agregado grueso se realizó según los lineamientos que indican las Normas (NTP 400.021, 2020; NTP 400.022, 2024).
- Contenido de humedad del agregado fino y grueso. El ensayo de contenido de humedad para el agregado fino y el agregado grueso se realizó según los lineamientos que establece la Norma (NTP 339.185, 2021).

b) Prueba piloto del diseño de mezclas

Con la finalidad de verificar y contrastar los valores obtenidos en el diseño de mezclas, se realizó un pre-test de especímenes de concreto y se sometió a ensayos de resistencia a la compresión. Los materiales que se necesitaron para llevar a cabo este pre-test fueron:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.



- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.
- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.

c) Obtención de porcentajes de aditivos impermeabilizantes

Para la obtención de los porcentajes de aditivos impermeabilizantes a emplear tanto para el humo de sílice y el silicato de sodio, esta investigación tomó referencia estudios realizados por parte de otros investigadores. Acorde con (García Kriete, 2018; Pachacutec Gutierrez & Vilca Salazar, 2018) en sus investigaciones determinaron el efecto de los efectos de la adición de micro sílice en 4%, 6%, 8% y 5%, 10%, 15% respectivamente. Por otra lado (Caiza Yungán, 2020) comparó las propiedades mecánicas del concreto al adicionar 4%, 8% y 12% de silicato de sodio y 1%, 3% y 5% de nano sílice como sustitutivos parciales del cemento.

Por lo cual considerando lo mencionado anteriormente, para esta investigación se utilizó 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00% y 12.50 % de humo de sílice y 0.50%, 1.00%, 2.00%, 3.50% y 5.00% de silicato de sodio.



d) Elaboración de especímenes

Los materiales utilizados para la elaboración de especímenes de concreto se detallan a continuación:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.
- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.
- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.
- Aditivo humo de sílice. Los porcentajes de aditivos que se usaron se detallaron el ítem c) Obtención de porcentajes de aditivos impermeabilizantes.
- Aditivo silicato de sodio. Los porcentajes de aditivos que se usaron se detallaron el ítem c) Obtención de porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

Se elaboraron 99 especímenes de concreto en moldes de 4” de diámetro y 8” de altura (9 especímenes para el concreto control, 9 especímenes por cada porcentaje de adición planteado anteriormente),

dichos especímenes se mantuvieron en los moldes alrededor de 24 horas. Posteriormente fueron desencofrados e introducidos a una poza de curado que cuenta el laboratorio hasta llegar el momento de realizar los ensayos de resistencia a la compresión, de las cuales 3 especímenes se ensayaron a la edad de 7 días, 14 días y 28 días respectivamente.

e) **Ensayo de asentamiento en concreto**

El ensayo y la obtención del asentamiento del concreto (Ver Figura 8) se realizó de acuerdo a los lineamientos que indica (NTP 339.035, 2015).

Figura 8

Ensayo de asentamiento en concreto fresco



Nota: Elaboración propia.

f) **Ensayo de resistencia a la compresión**

Los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes de concreto se realizaron a las edades de 7, 14 y 28 días de acuerdo a lo que indica los lineamientos de la norma (NTP 339.034, 2015), en el



laboratorio utilizando el equipo de compresión uniaxial de marca PINZUAR PC-42 de 1500 kN de capacidad.

Para realizar el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó la ecuación (2):

$$f'c = \frac{4 \times P}{\pi \times D^2} \quad (2)$$

Donde:

$f'c$: Resistencia a la compresión (kg/cm²)

P: Carga máxima aplicada en el espécimen (kg)

D: Diámetro del espécimen cilíndrico (cm)

Los datos recabados durante el ensayo fueron registrados en un formato de control, seguidamente se procesó los datos para la obtención de la resistencia a la compresión y determinar la diferencia que existen entre los 11 tipos de mezclas con diferentes porcentajes de los aditivos impermeabilizantes y finalmente poder discutir los resultados.

3.6.1.3. Instrumentos

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).

Para el presente objetivo específico se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:



- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio como granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso (Anexo 5: Resultados del diseño de mezclas), resistencia a la compresión (Anexo 7: Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes) y asentamiento del concreto en estado fresco (Anexo 6: Resultados del asentamiento del concreto), cuyos cálculos se detallan en los anexos mencionados.
- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.
- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA) y otros procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

3.6.1.4. Aplicación de prueba estadística.

Para identificar las diferencias que existen en la resistencia a compresión de cada espécimen con distintos porcentajes de adición de humo de sílice y silicato de sodio, en primera instancia se evaluó la normalidad de los datos obtenidos mediante la prueba de Shapiro Wilks



para verificar los supuestos de normalidad. En caso de cumplir el supuesto, se recurrió a utilizar pruebas paramétricas (ANOVA). Conforme a lo descrito anteriormente se procesó toda la información haciendo uso del Software SPSS (International Business Machines Corporation, 2020).

3.6.2. Segundo objetivo específico

3.6.2.1. Descripción de variables analizadas

Para identificar el porcentaje apropiado de aditivos impermeabilizantes que mejoren las propiedades del concreto se realizaron ensayos de laboratorio, así como la elaboración de especímenes de concreto. A continuación, se detalla las variables identificadas en el objetivo específico, siendo las siguientes:

- Porcentaje apropiado de aditivos impermeabilizantes (VI)
- Propiedades del concreto (VD)

3.6.2.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros

a) Elaboración de especímenes

Los materiales utilizados para la elaboración de especímenes de concreto se detallan a continuación:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.



- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.
- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.
- Aditivo humo de sílice. Los porcentajes de aditivos que se usaron se detallaron el ítem c) Obtención de porcentajes de aditivos impermeabilizantes.
- Aditivo silicato de sodio. Los porcentajes de aditivos que se usaron se detallaron el ítem c) Obtención de porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

Para el cumplimiento de este objetivo se elaboraron 99 especímenes de concreto en moldes de 4” de diámetro y 8” de altura (9 especímenes para el concreto control y 9 especímenes por cada porcentaje de adición planteado en el objetivo 1. Luego del vaciado en los moldes, estos se mantendrán alrededor de 24 horas, posteriormente fueron desencofrados e introducidos en la poza de curado del laboratorio de construcciones de la EPIC hasta que llegue el momento de realizar los ensayos de resistencia a la compresión, de los cuales se ensayaron 3 especímenes para cada una de las edades de 7 días, 14 días y 28 días respectivamente.



b) Ensayo de asentamiento en concreto

El ensayo y la obtención del asentamiento del concreto se realizó de acuerdo a los lineamientos que indica (NTP 339.035, 2015). Desarrollando 33 repeticiones del ensayo (3 repeticiones para el concreto control y 3 especímenes por cada porcentaje de adición planteado en el objetivo 1).

c) Ensayo de resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión de los especímenes de concreto se realizaron a las edades de 7, 14 y 28 días de acuerdo a lo que indica los lineamientos de la norma (NTP 339.034, 2015), en el laboratorio utilizando el equipo de compresión uniaxial de marca PINZUAR PC-42 de 1500 kN de capacidad.

Para realizar el cálculo de la resistencia a compresión se utilizó la ecuación (3):

$$f'c = \frac{4 \times P}{\pi \times D^2} \quad (3)$$

Donde:

f'c: Resistencia a la compresión (kg/cm²)

P: Carga máxima aplicada en el espécimen (kg)

D: Diámetro del espécimen cilíndrico (cm)

Los datos recabados durante el ensayo fueron registrados en un formato de control, seguidamente se procesó los datos para la obtención de la resistencia a la compresión y determinar la diferencia y los datos más resaltantes entre los 11 tipos de mezclas con diferentes porcentajes



de los aditivos impermeabilizantes y finalmente poder discutir los resultados.

3.6.2.3. Instrumentos

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).

Para el presente objetivo específico se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:

- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio como granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso (Anexo 5: Resultados del diseño de mezclas), resistencia a la compresión (Anexo 7: Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes) y asentamiento del concreto en estado fresco (Anexo 6: Resultados del asentamiento del concreto), cuyos cálculos se detallan en los anexos mencionados.
- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.



- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA), Test de Tukey y otros procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

3.6.2.4. Aplicación de prueba estadística

Para identificar las diferencias y los datos más resaltantes que existen en la resistencia a compresión de cada espécimen con distintos porcentajes de adición de humo de sílice y silicato de sodio, se utilizó el test de Tukey. Previo a este test se evaluó la normalidad de los datos obtenidos mediante la prueba de Shapiro Wilks para verificar los supuestos de normalidad. En caso de cumplir el supuesto, se recurrió a utilizar pruebas paramétricas (ANOVA). Conforme a lo descrito anteriormente se procesó toda la información haciendo uso del Software SPSS (International Business Machines Corporation, 2020).

3.6.3. Tercer objetivo específico

3.6.3.1. Descripción de variables analizadas

Para evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la profundidad de carbonatación del concreto fue necesaria la elaboración de especímenes de concreto y la realización del



ensayo de carbonatación en condiciones aceleradas. A continuación, se detalla las variables identificadas en el objetivo específico, siendo las siguientes:

- Incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes (VI)
- Profundidad de carbonatación del concreto (VD)

3.6.3.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros

a) Elaboración de especímenes

En primer lugar, fue necesario obtener la dosificación de los diseños de mezcla, con el porcentaje óptimo de aditivo, para lo cual se tomó en cuenta los resultados de nuestro segundo objetivo.

Los materiales utilizados para la elaboración de especímenes de concreto se detallan a continuación:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.
- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.



- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.
- Aditivo humo de sílice. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.
- Aditivo silicato de sodio. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.

Para el cumplimiento de este objetivo se elaboró 144 especímenes de concreto (48 para cada dosificación) entre los cuales se encuentran los concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio) y nuestro concreto control. El vaciado del concreto se realizó en moldes de dimensiones aproximadas de 4" de diámetro y 8" de altura. Luego del desencofrado, alrededor de 24 horas posterior al vaciado, los especímenes fueron curados durante 28 días como mínimo dentro de las pozas de curado del laboratorio de la EPIC.

b) Ensayo de carbonatación en condiciones aceleradas

Para abordar este ensayo se debe partir por indicar que se realizó con base a la norma española UNE-EN 12390-12 Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón (método de carbonatación acelerada). Siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma de referencia. Se realizó un acondicionamiento de los especímenes antes del ensayo acelerado.

- Después de retirar los especímenes de la poza de curado deben trasladarse a un ambiente en condiciones de laboratorio (18 °C

a 25 °C, 50% a 65% de humedad relativa), por un periodo de 14 días. Con ese fin se situaron las muestras dentro de un horno durante 4 días a una temperatura aproximada de 40 °C, luego se retiraron y envolvieron en papel film, de modo que la humedad pueda ser distribuido por toda la muestra, esto durante 3 días. Finalmente se retiraron las muestras del horno luego de 14 días de acondicionamiento.

Figura 9

Esquema de equipos utilizados para el ensayo de carbonatación acelerada



Nota: Elaboración propia.

- Para el proceso de carbonatación acelerada se introdujeron los especímenes en las cámaras de carbonatación acelerada como se muestra en la Figura 9, de modo que esta cumpla las condiciones de exposición establecidas en la Tabla 9.

Tabla 9

Condiciones para el ensayo de carbonatación acelerada

| Descripción | Concreto control | Humo de Sílice | Silicato de Sodio |
|----------------------|------------------|----------------|-------------------|
| Temperatura | 25 °C | 25 °C | 25 °C |
| Humedad relativa | 65 % | 65 % | 65 % |
| Presión de la cámara | 22 PSI | 22 PSI | 22 PSI |

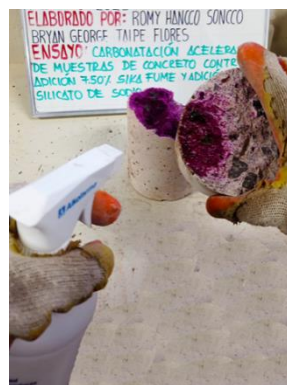
Nota: Elaboración propia.

c) Determinación de la profundidad de carbonatación

La profundidad de carbonatación de los especímenes se midió después de los siguientes periodos de exposición 2h, 3h, 7h, 14h, 40h y 120h. Para ello se secciono la muestra por la mitad, tras la rotura limpiamos la superficie fracturada de polvo y partículas sueltas; luego pulverizar con la solución indicadora Figura 10 (0.80 g de fenolftaleína en polvo disuelta en una solución de 70 ml de etanol y 30 ml de agua desionizada) que proporciona un cambio de coloración a magenta en el rango de pH 8 a pH 9.

Figura 10

Rociado de la muestra con solución de fenolftaleína



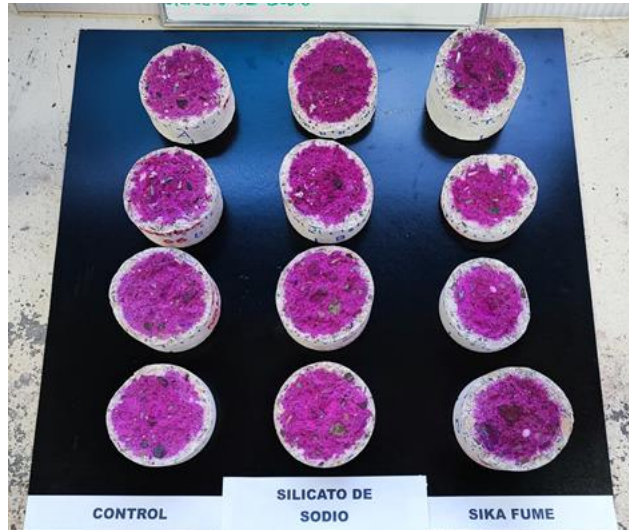
Nota: Elaboración propia.

Posteriormente se procedió a medir marcando ocho puntos equidistantes sobre la cara fracturada del espécimen Figura 10, luego

con ayuda del vernier se determinó la profundidad de carbonatación en cada punto de medición Figura 11.

Figura 11

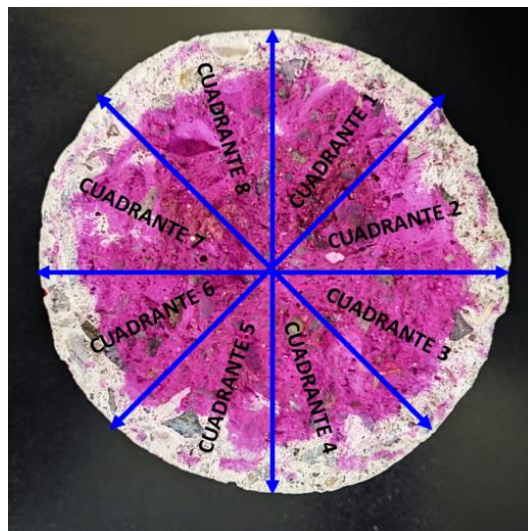
Muestras expuestas a carbonatación acelerada



Nota: Elaboración propia.

Figura 12

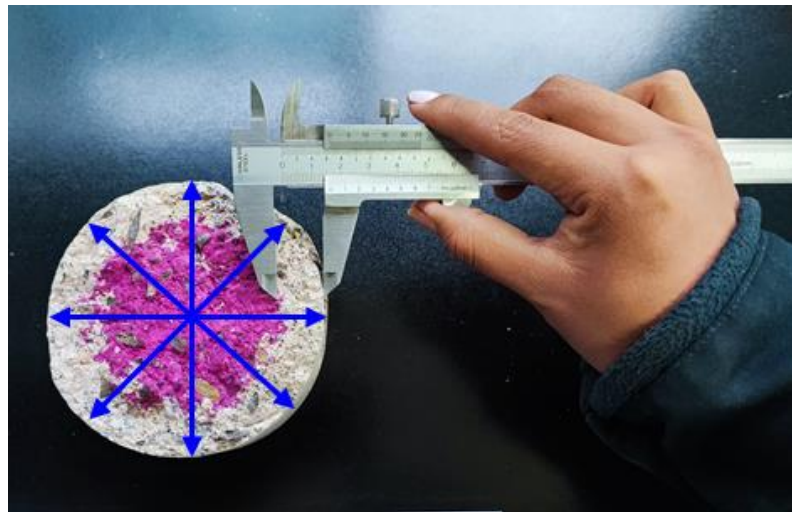
Marcado de cuadrantes para tomar lecturas de carbonatación



Nota: Elaboración propia.

Figura 13

Medición de la profundidad de carbonatación por cuadrantes

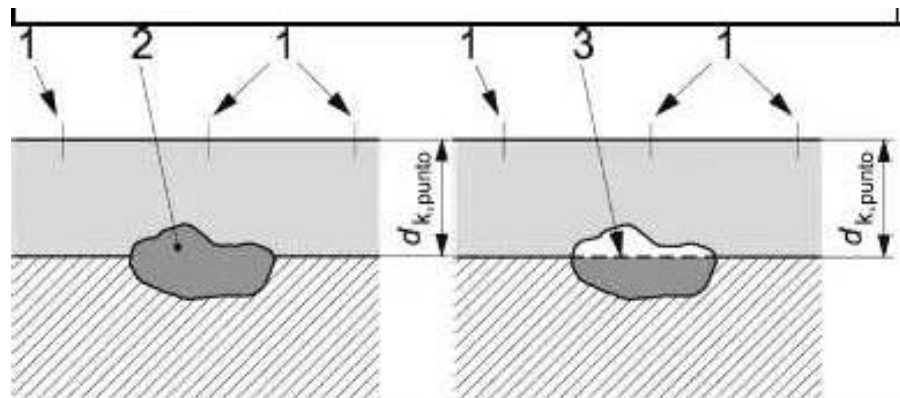


Nota: Elaboración propia.

Finalmente, los datos de las mediciones registradas de acuerdo a la Figura 14 y fueron registrados en un formato de control luego se procesó los datos y así se pudo determinar la diferencia de las profundidades de carbonatación de los concretos elaborados con 7.50% de humo de sílice, 0.50% silicato de sodio y nuestro concreto control y en consecuencia poder discutir los resultados.

Figura 14

Forma adecuada de medición de la carbonatación



Nota: Extraído de Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón Método de carbonatación acelerada, UNE-EN12390-12 (2020).



3.6.3.3. Instrumentos

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).

Para el presente objetivo específico se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:

- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio como granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso (Anexo 5: Resultados del diseño de mezclas), resistencia a la compresión (Anexo 7: Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes) y la carbonatación acelerada (Anexo 9: Resultados del ensayo de carbonatación acelerada), cuyos cálculos se detallan en los anexos mencionados.
- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.
- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA) y otros



procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

3.6.3.4. Aplicación de prueba estadística

Para identificar las diferencias que existen en las profundidades de carbonatación de cada espécimen entre los cuales se encuentran el concreto control y concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio), en primera instancia se evaluó la normalidad de los datos obtenidos mediante la prueba de Kolgomorov Smirnov para verificar los supuestos de normalidad. En caso de cumplir el supuesto, se recurrió a utilizar pruebas paramétricas (ANOVA). Conforme a lo descrito anteriormente se procesó toda la información haciendo uso del Software SPSS (International Business Machines Corporation, 2020).

3.6.4. Cuarto objetivo específico

3.6.4.1. Descripción de variables analizadas

Para evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la penetración del ion cloruro del concreto fue necesaria la elaboración de especímenes de concreto y la realización del ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruro. A continuación, se detalla las variables identificadas en el objetivo específico, siendo las siguientes:

- Incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes (VI)
- Resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto (VD)



3.6.4.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros

a) Elaboración de especímenes

En primer lugar, fue necesario obtener la dosificación de los diseños de mezcla, con el porcentaje óptimo de aditivo, para lo cual se tomó en cuenta los resultados de nuestro segundo objetivo.

Los materiales utilizados para la elaboración de especímenes de concreto se detallan a continuación:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.
- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.
- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.
- Aditivo humo de sílice. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.
- Aditivo silicato de sodio. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.



Para el cumplimiento de este objetivo se elaboró 21 especímenes de concreto (7 para cada dosificación) entre los cuales se encuentran los concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio) y nuestro concreto control. El vaciado del concreto se realizó en moldes de dimensiones aproximadas de 4” de diámetro y 8” de altura. Luego del desencofrado, alrededor de 24 horas posterior al vaciado, los especímenes fueron curados durante 28 días como mínimo dentro de las pozas de curado.

b) Ensayo de resistencia a la penetración de iones cloruro

Para abordar este ensayo se debe partir por indicar que se realizó con base a la Norma (ASTM C1202-22, 2022) Método de prueba estándar para Indicación eléctrica de la capacidad del hormigón para resistir la penetración de iones cloruro.

Siguiendo las recomendaciones establecidas en la norma de referencia. Se realizó un acondicionamiento de los especímenes antes del ensayo de ionización.

- Después de retirar los especímenes de la posa de curado deben trasladarse a un ambiente en condiciones de laboratorio para ser cortadas en rodajas de 50 mm de espesor y 100 mm de diámetro, secando la superficie al aire durante aproximadamente 1 hora, luego se procedió a recubrir la superficie lateral con SikaFillTecho-3, recubriendo todos los poros de la superficie lateral. Luego de impermeabilizada la superficie lateral se colocó las muestras con agua durante el

periodo de 3 horas como se muestra en la Figura 15, para evitar vacíos dentro de la muestra saturada.

Figura 15

Cámara de vacíos

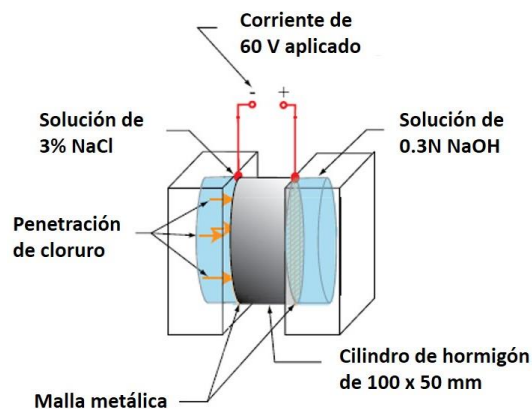


Nota: Elaboración propia.

- Luego se retiraron y colocaron en las celdas de voltaje, sellando bien los bordes para evitar filtraciones. Posterior a ello se colocaron las soluciones de 3.00% de NaCl (terminal negativo) y NaOH 0.30 N (terminal positivo), tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Esquema de celdas de voltaje para el ensayo de ion cloruro



Nota: Extraído de Revisión de los métodos de prueba para evaluar la durabilidad del hormigón, Aire (2022).

- Para iniciar la prueba se encendió la fuente de alimentación como se muestra en la Figura 17 y se procedió a realizar lecturas de corriente con un voltímetro en combinación con una resistencia en derivación cada 30 minutos, durante 6 horas, manteniendo una corriente continua de 60 Voltios.

Figura 17

Esquema del ensayo de ion cloruro



Nota: Elaboración propia.

c) **Determinación de la carga transferida**

Para determinar la carga total transferida se trazó la corriente (amperios) vs tiempo (segundos). Seguidamente se dibujó la curva con los datos (voltaje y tiempo) y se integró el área debajo, para obtener coulomb, de la carga pasada durante el periodo de 6h.

Figura 18

Medición de corriente en las celdas de voltaje



Nota: Medición de carga con pinza amperimétrica.

Los datos durante el ensayo, fueron recabados como se aprecia en la Figura 18, y también fueron registrados en un formato de control, seguidamente se procesó los datos para la obtención de la profundidad de penetración del ion cloruro del concreto y determinar la diferencia que existen entre los 3 tipos de mezclas de concreto elaborados con 7.50% de humo de sílice, 0.50% silicato de sodio y nuestro concreto control y finalmente poder discutir los resultados.

3.6.4.3. Instrumentos

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).



Para el presente objetivo específico se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:

- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio como granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso (Anexo 5: Resultados del diseño de mezclas) y penetración ion cloruro (Anexo 10: Resultados del ensayo de penetración de ion cloruro), cuyos cálculos se detallan en los anexos mencionados.
- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.
- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA) y otros procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

3.6.4.4. Aplicación de prueba estadística

Para identificar las diferencias que existen en la penetración del ion cloruro de cada espécimen entre los cuales se encuentran el concreto control y concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio), en primera instancia se evaluó la normalidad de los datos obtenidos mediante la prueba de Shapiro Wilks



para verificar los supuestos de normalidad. En caso de cumplir el supuesto, se recurrió a utilizar pruebas paramétricas (ANOVA). Conforme a lo descrito anteriormente se procesó toda la información haciendo uso del Software SPSS (International Business Machines Corporation, 2020).

3.6.5. Quinto objetivo específico

3.6.5.1. Descripción de variables analizadas

Para evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos fue necesario la elaboración de especímenes de concreto y la realización del ensayo de exposición a una solución de sulfato. A continuación, se detalla las variables identificadas en el objetivo específico, siendo las siguientes:

- Incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes (VI)
- Variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos (VD)

3.6.5.2. Materiales, equipos, insumos, entre otros

a) Elaboración de especímenes

Previo a la elaboración de especímenes, fue necesario obtener la dosificación de los diseños de mezcla, con el porcentaje óptimo de aditivo, para lo cual se tomó en cuenta los resultados de nuestro segundo objetivo.



Los materiales utilizados para la elaboración de especímenes de concreto se detallan a continuación:

- Cemento. El cemento que se utilizó es cemento Portland tipo IP de la marca Yura.
- Agregado fino. El agregado fino fue debidamente seleccionado como el material pasante la malla N° 4 de la cantera Cabanillas.
- Agregado grueso. El agregado grueso fue debidamente seleccionado como el material retenido la malla N° 4 y pasante la N° 1” de la cantera Cabanillas.
- Agua. El agua que se obtuvo fue de las instalaciones del laboratorio.
- Aditivo plastificante. El aditivo plastificante que se utilizó fue el SikaCem Plastificante de la marca Sika.
- Aditivo humo de sílice. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.
- Aditivo silicato de sodio. El porcentaje de aditivo OPTIMO se tomó de los resultados del segundo objetivo.

Para el cumplimiento de este objetivo se elaboró 18 especímenes de concreto (6 para cada dosificación) entre los cuales se encuentran los concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio) y nuestro concreto control. El vaciado del concreto se realizó en moldes de dimensiones aproximadas de 4” de diámetro y 8” de altura. Luego del desencofrado,



alrededor de 24 horas posterior al vaciado, los especímenes fueron curados durante 28 días como mínimo dentro de las pozas de curado del laboratorio de la EPIC.

b) Ensayo de exposición a una solución de sulfato

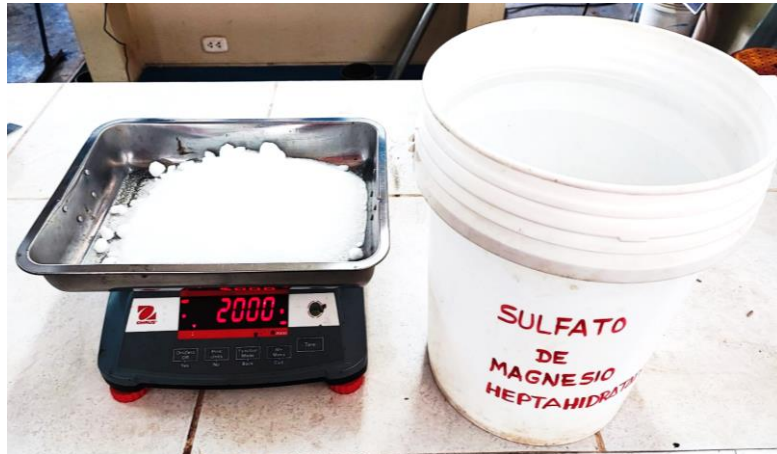
El ensayo de exposición a una solución de sulfato se tomó como guía los lineamientos de la Norma (ASTM C1012-18b, 2018) Método de prueba estándar para el cambio de longitud de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfato, debido que en dicha Norma se presente evaluar la resistencia de sulfatos de morteros elaborados con cemento portland, mezclas de cemento portland con puzolanas o escorias y cementos hidráulicos mezclados.

- Una vez transcurrido los días de curado de los especímenes de concreto, se retiró y se trasladó a otro ambiente del laboratorio para tener las condiciones adecuadas y realizar el ensayo. Se secaron las superficies cuidadosamente para retirar los restos e impurezas que pudo adherirse en la posa de curado.
- Previamente se preparó la solución de exposición estándar que indica en la Norma como se muestra en la Figura 19, en este caso se utilizó sulfato de magnesio heptahidratado o también conocida como sal de Epsom con una concentración de 246.48 moles de $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ por m^3 . Este compuesto se disolvió en agua desionizada, por lo que cada litro de agua desionizada contendrá 50 g de sulfato de magnesio heptahidratado. Ya que en la Norma indica que se debe preparar la solución 1 día antes

de usarla, debiendo cubrir y almacenar hasta el día siguiente para que haya una mejor disolución.

Figura 19

Preparación de la solución sulfato de magnesio heptahidratado



Nota: Elaboración propia.

- Seguidamente se prepararon los recipientes con la solución de sulfato de magnesio heptahidratado previamente disuelto, para introducir 18 especímenes de concreto. El cambio de solución se realizó a los 7 días, 14 días, 21 días, 34 días, 40 días y 53 días. La temperatura de almacenaje y de prueba fue a 15 °C aproximadamente.
- c) **Determinación de la composición química del concreto expuesto a sulfato**

La determinación de la composición química de los especímenes expuestos a sulfatos se realizó después de los 53 días de exposición. Para ello se retiró los especímenes de la solución, A continuación, se agrieto los 18 especímenes con la finalidad de obtener partículas representativas sueltas y se dejaron secar a temperatura

ambiente por 4 días para ser trituradas y pulverizadas para la realización del ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX) realizado en el Laboratorio de Yacimientos Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica como se indica en la figura Figura 20. Conforme al ensayo de FRX se ensayó de igual forma los 18 especímenes restantes que no estuvieron expuesto con la finalidad de determinar la diferencia de la composición química de los especímenes expuestos a solución de sulfato de magnesio heptahidratado (con exposición y sin exposición). Finalmente se procesó los datos del ensayo FRX, así se pudo determinar la variación de composición química de los concretos elaborados con 7.50% de humo de sílice, 0.50% silicato de sodio y nuestro concreto control que fueron expuestos a una solución de sulfato. Particularmente se evaluó el elemento químico calcio (Ca) que es el elemento principal de la etringita, que este es el componente principal de la reacción de la exposición a sulfatos.

Figura 20

Equipo para realizar el ensayo de Fluorescencia de Rayos X



Nota: Elaboración propia.



Los datos recabados durante el ensayo fueron registrados en un formato de control, seguidamente se procesó los datos para la obtención de la variación de composición química del concreto y determinar la diferencia que existen entre los 3 tipos de mezclas de concreto elaborados con 7.50% de humo de sílice, 0.50% silicato de sodio y nuestro concreto control y finalmente poder discutir los resultados.

3.6.5.3. Instrumentos

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).

Para el presente objetivo específico se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:

- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio como granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso (Anexo 5: Resultados del diseño de mezclas), resistencia a la compresión (Anexo 7: Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes) y composición química (Anexo 3: Certificado



de ensayos de Laboratorio de Yacimientos Minerales de la EPIG), cuyos cálculos se detallan en los anexos mencionados.

- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.
- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, prueba T de Student y otros procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

3.6.5.4. Aplicación de prueba estadística

Para identificar las diferencias que existen en la variación de composición química de cada espécimen expuesto a sulfato, entre los cuales se encuentran el concreto control y concretos con porcentajes óptimos de aditivos (7.50% de humo de sílice y 0.50% silicato de sodio), en primera instancia se evaluó la normalidad de los datos obtenidos mediante la prueba de Shapiro Wilk para verificar los supuestos de normalidad. En caso de cumplir el supuesto, se recurrió a utilizar pruebas paramétricas (T de Student para muestras relacionadas). Conforme a lo descrito anteriormente se procesó toda la información haciendo uso del Software SPSS (International Business Machines Corporation, 2020)



3.7. INSTRUMENTOS

Son las herramientas, recursos, dispositivos o formatos mediante el cual permite recabar datos e información crucial para su análisis y el alcance de los objetivos planteados en la investigación. Estas pueden adoptar diferentes formas de acuerdo a la intencionalidad prevista (Ñaupas Paitán et al., 2018).

Para la presente investigación se utilizaron los siguientes instrumentos para recabar datos e información:

- Fichas de recolección de datos de ensayos en laboratorio (granulometría, peso unitario suelto y compactado del agregado fino y grueso, peso específico del agregado fino y grueso, absorción del agregado fino y grueso, contenido de humedad del agregado fino y grueso, resistencia a la compresión y asentamiento del concreto en estado fresco).
- Software de procesamiento de datos (Excel), para organizar, procesar y analizar los datos recolectados.
- Software de procesamiento de datos (Word), para redactar e interpretar la información recolectada.
- Software de procesamiento estadístico (SPSS), para realizar pruebas de hipótesis, análisis de varianza (ANOVA) y otros procedimientos estadísticos inferenciales que permitan identificar diferencias significativas entre los especímenes con diferentes porcentajes de aditivos impermeabilizantes.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1.1. Resultados de prueba piloto

Para la prueba piloto se elaboró 9 especímenes de concreto en moldes de 4" de diámetro y 8" de altura, según lo indicado en el ítem 3.6.1., dichos especímenes se mantuvieron en los moldes alrededor de 24 horas. Posteriormente fueron introducidas a una posa de curado que cuenta el laboratorio hasta llegar el momento de realizar los ensayos de resistencia a la compresión, de las cuales tres especímenes se ensayaron a la edad de 7 días, 14 días y 28 días respectivamente, los resultados obtenidos se exponen a detalle en la Tabla 10.

Tabla 10

Resultados de resistencia a la compresión de la prueba piloto

| Nro. | Descripción | Fecha de Moldeo | Edad | Diámetro Prom. (cm) | Área (cm ²) | Lectura del Dial (kg) | Resistencia (kg/cm ²) | % de Resistencia |
|------|------------------------|-----------------|-------|---------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------------------|------------------|
| 1 | R1+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 7.00 | 10.16 | 81.03 | 15,815.80 | 195.18 | 69.71 |
| 2 | R2+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 7.00 | 10.15 | 80.83 | 15,782.15 | 195.25 | 69.73 |
| 3 | R3+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 7.00 | 10.13 | 80.56 | 15,918.79 | 197.60 | 70.57 |
| 4 | R4+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 14.00 | 10.15 | 80.87 | 19,708.06 | 243.70 | 87.04 |
| 5 | R5+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 14.00 | 10.16 | 81.11 | 19,591.81 | 241.55 | 86.27 |
| 6 | R6+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 14.00 | 10.17 | 81.15 | 19,558.16 | 241.01 | 86.08 |
| 7 | R7+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 28.00 | 10.10 | 80.12 | 22,826.35 | 284.90 | 101.75 |
| 8 | R8+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 28.00 | 10.14 | 80.67 | 22,904.87 | 283.93 | 101.40 |
| 9 | R9+0.90% plastificante | 18/09/2023 | 28.00 | 10.15 | 80.87 | 22,994.60 | 284.34 | 101.55 |

Nota: Elaboración propia.



De acuerdo a los resultados hallados en la prueba piloto, el diseño de mezclas con 0.90% de SikaCem plastificante cumple con la resistencia y consistencia requerida, por lo cual para la presente investigación se optó por emplear dichas proporciones para elaborar el concreto control para los demás ensayos.

4.1.2. Resultados de asentamiento del concreto

Este ensayo se realizó con el fin de evaluar el asentamiento del concreto en estado fresco, trabajando con un total de 33 repeticiones de asentamiento, tres repeticiones por el concreto control, así como por cada adición de humo de sílice en 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00%, 12.50% y de igual manera por cada adición de silicato de sodio 0.50%, 1.00%, 2.00%, 3.50% y 5.00%. A continuación, se presenta la Tabla 11 para mostrar los resultados que detalla la medida del asentamiento promedio y estado de la consistencia del concreto para los diferentes tipos muestra:

Tabla 11

Comparación del asentamiento del concreto con la adición de aditivos

| Descripción | Asentamiento promedio (mm) | Consistencia | Variación porcentual |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------|
| Muestra - Control | 175.20 | Fluido | - |
| Muestra - Humo de Sílice 2.50% | 171.53 | Fluido | -2.09% |
| Muestra - Humo de Sílice 5.00% | 111.63 | Plástica | -36.28% |
| Muestra - Humo de Sílice 7.50% | 78.70 | Plástica | -55.08% |
| Muestra - Humo de Sílice 10.00% | 58.47 | Seca | -66.63% |
| Muestra - Humo de Sílice 12.50% | 48.23 | Seca | -72.47% |
| Muestra - Silicato de Sodio 0.50% | 165.17 | Fluido | -5.73% |
| Muestra - Silicato de Sodio 1.00% | 114.37 | Plástica | -34.72% |
| Muestra - Silicato de Sodio 2.00% | 50.77 | Seca | -71.02% |
| Muestra - Silicato de Sodio 3.50% | 19.13 | Seca | -89.08% |
| Muestra - Silicato de Sodio 5.00% | 2.27 | Seca | -98.71% |

Nota: La variación porcentual para cada muestra se da en función del asentamiento promedio de la muestra control.

4.1.3. Resultados de densidad, absorción y porcentaje de poros permeables

Este ensayo sobre densidad, absorción y porcentaje de poros permeables se hizo con la finalidad de obtener el volumen de espacio de poros permeables en el concreto. Este ensayo fue desarrollado según los lineamientos que establece la Norma (ASTM C642, 2021) ; trabajando con un total de nueve especímenes, tres por cada adición, incluyendo también los de la muestra control. En la Tabla 12 se detallan los resultados:

Tabla 12

Comparación del volumen de espacio de poros permeables

| Descripción | Volumen promedio de espacio de poros permeables (%) | Variación porcentual |
|-----------------------------------|---|----------------------|
| Muestra - Control | 17.00 | - |
| Muestra - Humo de Sílice 7.50% | 18.68 | 9.88% |
| Muestra - Silicato de Sodio 0.50% | 18.08 | 6.35% |

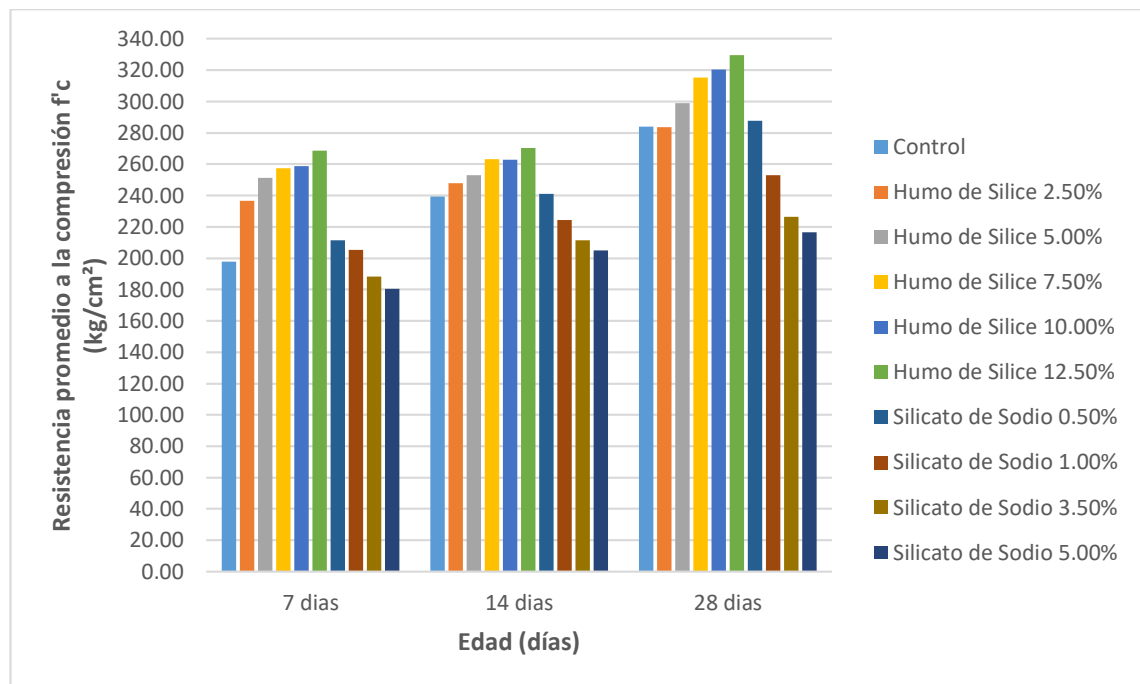
Nota: La variación porcentual para cada muestra se da en función del volumen promedio de espacio de poros permeables de la muestra control.

4.1.4. Resultados de resistencia a la compresión de especímenes de concreto

El ensayo de resistencia a la compresión de especímenes de concreto se realizó para cada porcentaje de adición de aditivo impermeabilizantes (humo de sílice y silicato de sodio), así como también para el concreto control. Estas pruebas se realizaron en 99 especímenes de concreto, tres por cada edad y porcentaje de adición; por lo que, los especímenes se ensayaron a las edades de 7 días, 14 días y 28 días respectivamente. En la Figura 21 se muestra los hallazgos de resistencia promedio de compresión.

Figura 21

Comparación de resistencias a la compresión del concreto



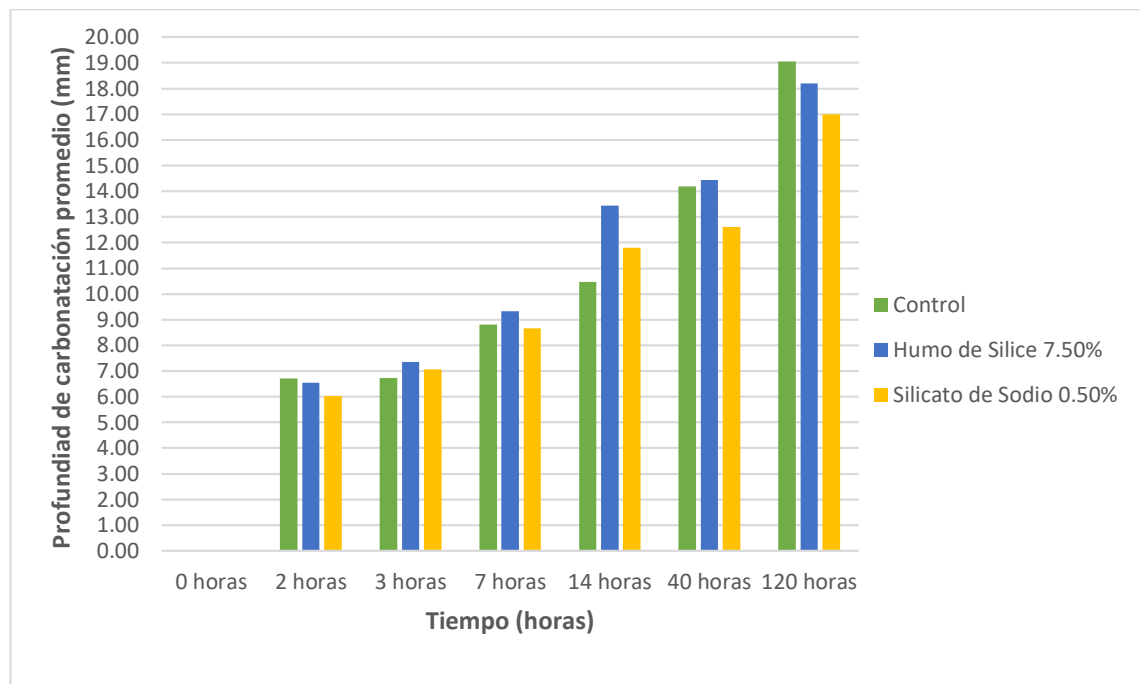
Nota: Para la edad de 28 días en comparación al concreto control, la adición de Humo de sílice en concentraciones de 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00% y 12.50% representa 99.94%, 105.27%, 111.00%, 112.89% y 116.07% respectivamente. Con la adición de Silicato de Sodio 0.50%, 1.00%, 2.00%, 3.50% y 5.00%, se obtiene el 101.38%, 89.06%, 79.29%, 79.74% y 76.26% respectivamente.

4.1.5. Resultados de ensayo de carbonatación acelerada

El ensayo de carbonatación acelerada de especímenes de concreto (control y porcentaje adecuado de aditivos impermeabilizantes), se realizó para diferentes periodos de tiempo de 0h, 2h, 3h, 7h, 14h, 40h y 120h respectivamente. Estas pruebas se realizaron en 144 especímenes de concreto, ocho por cada una de las seis edades y cada porcentaje de adicción. A continuación en la Figura 22 se muestra el extracto de los resultados de carbonatación para el concreto control, para la adición de humo de sílice 7.50% y para la adición de silicato de sodio de 0.50%.

Figura 22

Comparación de profundidad de carbonatación por periodos



Nota: Para el periodo de 120 horas en comparación al concreto control, la adición de humo de sílice 7.50% representa 95.57% y con la adición de silicato de sodio 0.50% representa 89.24%.

Así mismo, en la Tabla 13 se presentan las resistencias promedio obtenidas de los especímenes de concreto después haber sido expuestos a carbonatación acelerada, tanto para el concreto control, como para la adición de humo de sílice 7.50% y la adición de silicato de sodio de 0.50%.

Tabla 13

Comparación de resistencia a la compresión

| Descripción | Resistencia a la compresión promedio post carbonatación (kg/cm ²) | Variación porcentual |
|-----------------------------------|---|----------------------|
| Muestra - Control | 306.69 | - |
| Muestra - Humo de Sílice 7.50% | 321.81 | 4.93% |
| Muestra - Silicato de Sodio 0.50% | 295.98 | -3.49% |

Nota: La variación porcentual para cada muestra se da en función de la resistencia a la compresión promedio de la muestra control.

4.1.6. Resultados de resistencia del concreto a la penetración del ion cloruro

El ensayo de penetración de ion cloruro se realizó para el concreto control, para la adición de humo de sílice 7.50% y para la adición de silicato de sodio de 0.50%. Estas pruebas se realizaron en 21 especímenes de concreto, siete por cada porcentaje de adicción. A continuación en la Tabla 14 se muestra el promedio de carga (Coulombs) y en base a eso la penetrabilidad de ion cloruro que indica la Norma (ASTM C1202-22, 2022).

Tabla 14

Comparación de carga y penetrabilidad del ion cloruro

| Descripción | Carga pasada promedio en Coulombs | Penetrabilidad de Ion Cloruro | Variación porcentual |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------|
| Muestra - Control | 4,624.91 | Alta | - |
| Muestra - Humo de Sílice 7.50% | 3,511.26 | Moderada | 75.92% |
| Muestra - Silicato de Sodio 0.50% | 9,189.00 | Alta | 198.68% |

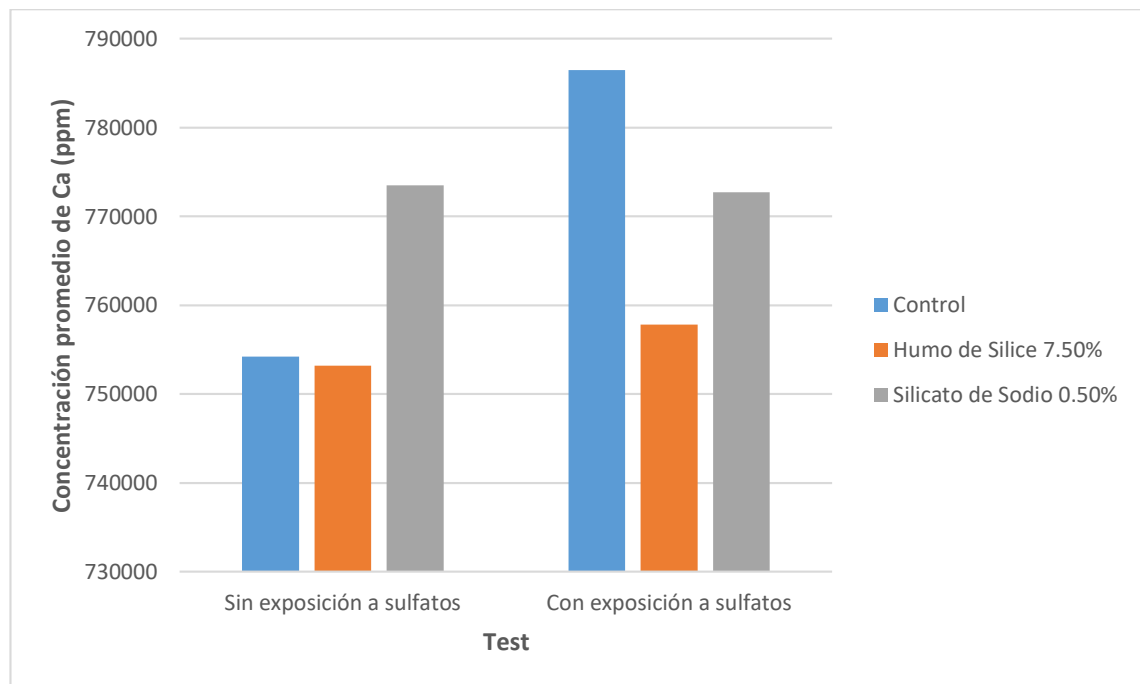
Nota: La variación porcentual para cada muestra se da en función a la carga en Coulombs promedio de la muestra control.

4.1.7. Resultados de composición química del concreto expuesto a sulfatos

El ensayo de exposición a solución de sulfatos (sulfato de magnesio heptahidratado) se realizó para el concreto control, para la adición de humo de sílice 7.50% y para la adición de silicato de sodio de 0.50%. Estas pruebas se realizaron en 18 especímenes de concreto, 6 por cada porcentaje de adicción. En la Figura 23 se muestra los promedios de composición química de calcio de las muestras antes de la exposición y después de la exposición.

Figura 23

Comparación de la composición química del concreto



Nota: Para los especímenes con y sin exposición a sulfatos en caso del concreto control hubo una variación de 4.68%, en caso de la adición de humo de sílice hubo una variación de 0.61% y en caso de la adición de silicato de sodio hubo una variación de -0.10%.

Así mismo, en la Tabla 15 se muestra la resistencia promedio obtenida de los especímenes de concreto después haber sido expuestos a una solución de sulfato (sulfato de magnesio heptahidratado) tanto para el concreto control, como para la adición de humo de sílice 7.50% y la adición de silicato de sodio de 0.50%.

Tabla 15

Comparación de resistencias a la compresión post exposición a sulfatos

| Descripción | Resistencia a la compresión promedio post sulfatos (kg/cm ²) | Variación porcentual |
|-----------------------------------|--|----------------------|
| Muestra - Control | 305.61 | - |
| Muestra - Humo de sílice 7.50% | 321.34 | 5.15% |
| Muestra - Silicato de sodio 0.50% | 268.93 | 12.00% |

Nota: La variación porcentual para cada muestra se da en función de la resistencia a la compresión promedio de la muestra control.

4.2. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

4.2.1. Primer objetivo específico

Para realizar el análisis estadístico de la primera hipótesis específica planteada en el Capítulo I, ítem 1.3.2 (H.E. 1) y en base al número de datos se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, por ser la más adecuada para muestras igual o inferiores a 50 como indica (Romero Saldaña, 2016). Los resultados de la prueba de normalidad se exponen mediante la Tabla 16.

Para la prueba de normalidad se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Los datos de resistencia a la compresión y asentamiento en concreto fresco, provienen de una distribución normal.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Los datos de resistencia a la compresión y asentamiento en concreto fresco, no provienen de una distribución normal.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₀**).

Tabla 16*Prueba de normalidad de datos*

| Grupos | Shapiro-Wilk | | | |
|---------------------------------|-------------------------------|-------|----------------|-------|
| | Estadístico | g.l. | Sig. (p-valor) | |
| Resistencia a la compresión | Grupo control 0.00% | 0.860 | 3 | 0.267 |
| | Grupo humo de sílice 2.50% | 0.915 | 3 | 0.435 |
| | Grupo humo de sílice 5.00% | 0.980 | 3 | 0.732 |
| | Grupo humo de sílice 7.50% | 0.869 | 3 | 0.292 |
| | Grupo humo de sílice 10.00% | 0.997 | 3 | 0.903 |
| | Grupo humo de sílice 12.50% | 0.956 | 3 | 0.597 |
| | Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.893 | 3 | 0.363 |
| | Grupo silicato de sodio 1.00% | 0.966 | 3 | 0.648 |
| | Grupo silicato de sodio 2.00% | 0.846 | 3 | 0.230 |
| | Grupo silicato de sodio 3.50% | 0.995 | 3 | 0.871 |
| | Grupo silicato de sodio 5.00% | 0.947 | 3 | 0.556 |
| Asentamiento en concreto fresco | Grupo control 0.00% | 0.983 | 3 | 0.747 |
| | Grupo humo de sílice 2.50% | 0.964 | 3 | 0.637 |
| | Grupo humo de sílice 5.00% | 0.980 | 3 | 0.726 |
| | Grupo humo de sílice 7.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| | Grupo humo de sílice 10.00% | 0.993 | 3 | 0.843 |
| | Grupo humo de sílice 12.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| | Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.996 | 3 | 0.878 |
| | Grupo silicato de sodio 1.00% | 0.981 | 3 | 0.739 |
| | Grupo silicato de sodio 2.00% | 0.964 | 3 | 0.637 |
| | Grupo silicato de sodio 3.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| | Grupo silicato de sodio 5.00% | 0.987 | 3 | 0.780 |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel significancia del 0.05, para la resistencia a la compresión, por cada grupo se tiene los valores del p-valor superiores a 0.05; así como para el asentamiento en concreto fresco, por cada grupo se tiene los valores de p-valor superiores a 0.05; todo esto se detalla en la Tabla 16, por lo que se confirma que los datos de la variable resistencia a la compresión y de la variable asentamiento en concreto fresco provienen de una distribución normal.

De acuerdo con los resultados mencionados en el párrafo anterior y conociendo que tienen una distribución normal, para el contraste de hipótesis se



utilizará la prueba paramétrica ANOVA, la cual nos permite determinar las diferencias significativas entre las medias de los grupos (Gómez Gómez et al., 2013), en otras palabras, si son mayores o menores que el valor hipotético.

Para la prueba paramétrica ANOVA se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Al menos una de las medias es diferente.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₀**).

Por lo cual se interpreta la Hipótesis nula y la Hipótesis alterna del siguiente modo:

- Hipótesis nula (**H₀**): La incorporación de aditivos impermeabilizantes no influye significativamente las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- Hipótesis alterna (**H₁**): La incorporación de aditivos impermeabilizantes influye significativamente las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

Luego de haber realizado la prueba estadística se llegaron a obtener los siguientes resultados que se exponen en la Tabla 17:

Tabla 17

Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión y asentamiento

| Grupos | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. (p-valor) |
|---------------------------------|------------------|-------------------|----|------------------|------------|----------------|
| Resistencia a la compresión | Entre grupos | 48,894.488 | 10 | 4,889.449 | 1,142.722 | 0.000 |
| | Dentro de grupos | 94.133 | 22 | 4.279 | | |
| | Total | 48,988.621 | 32 | | | |
| Asentamiento en concreto fresco | Entre grupos | 113,222.230 | 10 | 11,322.223 | 44,639.589 | 0.000 |
| | Dentro de grupos | 5.580 | 22 | 0.254 | | |
| | Total | 113,227.810 | 32 | | | |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la resistencia a la compresión se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo inferior que el valor de significancia; así como para el asentamiento en concreto fresco se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo menor que el valor de significancia; todo esto detallado en la Tabla 17 y existiendo evidencia suficiente, se toma la decisión de rechazar la Hipótesis nula **H₀** y aceptar la Hipótesis alterna **H₁** para afirmar que “*La incorporación de aditivos impermeabilizantes mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas del concreto*”, debido a que existe diferencias significativas entre los grupos de Control 0.00%, adición de humo de sílice 7.50% y adición de silicato de sodio 0.50% en la resistencia a la compresión y en el asentamiento en concreto fresco.

4.2.2. Segundo objetivo específico

Para realizar el análisis estadístico de la primera hipótesis específica planteada en el Capítulo I, ítem 1.3.2 (H.E. 2) y en base al número de datos se

verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilks, por ser la más adecuada para muestras igual o inferiores a 50 como indica (Romero Saldaña, 2016). Los resultados de la prueba de normalidad se exponen mediante la Tabla 18.

Para la prueba de normalidad se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Los datos de resistencia a la compresión y asentamiento en concreto fresco, provienen de una distribución normal.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Los datos de resistencia a la compresión y asentamiento en concreto fresco, no provienen de una distribución normal.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₀**).

Tabla 18

Prueba de normalidad de datos

| Grupos | Shapiro-Wilks | | |
|-----------------------------|---------------|------|----------------|
| | Estadístico | g.l. | Sig. (p-valor) |
| Grupo control 0.00% | 0.860 | 3 | 0.267 |
| Grupo humo de sílice 2.50% | 0.915 | 3 | 0.435 |
| Grupo humo de sílice 5.00% | 0.980 | 3 | 0.732 |
| Grupo humo de sílice 7.50% | 0.869 | 3 | 0.292 |
| Grupo humo de sílice 10.00% | 0.997 | 3 | 0.903 |



| Grupos | Shapiro-Wilks | | |
|--|---------------|------|----------------|
| | Estadístico | g.l. | Sig. (p-valor) |
| Grupo humo de sílice 12.50% | 0.956 | 3 | 0.597 |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.893 | 3 | 0.363 |
| Grupo silicato de sodio 1.00% | 0.966 | 3 | 0.648 |
| Grupo silicato de sodio 2.00% | 0.846 | 3 | 0.230 |
| Grupo silicato de sodio 3.50% | 0.995 | 3 | 0.871 |
| Grupo silicato de sodio 5.00% | 0.947 | 3 | 0.556 |
| Grupo control 0.00% | 0.983 | 3 | 0.747 |
| Grupo humo de sílice 2.50% | 0.964 | 3 | 0.637 |
| Grupo humo de sílice 5.00% | 0.980 | 3 | 0.726 |
| Grupo humo de sílice 7.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| Grupo humo de sílice 10.00% | 0.993 | 3 | 0.843 |
| Asentamiento en concreto fresco Grupo humo de sílice 12.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.996 | 3 | 0.878 |
| Grupo silicato de sodio 1.00% | 0.981 | 3 | 0.739 |
| Grupo silicato de sodio 2.00% | 0.964 | 3 | 0.637 |
| Grupo silicato de sodio 3.50% | 0.987 | 3 | 0.780 |
| Grupo silicato de sodio 5.00% | 0.987 | 3 | 0.780 |

Nota: Elaboración propia.

Con una nivel significancia del 0.05, para la resistencia a la compresión, por cada grupo se tiene los valores de p-valor superiores a 0.05; así como para el asentamiento en concreto fresco, por cada grupo se tiene los valores de p-valor superiores a 0.05; todo esto se detalla en la Tabla 18, por lo que se confirma que los datos de la variable resistencia a la compresión y de la variable asentamiento en concreto fresco provienen de una distribución normal.

De acuerdo con los resultados mencionados en el párrafo anterior y conociendo que tienen una distribución normal, para el contraste de hipótesis se utilizará la prueba paramétrica ANOVA, la cual nos permite determinar las diferencias significativas entre los grupos (Gómez Gómez et al., 2013), en otras palabras, si son mayores o menores que el valor hipotético.

Para la prueba paramétrica ANOVA se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Al menos una de las medias es diferente.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₀**).

Por lo cual se interpreta la Hipótesis nula y la Hipótesis alterna del siguiente modo:

- Hipótesis nula (**H₀**): El porcentaje apropiado de aditivos impermeabilizantes no influyen considerablemente en las propiedades del concreto.
- Hipótesis alterna (**H₁**): El porcentaje apropiado de aditivos impermeabilizantes influyen considerablemente en las propiedades del concreto.

Luego de haber realizado la prueba estadística se llegaron a obtener los siguientes resultados que se exponen en la Tabla 19:

Tabla 19

Prueba ANOVA para la resistencia a la compresión y asentamiento

| Grupos | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. (p-valor) |
|--------------|-------------------|----|------------------|-----------|----------------|
| Entre grupos | 48,894.488 | 10 | 4,889.449 | 1,142.722 | 0.000 |



| Grupos | | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. (p-valor) |
|---------------------------------|------------------|-------------------|----|------------------|------------|----------------|
| Resistencia a la compresión | Dentro de grupos | 94.133 | 22 | 4.279 | | |
| | Total | 48,988.621 | 32 | | | |
| Asentamiento en concreto fresco | Entre grupos | 113,222.230 | 10 | 11,322.223 | 44,639.589 | 0.000 |
| | Dentro de grupos | 5.580 | 22 | 0.254 | | |
| | Total | 113,227.810 | 32 | | | |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la resistencia a la compresión se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo inferior que el valor de significancia; así como para el asentamiento en concreto fresco se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo menor que el valor de significancia; todo esto detallado en la Tabla 19 y existiendo evidencia suficiente, se toma la decisión de rechazar la Hipótesis nula **H₀** y aceptar la Hipótesis alterna **H₁** para afirmar que “*La incorporación de aditivos impermeabilizantes mejora significativamente las propiedades físicas y mecánicas del concreto*”, debido a que existe diferencias significativas entre los grupos de Control 0.00%, adición de humo de sílice 7.50% y adición de silicato de sodio 0.50% en la resistencia a la compresión y en el asentamiento en concreto fresco.

Conforme a los resultados obtenidos anteriormente, se procede a realizar la prueba paramétrica test de Tukey (Post Hoc), la cual nos permite realizar comparaciones múltiples (por parejas) entre los grupos de las variables y también permitirá identificar cuáles porcentajes específicos de aditivos impermeabilizantes (humo de sílice y silicato de sodio) presentan diferencias significativas en las propiedades del concreto (resistencia a la compresión y asentamiento en concreto fresco).

Luego de haber realizado la prueba se llegaron a obtener los siguientes resultados para resistencia a la compresión que se muestran a continuación:

Tabla 20

Prueba paramétrica Tukey - Post Hoc para comparación en pares

| | | Resistencia a la Compresión | | | | | | |
|-------------------------------|----|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grupos | N° | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Grupo silicato de sodio 5.00% | 3 | 216.56 | | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 2.00% | 3 | | 225.14 | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 3.50% | 3 | | 226.43 | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 1.00% | 3 | | | 252.89 | | | | |
| Grupo humo de sílice 2.50% | 3 | | | | 283.80 | | | |
| Grupo control 0.00% | 3 | | | | 283.97 | | | |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | 3 | | | | 287.88 | | | |
| Grupo humo de sílice 5.00% | 3 | | | | | 298.94 | | |
| Grupo humo de sílice 7.50% | 3 | | | | | | 315.21 | |
| Grupo humo de sílice 10.00% | 3 | | | | | | 320.58 | |
| Grupo humo de sílice 12.50% | 3 | | | | | | | 329.60 |
| Sig. | | 1.000 | 0.999 | 1.000 | 0.401 | 1.000 | 0.110 | 1.000 |

Nota: Los datos mostrados para los siete subconjuntos son valores promedio de resistencia a la compresión de especímenes, cuya unidad está en kg/cm².

Luego de haber realizado la prueba se llegaron a obtener los siguientes resultados para resistencia a la compresión que se muestran a continuación:

Tabla 21

Prueba paramétrica Tukey - Post Hoc para para comparación en pares

| | | Asentamiento en Concreto fresco | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|----|---------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| Grupos | N° | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Grupo humo de sílice 12.50% | 3 | 2.27 | | | | | | | | | | |



| Asentamiento en Concreto fresco | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|----|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Grupos | N° | Subconjunto para alfa = 0.05 | | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Grupo humo de sílice 10.00% | 3 | | 19.13 | | | | | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 5.00% | 3 | | | 48.23 | | | | | | | | |
| Grupo humo de sílice 7.50% | 3 | | | | 50.77 | | | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 3.50% | 3 | | | | | 58.47 | | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 2.00% | 3 | | | | | | 78.70 | | | | | |
| Grupo silicato de sodio 1.00% | 3 | | | | | | | 111.63 | | | | |
| Grupo humo de sílice 5.00% | 3 | | | | | | | | 114.37 | | | |
| Grupo humo de sílice 2.50% | 3 | | | | | | | | | 165.17 | | |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | 3 | | | | | | | | | | 171.53 | |
| Grupo control 0.00% | 3 | | | | | | | | | | | 175.20 |
| Sig. | | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |

Nota: Los datos mostrados para los 11 subconjuntos son valores promedio del ensayo de asentamiento en concreto fresco, cuya unidad está en mm.

De acuerdo a la Tabla 20 se puede observar que en el sub grupo cuatro se encuentra agrupado el Grupo control 0.00% y que de ahí en adelante los sub grupos cinco, seis y siete presentan diferencias significativas positivas, así mismo en la Tabla 21 se puede observar que existe diferencia significativas entre todos los sub grupos del 1 al 11 respectivamente.

4.2.3. Tercer objetivo específico

Para realizar el análisis estadístico de la tercera hipótesis específica planteada en el Capítulo I, ítem 1.3.2 (H.E. 3) y en base al número de datos se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Kolmogorov-Smirnov, por ser la más adecuada para muestras superiores a 50 como indica (Romero Saldaña, 2016). Los resultados de la prueba de normalidad se exponen mediante la Tabla 22.

Para la prueba de normalidad se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Los datos de profundidad de carbonatación, provienen de una distribución normal.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Los datos de profundidad de carbonatación, no provienen de una distribución normal.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₀**).

Tabla 22*Prueba de normalidad de datos de profundidad de carbonatación*

| | Grupos | Kolmogorov-Smirnov | | |
|------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----|----------------|
| | | Estadístico | gl | Sig. (p-valor) |
| Profundidad de carbonatación | Grupo control 0.00% | 0.083 | 128 | 0.032 |
| | Grupo humo de sílice 7.50% | 0.069 | 128 | 0.200 |
| | Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.065 | 128 | 0.200 |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel significancia del 0.05, para la profundidad de carbonatación, por cada grupo se tiene que los valores del p-valor son superiores a 0.05; todo esto se detalla en la Tabla 22, por lo que se confirma que los datos de la variable profundidad de carbonatación provienen de una distribución normal.

De acuerdo con los resultados mencionados en el párrafo anterior y conociendo que tiene una distribución normal, para el contraste de hipótesis se utilizara la prueba paramétrica ANOVA, la cual nos permite determinar diferencias significativas entre las medias de los grupos (Gómez Gómez et al., 2013), en otras palabras, si son mayores o menores que el valor hipotético.

Para la prueba paramétrica ANOVA se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Al menos una de las medias es diferente.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - \text{valor} \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (**H₁**).

- Si: $p - \text{valor} > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H_0).

Por lo cual se interpreta la Hipótesis nula y la Hipótesis alterna del siguiente modo:

- Hipótesis nula (**H₀**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes no influye considerablemente en la profundidad de carbonatación del concreto.
- Hipótesis alterna (**H₁**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la profundidad de carbonatación del concreto.

Luego de haber realizado la prueba estadística se llegaron a obtener los siguientes resultados que se exponen en la Tabla 23:

Tabla 23

Prueba ANOVA para la profundidad de carbonatación

| Grupos | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. (p-valor) |
|------------------|-------------------|-----|------------------|--------|----------------|
| Entre grupos | 271.739 | 2 | 135.870 | 91.938 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 563.058 | 381 | 1.478 | | |
| Total | 834.797 | 383 | | | |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la profundidad de carbonatación se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo inferior al valor de significancia; todo esto detallado en la Tabla 23 y existiendo evidencia suficiente, se toma la decisión de rechazar la Hipótesis nula **H₀** y aceptar la Hipótesis alterna **H₁** para afirmar que “*La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la profundidad de carbonatación del concreto*”,



debido a que existen diferencias significativas entre los grupos de Control 0.00%, adición de humo de sílice 7.50% y adición de silicato de sodio 0.50% en la profundidad de carbonatación.

4.2.4. Cuarto objetivo específico

Para realizar el análisis estadístico de la cuarta hipótesis específica planteada en el Capítulo I, ítem 1.3.2 (H.E. 4) y en base al número de datos se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, por ser la más adecuada para muestras superiores a 50 como indica (Romero Saldaña, 2016). Los resultados de la prueba de normalidad se exponen en la Tabla 24.

Para la prueba de normalidad se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Los datos de resistencia a la penetración del ion cloruro, provienen de una distribución normal.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Los datos de resistencia a la penetración del ion cloruro, no provienen de una distribución normal.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H₁).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H₀).

Tabla 24*Prueba de normalidad de datos de la penetración del ion cloruro*

| | Grupos | Shapiro-Wilk | | |
|--|-------------------------------|--------------|----|----------------|
| | | Estadístico | gl | Sig. (p-valor) |
| Resistencia a la penetración del ion cloruro | Grupo control 0.00% | 0.917 | 7 | 0.449 |
| | Grupo humo de sílice 7.50% | 0.978 | 7 | 0.950 |
| | Grupo silicato de sodio 0.50% | 0.983 | 7 | 0.972 |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel significancia del 0.05, para la resistencia a la penetración del ion cloruro, por cada grupo se tiene que los valores del p-valor son superiores a 0.05; todo esto se detalla en la **Tabla 24**, por lo que se confirma que los datos de la variable resistencia a la penetración del ion cloruro provienen de una distribución normal.

De acuerdo con los resultados mencionados en el párrafo anterior y conociendo que tienen una distribución normal, para el contraste de hipótesis se utilizara la prueba paramétrica ANOVA, la cual nos permite determinar diferencias significativas entre las medias de los grupos (Gómez Gómez et al., 2013), en otras palabras, si son mayores o menores que el valor hipotético.

Para la prueba paramétrica ANOVA se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (**H₀**): Todas las medias son iguales.
- Hipótesis alterna (**H₁**): Al menos una de las medias es diferente.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H_1).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H_0).

Por lo cual se interpreta la Hipótesis nula y la Hipótesis alterna del siguiente modo:

- Hipótesis nula (**H₀**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes no influye considerablemente en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto.
- Hipótesis alterna (**H₁**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto.

Luego de haber realizado la prueba estadística se llegaron a obtener los siguientes resultados que se exponen en la Tabla 25:

Tabla 25

Prueba ANOVA para la resistencia a la penetración del ion cloruro

| Grupos | Suma de cuadrados | gl | Media cuadrática | F | Sig. (p-valor) |
|------------------|-------------------|----|------------------|---------|----------------|
| Entre grupos | 126,718,375.505 | 2 | 63.359,187.753 | 156.495 | 0.000 |
| Dentro de grupos | 7287531.988 | 18 | 404,862.888 | | |
| Total | 134,005,907.494 | 20 | | | |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la resistencia a la penetración del ion cloruro se obtuvo un p-valor de 0.000 siendo inferior al valor de significancia; todo esto detallado en la Tabla 25 y existiendo evidencia suficiente,

se toma la decisión de rechazar la Hipótesis nula H_0 y aceptar la Hipótesis alterna H_1 para afirmar que “*La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la resistencia a la penetración del ion cloruro del concreto*”, debido a que existen diferencias significativas entre los grupos de Control 0.00%, adición de humo de sílice 7.50% y adición de silicato de sodio 0.50% en la resistencia a la penetración del ion cloruro.

4.2.5. Quinto objetivo específico

Para realizar el análisis estadístico de la quinta hipótesis específica planteada en el Capítulo I, ítem 1.3.2 (H.E. 5) y en base al número de datos se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, por ser la más adecuada para muestras superiores a 50 como indica (Romero Saldaña, 2016). Los resultados de la prueba de normalidad se muestran en la Tabla 26.

Para la prueba de normalidad se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H_0): Los datos con y sin exposición a sulfatos, provienen de una distribución normal.
- Hipótesis alterna (H_1): Los datos con y sin exposición a sulfatos, no provienen de una distribución normal.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H_1).

- Si: $p - \text{valor} > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H_0).

Tabla 26

Prueba de normalidad de datos de la variación de composición química

| Grupos | Tipo de grupo | Shapiro-Wilk | | |
|-------------------------------|----------------|--------------|----|----------------|
| | | Estadístico | gl | Sig. (p-valor) |
| Grupo control 0.00% | Sin exposición | 0.998 | 3 | 0.919 |
| Grupo control 0.00% | Con exposición | 0.998 | 3 | 0.923 |
| Grupo humo de sílice 7.50% | Sin exposición | 0.996 | 3 | 0.886 |
| Grupo humo de sílice 7.50% | Con exposición | 0.994 | 3 | 0.856 |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | Sin exposición | 0.990 | 3 | 0.806 |
| Grupo silicato de sodio 0.50% | Con exposición | 0.998 | 3 | 0.923 |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos, por cada grupo se tiene que los valores del p-valor son superiores a 0.05; todo esto se detalla en la Tabla 26, por lo que se confirma que los datos de la variable variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos provienen de una distribución normal.

De acuerdo con los resultados mencionados en el párrafo anterior y conociendo que tiene tienen una distribución normal, para el contraste de hipótesis se utilizara la prueba paramétrica T de Student para muestras relacionadas, la cual nos permite comparar diferencias significativas entre las medias de los grupos (Gómez Gómez et al., 2013), en otras palabras, si son mayores o menores que el valor hipotético.

Para la prueba paramétrica T de Student para muestras relacionadas se plantea las siguientes Hipótesis estadísticas:

- Hipótesis nula (H_0): El promedio de los dos grupos dependientes es igual.



- Hipótesis alterna (**H₁**): Los promedios de los dos grupos dependientes son diferentes.

Se plantea la siguiente regla de decisión para un nivel de significancia del $\alpha = 5\% = 0.05$:

- Si: $p - valor \leq 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H₁).
- Si: $p - valor > 0.05$, entonces se valida la hipótesis estadística alterna (H₀).

Por lo cual se interpreta la Hipótesis nula y la Hipótesis alterna del siguiente modo:

- Hipótesis nula (**H₀**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes no influye considerablemente en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos.
- Hipótesis alterna (**H₁**): La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos.

Luego de haber realizado la prueba estadística se llegaron a obtener los siguientes resultados que se exponen mediante la Tabla 27:

Tabla 27

Prueba T de Student de muestras para la composición química

| Grupos | Diferencias emparejadas | | | | | t | gl | Sig. (bilateral) (p-valor) |
|---|-------------------------|------------------------|-------------------------------|--|------------|-----------|----|----------------------------------|
| | Media | Desviación estándar | Media de error estándar | 95% de intervalo de confianza de la diferencia | | | | |
| | | | | Inferior | Superior | | | |
| Grupo control 0.00% (Sin exposición - Con exposición) | -32,300.00 | 20.000 | 11.547 | -32,349.68 | -32,250.32 | -2,797.26 | 2 | 0.000 |
| Grupo humo de sílice 7.50% (Sin exposición - Con exposición) | 770.00 | 175.214 | 101.160 | 334.74 | 1,205.26 | 7.61 | 2 | 0.017 |
| Grupo silicato de sodio 0.50% (Sin exposición - Con exposición) | -4,630.00 | 45.825 | 26.458 | -4,743.84 | -4,516.16 | -174.99 | 2 | 0.000 |

Nota: Elaboración propia.

Con un nivel de significancia del 0.05, para la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos se obtuvo un p-valor de 0.000 para el grupo control, un p-valor de 0.017 para el grupo humo de sílice 7.50% y un p-valor de 0.000 para el grupo silicato de sodio 0.50%; siendo inferior en los tres grupos al valor de significancia; todo esto detallado en la Tabla 27 y existiendo evidencia suficiente, se toma la decisión de rechazar la Hipótesis nula H_0 y aceptar la Hipótesis alterna H_1 para afirmar que “La incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes influye considerablemente en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos”, debido a que existe diferencia significativas entre el Grupo control 0.00% Sin exposición y Grupo control 0.00% Con exposición, entre el Grupo humo de sílice 7.50% Sin exposición y Grupo



humo de sílice 7.50% Con exposición, entre el Grupo silicato de sodio 0.50% Sin exposición y Grupo silicato de sodio 0.50% Con exposición, todo esto respecto a la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos.

4.3. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

4.3.1. Primer objetivo específico

Con respecto al primer objetivo específico (O.E. 1) planteado en el ítem 1.5.2, “Evaluar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes en las propiedades físicas y mecánicas del concreto”, este se desarrolló en base a investigaciones previas y a la normativa mencionada en el ítem 2.4. Se elaboraron especímenes de concreto con cinco proporciones de aditivos (humo de sílice y silicato de sodio) y un concreto de control, los cuales fueron sometidos a la máquina de compresión, permitiendo recolectar los datos de resistencia a la compresión, como se expone en la Figura 21.

Por otro lado, los ensayos en el concreto fluido, como el asentamiento, también se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma, registrando valores de asentamiento para las distintas proporciones ya mencionadas, como se detallan en la Tabla 11. Posteriormente, se compararon los resultados, obteniendo diferencias en las propiedades del concreto en función de la incorporación de los aditivos. Por lo tanto, se puede indicar que se cumplió con el primer objetivo.

Mostrando que, para las adiciones de humo de sílice de 2.50%, 5.00%, 7.50%, 10.00% y 12.50%, se obtuvieron resistencias promedio a los 28 días de 283.80 kg/cm², 298.93 kg/cm², 315.21 kg/cm², 320.58 kg/cm² y 329.60 kg/cm² respectivamente, obteniendo mejoras de 5.27%, 10.45%, 11.62% y 14.24% para



las adicciones de 5.00%, 7.50%, 10.00% y 12.50% respectivamente. Para las adicciones de silicato de sodio de 0.50%, 1.00%, 2.00%, 3.50% y 5.00%, se obtuvieron resistencias promedio a los 28 días de 287.88 kg/cm², 252.89 kg/cm², 225.14 kg/cm², 226.43 kg/cm², 216.56 kg/cm² respectivamente, obteniendo solo una mejora de 1.19%, para la adición de 0.5%.

4.3.2. Segundo objetivo específico

Con respecto al segundo objetivo específico (O.E. 2) planteado en el ítem 1.5.2, “Identificar los porcentajes apropiados de aditivos impermeabilizantes que mejoren las propiedades del concreto”. este se desarrolló en base a investigaciones previas y a la normativa mencionada en el ítem 2.4. Se elaboraron especímenes de concreto con cinco proporciones de aditivos (humo de sílice y silicato de sodio) y un concreto de control, los cuales fueron sometidos a la máquina de compresión, permitiendo recolectar los datos de resistencia a la compresión, como se expone en la Figura 21.

Por otro lado, los ensayos en el concreto fresco, como el asentamiento, también se realizaron siguiendo las indicaciones de la norma, registrando valores de asentamiento para las distintas proporciones ya mencionadas, como se detalla en la Tabla 11. Posteriormente, para identificar el porcentaje adecuado de cada aditivo, se tomaron en cuenta las propiedades de resistencia a la compresión y consistencia. Se observaron diferencias en las propiedades del concreto en función de la incorporación de los aditivos, Se optó por la concentración de aditivo con mayor resistencia a la compresión y consistencia plástica (de Humo de Sílice al 7.50% y Silicato de Sodio al 0.50%). Por lo tanto, se puede indicar que se cumplió con el segundo objetivo.



4.3.3. Tercer objetivo específico

Con respecto al tercer objetivo específico (O.E. 3) planteado en el ítem 1.5.2, “Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la profundidad de carbonatación del concreto” este se desarrolló en base a investigaciones previas y a la normativa mencionada en el ítem 2.4. Se elaboraron especímenes de concreto con las proporciones adecuadas de los aditivos obtenidas mediante el segundo objetivo (7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio) y un concreto de control, los cuales previamente acondicionados, fueron expuesto a un proceso de carbonatación acelerada fundamentada en la norma española (UNE-EN12390-12, 2020) mencionada en el ítem 2.4, permitiendo recolectar los datos de profundidades de carbonatación, como se muestra en la Figura 22. Posteriormente, se compararon los resultados evaluados al periodo de 120 horas, obteniendo mejoras de 4.43% para el humo de sílice y 6.62% para el Silicato de respecto a las profundidades de carbonatación del concreto. Por lo tanto, se puede indicar que se cumplió con el tercer objetivo.

4.3.4. Cuarto objetivo específico

Con respecto al cuarto objetivo específico (O.E. 4) planteado en el ítem 1.5.2, “Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la resistencia a la penetración del ión cloruro del concreto” este se desarrolló en base a investigaciones previas y a la normativa mencionada en el ítem 2.4. Se elaboraron especímenes de concreto con las proporciones adecuadas de los aditivos obtenidas mediante el segundo objetivo (7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio) y un concreto de control, los cuales previamente acondicionados, fueron expuesto a un proceso de ionización



fundamentada en la norma americana (ASTM C1202-22, 2022), mencionada en el ítem 2.4, permitiendo recolectar los datos de carga, como se muestra en la. Posteriormente, se Tabla 14 compararon los resultados evaluados al periodo de seis horas, obteniendo mejoras de 24.08% para el Humo de Sílice y 98.68% para el Silicato de respecto a la carga promedio obtenida para el concreto control. Por lo tanto, se puede indicar que se cumplió con el cuarto objetivo

4.3.5. Quinto objetivo específico

Con respecto al quinto objetivo específico (O.E. 5) planteado en el ítem 1.5.2, “Evaluar la influencia de la incorporación apropiada de aditivos impermeabilizantes en la variación de composición química del concreto expuesto a sulfatos”, este se desarrolló en base a investigaciones previas y a la normativa mencionada en el ítem 2.4. Se elaboraron especímenes de concreto con las proporciones adecuadas de los aditivos obtenidas mediante el segundo objetivo (7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio) y un concreto de control, los cuales previamente acondicionados, fueron expuesto a un proceso de ionización fundamentada en la norma americana (ASTM C1012-18b, 2018) mencionada en el ítem 2.4, permitiendo recolectar los datos de carga, como se muestra en la Figura 23. Posteriormente, se compararon los resultados evaluados al periodo de 53 días respecto a muestras de concreto sin exposición, obteniendo variaciones de 0.61% para el Humo de Sílice, 0.10% para el Silicato de Sodio y 4.28% para el concreto control. Por lo tanto, se puede indicar que se cumplió con el cuarto objetivo.

4.4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron objeto de análisis y discusión, incluyendo su comparación con investigaciones similares realizadas por otros autores como se expone en la Tabla 28.

Tabla 28

Cuadro resumen de comparación con investigaciones similares

| Autor | Descripción | Porcentaje de adición | Resistencia a la compresión y asentamiento | Profundidad de carbonatación | Resistencia a la penetración del ion cloruro | Variación de composición química del concreto |
|---|------------------------------|----------------------------|--|------------------------------|--|---|
| Gonzales Gomez (2023) | Adición de Silicato de Sodio | 2% 5% 7% 10% | 5% 97% 13.6% -1.5% | - | - | - |
| da Silva Munhoz et al., (2022) | Adición de Silicato de Sodio | 1.0% 5.0% 10.0% | - | - | - | - |
| Lone et al. (2015) | Adición de Silicato de Sodio | 1% 1.4% 1.8% 2.2% | -9.09% -18.18% -27.27% -21.42% | - | - | - |
| Gonzales Jesus (2016) | Adición de Humo de Sílice | 5.0% 7.5% 10.0% * | 18.97% 44.27% 74.31% | - | - | - |
| Caiza Yungán (2020) | Adición de Silicato de Sodio | 4.0% 8.0% * 12.0% | 5.15% 12.62% 18.94% | - | - | - |
| Pachacutec Gutierrez & Vilca Salazar (2018) | Adición de Humo de Sílice | 5.0% 10.0% * | 45.71% 59.83% 54.28% | - | - | - |
| Ahmad et al., (2022) | Adición de Humo de Sílice | 5% | - | 88% | - | - |
| Mejía de Gutiérrez et al. (2009) | Adición de Humo de Sílice | 10% | 33.74% | - | 84.38% | - |
| Barbhuiya & Qureshi, (2016) | Adición de Humo de Sílice | 10% 15% | - | - | 102% 150% | - |
| Sánchez Ruíz (2021) | Adición de Silicato de Sodio | 15% ** | - | -38.31% | - | - |
| Arivumangai et al. (2020) | Adición de Humo de Sílice | 7.5% | - | - | - | 7.5% |

| Autor | Descripción | Porcentaje de adición | Resistencia a la compresión y asentamiento | Profundidad de carbonatación | Resistencia a la penetración del ion cloruro | Variación de composición química del concreto |
|-------------------|------------------------------|-----------------------|--|------------------------------|--|---|
| Li et al., (2019) | Adición de Humo de Sílice | 5.0% | 40.49% | - | - | 68.45% |
| Presente estudio | Adición de Silicato de Sodio | 0.5% * | 1.19% | -6.62% | -98.68% | 7.5% |
| | | 1.0% | -10.8% | | | |
| | | 2.0% | -23.26% | | | |
| | | 3.5% | -25.55% | | | |
| | | 5.0% | -29.77% | | | |
| Presente estudio | Adición de Humo de Sílice | 2.5% | -0.06% | -4.43% | 24.08% | -0.61% |
| | | 5.0% | 5.27% | | | |
| | | 7.5% * | 10.45% | | | |
| | | 10.0% | 11.62% | | | |
| | | 12.5% | 14.24% | | | |

Nota: Se indica el porcentaje de adición óptimo de aditivo, hallado por los autores con (*) y en caso de aplicación superficial de aditivos con (**). Elaboración propia.

4.4.1. Primer objetivo específico

Mediante los resultados se puede determinar que se obtuvo un incremento en la resistencia a compresión del concreto con ambos aditivos, a pesar de que, con el aditivo silicato de sodio, solo mejoró con un porcentaje de 0.50% y en ambos casos hubo una disminución del asentamiento, podemos contrastar los resultados con Gonzales Gomez (2023) quien también usó el silicato de sodio al 2%, 5%, 7% y 10%, obteniendo un incremento de resistencia a la compresión de 5%, 97% y 13.6% para las adiciones de 2%, 5% y 7%, respectivamente, mientras que la adición del 10% resultó en una disminución en la resistencia; del mismo modo realizó ensayo de asentamiento, donde obtuvo una caída del en el asentamiento, con valores de 4.50”, 4.50”, 3.50”, 2.50” y 2” evidenciando una reducción de la consistencia. Esta diferencia podría deberse al tipo de cemento empleado, ya que los cementos empleados en la zona sur del país presentan características distintas, así como también se debe mencionar que en la presente investigación se empleó un aditivo extra (plastificante) el cual aporta plasticidad,



no obstante, no le añade agua a la mezcla, ya que se utilizó un diseño de mezclas por reducción, reduciendo la cantidad de agua de diseño.

De manera análoga, Li et al. (2019) realizaron una investigación de la aplicación de humo de sílice al 5.0% donde obtuvo una mejora en la resistencia a la compresión del 40.49% aproximadamente, respecto a su concreto control, indicando una mejora con la aplicación del aditivo.

Luego, con respecto a las adiciones con silicato de sodio Caiza Yungán (2020), en su investigación utilizó el aditivo a diferentes porcentajes (4.0%, 8.0% y 12.0%), mostrando un incremento aproximado en la resistencia a la compresión respecto al control de 5.15% para un 4.0% de adición, 12.62% para un 8.0% de adición y 18.94% para un 12.0% de adición. No obstante, indica que su asentamiento se vio afectado, lo cual se asemeja con la presente investigación, ya que se obtuvo una disminución en el asentamiento, probablemente debido al empleo del aditivo plastificante. No obstante, los resultados de resistencia a la compresión no guardan relación con los de la presente investigación. Sin embargo, (da Silva Munhoz et al., 2022) muestra que, conforme se incrementa el silicato de sodio a la mezcla desciende la resistencia a la compresión en aproximadamente un 20% para un 5% de adición y un 3% para un 1% de adición, presentando resultados relacionados a la presente investigación.

Lone et al. (2015) en su investigación empleo silicato de sodio en porcentajes de 1%, 1.4%, 1.8% y 2.2%, obteniendo una disminución en la resistencia a la compresión de -9.09%, -18.18%, -27.27% y 21.42%, por lo que concluyó que el silicato de sodio no contribuye al incremento de resistencia del



concreto. Sin embargo, indica que mejora el factor de compactación del concreto, mejorando la trabajabilidad.

Respecto a las adicciones de humo de sílice, denominándolo micro sílice Pachacutec Gutierrez & Vilca Salazar (2018) utilizó 5%, 10% y 15% e indica un incremento de resistencia respecto a su concreto patrón, sin embargo, presenta disminución con adicciones mayores a 10%; Por lo que se podría deducir que el empleo del aditivo humo de sílice puede presentar un rango amplio para su aplicación, siempre y cuando se considere la consistencia final del concreto. En contraste con Gonzales Jesus (2016), utilizó adicciones de 5%, 7.50% y 10%, obteniendo mejoras significativas en la resistencia a la compresión de 18.97%, 44.27% y 74.31%, respectivamente, lo cual corrobora los resultados de la presente investigación. Es probable que el incremento en la resistencia haya sido mayor debido a que se utilizó una mayor cantidad de material cementante, en lugar de una sustitución parcial del cemento.

4.4.2. Segundo objetivo específico

Mediante los resultados obtenidos en la presente investigación se puede determinar los porcentajes adecuados para su aplicación: un 0.50% de silicato de sodio y un 7.50% de humo de sílice, dado que se observó una disminución en el asentamiento. En cuanto a la adicción adecuada de silicato de sodio, Caiza Yungán (2020) indica como porcentajes óptimos al 8% y 4% de silicato de sodio, puesto que la consistencia del concreto estuvo afectada a mayor porcentaje de adición.

Respecto a la adicción adecuada de Humo de Sílice, Pachacutec Gutierrez & Vilca Salazar (2018) indica un incremento de resistencia respecto a su concreto



patrón, indicando un porcentaje óptimo al 10% de adición, no obstante no indica variación en la consistencia del concreto. Coincidiendo con Gonzales Jesus (2016), que indica como porcentaje óptimo al 10% de adición, no obstante no evaluó la consistencia del concreto.

4.4.3. Tercer objetivo específico

Mediante los resultados se puede decir que se obtuvo una disminución de profundidad de carbonatación en el concreto empleando la adición de 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio, siendo este último con mejor comportamiento respecto al concreto control empleado. Por otro lado, Ahmad et al. (2022) indica que a 90 días de exposición a carbonatación, obtuvo 88% menos de profundidad de penetración de carbonatación que el concreto control haciendo que la adición de 5% de humo de sílice disminuya la resistencia a la carbonatación. De manera análoga, Li et al. (2019) realizó una investigación de la aplicación de humo de sílice al 5.0% donde obtuvo una resistencia del 68.45% menos respecto a su concreto control, indicando una mejora en la resistencia a los cloruros.

Por otro lado, Sánchez Ruíz (2021) obtuvo que la presencia de silicato de sodio en el concreto, disminuyó el proceso y profundidad de carbonatación en el concreto en un 124.18%, ya que el concreto control tiene una profundidad de carbonatación 45% mayor a los concretos experimentales; cabe resaltar que la aplicación de este aditivo fue de forma superficial en una solución de agua con un 15% de silicato de sodio líquido, y no incorporada a la mezcla, por lo que mostro resultados mayores a la presente investigación, lo anterior mencionado no quiere decir que no coincidan en que el uso de silicato de sodio es favorable para la resistencia a la carbonatación del concreto. Estos resultados se pueden asociar a



una colmatación de poros superficial y en consecuencia a una mayor compacidad del espécimen.

4.4.4. Cuarto objetivo específico

Mediante los resultados mostrados anteriormente se puede simplificar indicando que existe un incremento en la resistencia al ion cloruro con la adición de humo de sílice, por el contrario, a la adición de silicato de sodio, que se reduce respecto al control. Por otro lado, Mejía de Gutiérrez et al. (2009) indica que los especímenes de concreto con adición de humo de sílice exhiben menor permeabilidad frente al ion cloruro con una disminución aproximada del 84.38% en carga eléctrica transferida expresada en Coulomb, pudiendo considerarse como materiales de muy baja permeabilidad a cloruros; se debe agregar que utilizo una relación agua/cementante de 0.40, siendo esta mayor a la de la presente investigación.

Por otra parte Barbhuiya & Qureshi (2016) utilizó humo de sílice al 10% y 15%, obteniendo mejoras con en la resistencia a la penetración del ion cloruro en un 102% y 150% respecto a su concreto control, no obstante indica que trabajó con una relación agua aglutinante de 0.35, indicando que en cuanto menor sea la relación agua aglutinante mayor será la resistencia a la penetración del ion cloruro.

De manera análoga Sánchez Ruíz (2021) obtuvo que la presencia superficial de silicato de sodio en el concreto, disminuyó el proceso de penetración de cloruros en un 9.09% respecto al control, ya que se evaluó la concentración de cloruros respecto a la red Durar. La cual indica que la concentración de cloruros debe ser menor al 0.4%, incluso a una profundidad de 5 mm, se debe indicar que



la evaluación con el aditivo fue a manera de exposición, resaltando también que la aplicación de este aditivo fue de forma superficial, y no incorporada a la mezcla; no obstante, los resultados difieren puesto que en la presente investigación se realizó una prueba indirecta y acelerada de la penetración del ion cloruro.

4.4.5. Quinto objetivo específico

Mediante los resultados mostrados anteriormente se puede simplificar indicando que existe una variación menor de partículas de calcio en las muestras expuestas a sulfatos respecto al control, existiendo un incremento en 4,630 ppm con la adición de humo de sílice, por el contrario, una disminución de 770 ppm con la adición de silicato de sodio.

Arivumangai et al. (2020) menciona que obtuvo una mejora en la resistencia a los sulfatos utilizando humo de sílice al 7.50%, no obstante mostró una reducción 12.2% en la resistencia a compresión. Algo semejante ocurre con Bassuoni & Rahman (2016) quienes mencionan que, la adición de partículas de sílice condujo a un aumento de la profundidad de penetración y en consecuencia una pérdida de masa de muestra. La presente investigación realizó el análisis químico de las muestras expuestas para su evaluación.



V. CONCLUSIONES

- C.E. 1: La incorporación del aditivo humo de sílice en el concreto ocasionó un incremento significativo respecto a la resistencia a compresión en todos los porcentajes aplicados. Por otro lado, la incorporación del aditivo silicato de sodio ocasionó una disminución en la resistencia a compresión para las adiciones de 2%, 3.5% y 5, no obstante, en ambos casos se ocasionó la reducción del asentamiento; por lo que se puede decir que la adición de silicato de sodio y humo de sílice influye en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.
- C.E. 2: La incorporación del 7.50% del aditivo humo de sílice y 0.5% de silicato de sodio obtuvieron mejoras en un 11.62% y 1.19% frente a la resistencia a la compresión a la edad de 28 días, cumpliendo una consistencia plástica; por lo que se concluye que la incorporación del 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio son las apropiadas para poder emplearse.
- C.E. 3: La incorporación apropiada de humo de sílice (7.5%) y silicato de sodio (0.5%) obtuvieron mejoras en relación a la profundidad de carbonatación en un 4.43% y 6.62% respecto al concreto control, en un periodo máximo de 120 horas de exposición.; por lo que se concluye que la incorporación del 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio mejoran la resistencia a condiciones de exposición acelerada de carbonatación.
- C.E. 4: La incorporación apropiada de humo de sílice (7.5%) obtuvo una reducción en relación a la transferencia de carga de ion cloruro en un 24.08% aproximadamente en cambio el silicato de sodio (0.5%) obtuvo un aumento del 98.68%; por lo que se concluye que la incorporación del 7.50% de humo de sílice



mejora la resistencia a condiciones de exposición a la penetración del ion cloruro y el 0.50% de silicato de sodio la reduce.

- C.E. 5: La incorporación apropiada de humo de sílice (7.5%), silicato de sodio (0.5%) y nuestro concreto control, obtuvieron variaciones aproximadas de 4,630ppm de Ca y 700.70 ppm de Ca y 32,300 ppm de Ca respectivamente, en un periodo máximo de 53 días de exposición; por lo que se concluye que la incorporación del 7.50% de humo de sílice y 0.50% de silicato de sodio presentan una variación menor a la del concreto control a condiciones de exposición a sulfatos.
- C.G.: La presente investigación permitió evidenciar la influencia de la incorporación de aditivos impermeabilizantes, de manera que se concluye que la incorporación de aditivos impermeabilizantes influye significativamente sobre las propiedades del concreto expuesto a condiciones aceleradas de carbonatación y sales, así como también la incorporación adecuada es determinante para el desempeño del concreto frente a diferentes condiciones de exposición.



VI. RECOMENDACIONES

- La presente investigación empleo dos tipos de aditivos impermeabilizantes, sin embargo, también se incorporó un aditivo plastificante, de modo que es recomendable evaluar la reacción e interacción de dos a más aditivos en conjunto, no olvidando el cemento, ya que los aditivos y cementantes reacciona dentro de la mezcla, pudiendo ocasionar una cancelación de sus propiedades, perjudicando las propiedades físicas y mecánicas del concreto que se pretende elaborar.
- Es difícil poder indicar un porcentaje apropiado de un aditivo impermeabilizante, ya que este puede ser apropiado para una sollicitación y para otra no. Por lo que se recomienda probar con nuevos porcentajes a fin de obtener porcentajes óptimos, conociendo los parámetros de resistencia a la compresión, durabilidad y pruebas que se pueden realizar para poder definir características adecuadas al propósito del concreto.
- Se recomienda emplear pruebas de carbonatación a diferentes periodos de exposición para verificar el comportamiento del concreto, También se recomienda el uso del microscopio de barrido para poder observar con mayor claridad los compuestos químicos producidos por la carbonatación; y de ser posible emplear un mejor método de medición de la profundidad de carbonatación, ya que la fenolftaleína, es un compuesto que requiere cuidado en su utilización.
- La penetración del ion cloruro es una prueba indirecta, por lo que no se puede realizar ensayos complementarios, si se desea obtener datos de resistencia a la compresión post exposición es recomendable la utilización de un método directo.
- Se recomienda probar otros métodos de exposición a sulfatos, ya que el método de exposición a una solución de sulfato de magnesio heptahidratado presenta



periodos largos de análisis, así como también la evaluación a diferentes porcentajes de adición.

- Se recomienda la incorporación de aditivos impermeabilizantes en el diseño de mezclas de concreto considerando los requerimientos de las estructuras a las que estarán destinadas ya sea condiciones de carbonatación, sales y otros; puesto que es más importante conocer la adición de aditivos que se puedan realizar al concreto a fin de buscar mejoras en propiedades de específicas.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del Concreto (Teoría y problemas)* (Y. Rojas (ed.); Segunda Ed). Editorial San Marcos E.I.R.L.
- ACI - 318. (2019). Requisitos de reglamento para concreto estructural. In *American Concrete Institute*. American Concrete Institute.
- Ahmad, S., Baghabra Al-Amoudi, O. S., Khan, S. M. S., & Maslehuddin, M. (2022). Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 17(February), 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01255>
- Aire, C. (2022). *Revisión de los métodos de prueba para evaluar la durabilidad del hormigón* (pp. 1–16).
- Alaya Zelada, W., & Alvarez Vasquez, W. N. (2022). *Resistencia a Compresión Axial del concreto con incorporación de celulosa de papel periódico y curado a 28 días en aguas residuales para un diseño de mezcla F'C 210 kg/cm² – Cajamarca 2022* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/33758>
- Arévalo Villacorta, L. (2001). *Influencia de la microsilice en el concreto* [Universidad Nacional de Ingeniería]. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/18346>
- Arivumangai, A., Narayanan, R. M., & Felixkala, T. (2020). Study on sulfate resistance behaviour of granite sand as fine aggregate in concrete through material testing and XRD analysis. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1724–1729.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.354>
- ASTM C1012-18b. (2018). Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution. In *American Society for Testing and Materials* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1520/C1012>
- ASTM C1202-22. (2022). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. In *American Society for Testing and Materials* (Issue C). <https://doi.org/10.1520/C1202-22>



- ASTM C642. (2021). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. In *American Society for Testing and Materials* (Issue March). <https://doi.org/10.1520/C0642-21.2>
- Atria. (2020). *Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿Para qué me sirve?* Blog Tecnologías. <https://atriainnovation.com/blog/microscopia-electronica-de-barrido-sem-utilidades/>
- Barbhuiya, S., & Qureshi, M. (2016). Effects of Silica Fume on the Strength and Durability Properties of Concrete. *IMC Worldwide Ltd. UK*, 117–120. https://www.researchgate.net/publication/327258417_Effects_of_Silica_Fume_on_the_Strength_and_Durability_Properties_of_Concrete#fullTextFileContent
- Barger, G. S., Bayles, J., Blair, B., Brown, D., Chen, H., Conway, T., & Hawkins, P. (2001). Ettringite Formation and the Performance of Concrete. In *Portland Cement Association* (Issue 2166).
- Bassuoni, M. T., & Rahman, M. M. (2016). Response of concrete to accelerated physical salt attack exposure. *Cement and Concrete Research*, 79, 395–408. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.0060008-8846>
- Behar Rivero, D. S. (2008). Metodología de la Investigación. In D. S. Behar Rivero (Ed.), *Shalom* (Ruberira, Vol. 1). Editorial Shalom. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Brichetti, J. P., Mastronardi, L., Rivas Amiassorho, M. E., Serebrisky, T., & Solís, B. (2021). La brecha de infraestructura en America Latina y el Caribe. In *Banco Interamericano de Desarrollo* (pp. 1–144). Banco Interamericano de Desarrollo. <https://publications.iadb.org/es/publications/spanish/viewer/La-brecha-de-infraestructura-en-America-Latina-y-el-Caribe-estimacion-de-las-necesidades-de-inversion-hasta-2030-para-progresar-hacia-el-cumplimiento-de-los-Objetivos-de-Desarrollo-Sostenible.pdf>
- Caiza Yungán, J. R. (2020). *Análisis comparativo de las propiedades mecánicas de un hormigón hidráulico (Tipo GU) de $F'c=240 \text{ kg/cm}^2$ con diferentes dosificaciones de silicato de sodio y nanosílice utilizando agregados de la mina Santa Isabel ubicado en la via Shell – Madre Tierra, ci* [Universidad Técnica de Ambato].



<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31491>

Carrasco Díaz, S. (2006). *Metodología de la Investigación Científica* (A. J. Paredes Galván (ed.); Primera ed). Editorial San Marcos E.I.R.L.

Castañeda Cisneros, L. A., & Salguero Sandoval, C. X. (2020). Diseño y evaluación de concreto resistente a sulfatos mediante la adición de nanosílice para la construcción de canales en la costa norte: Caso Chavimochic Etapa I. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas*, 1–126.

<https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/652758>

Cerna Landa, M. B. (2019). Variación de propiedades físicas y mecánicas del concreto de media resistencia, en adición del silicato de sodio – Lima 2019 [Universidad César Vallejo]. In *Universidad César Vallejo*.

http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Chinè Polito, B., Cuevas Kauffmann, R., Jiménez Salas, R., & Ortiz Quesada, G.

(2019). Estudio experimental de la carbonatación del concreto. *Revista Tecnología En Marcha*, 32(2), 68–81. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4350>

Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2014). *Elements of X-Ray Diffraction* (Pearson New International Edition (ed.); Tercera Ed, Vol. 108, Issue 2). Pearson Education Limited. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(79\)80596-7](https://doi.org/10.1016/0014-5793(79)80596-7)

da Silva Munhoz, G., Edilson Gomes Dobrovolski, M., Leandro Nenevê, B., Luiz Dias, R., Pereira Godinho, J., & Henrique Farias de Medeiros, M. (2022). The influence of fly ash and neutral sodium silicate on concretes submitted to sulfuric acid attack. *Engineering Failure Analysis*, 141, 1–15.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106673>

Enrique Rivva López. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto* (G. Angel, R. Katy, & H. Roxana (eds.); Primera Ed). Capítulo Peruano ACI.

Flores Yucra, R., Ginez Choque, P. A., Alfaro Alejo, R., Flores Quispe, E. L., & Flores Condori, E. (2024). Efecto del Parque Automotor en el Nivel de Contaminación por Dióxido de Carbono en la Ciudad de Puno. *Ciencia Latina Revista Científica*



- Multidisciplinar*, 8(1), 5932–5948. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9937
- Garcia Kriete, L. G. (2018). Concreto de alto desempeño utilizando hormigón con adición de microsilice y superplastificante en la ciudad de Huancayo [Universidad Nacional del Centro del Perú]. In *Universidad Nacional del Centro del Perú*. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4908>
- Giaretton Cappelleso, V., Santos Petry, N. Dos, Coitinho Dal Molin, D. C., & Borgues Masuero, A. (2016). Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 71, 1–9. <https://doi.org/10.1007/s41024-016-0012-7>
- Global Cement and Concrete Association. (2021). *Futuro del hormigón. Plan de trabajo hacia una industria del cemento y hormigón neutra en carbono para 2050 de la Asociación Mundial de Productores de Cemento y Hormigón*. 1–19. <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2021/11/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Spanish.pdf>
- Goldstein, J., Newbury, D., Joy, D., Lyman, C., Echlin, P., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis* (S. Sciencie (ed.); Tercera Ed). Kluwer Academic. https://books.google.com.pe/books?id=wq7eBwAAQBAJ&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Gómez Gómez, M., Danglot Banck, C., & Vega Franco, L. (2013). Choosing a statistical test. Second of two parts. *Revista Mexicana de Pediatría*, 80(2), 81–85. <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2015.15.002>
- Gonzales Gomez, J. S. (2023). Adición del Silicato de Sodio en un concreto F'c 210 kg/cm² para mejorar el comportamiento físico y mecánico, Callao 2023 [Universidad Cesar Vallejo]. In *Universidad Cesar Vallejo*. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gonzales Jesus, R. M. (2016). *Concreto de alta resistencia utilizando aditivo microsilice* [Universidad Nacional Hermilio Valdizán]. <https://hdl.handle.net/20.500.13080/1290>



- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación. In Mc Graw Hill Education (Ed.), *Sustainability (Switzerland)* (6ta Edición, Vol. 11, Issue 1).
http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_P EMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI
- Hossain, M. A., Chowdhury, S. R., & Anik, M. F. R. (2024). Study on carbonation of low strength concrete made of brick aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, 20(March), e03073. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03073>
- Hussain, S., Bhunia, D., & Singh, S. B. (2016). An experimental investigation of accelerated carbonation on properties of concrete. *Engineering Journal*, 20(2), 29–38. <https://doi.org/10.4186/ej.2016.20.2.29>
- International Business Machines Corporation. (2020). *IBM SPSS Statistics* (27.0).
- Jenkins, R. (1999). X-Ray Fluorescence Spectrometry. In J. D. Winefordner (Ed.), *Modern Analytical Geochemistry: An Introduction to Quantitative Chemical Analysis Techniques for Earth, Environmental and Materials Scientists* (Segunda Ed). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58292-0_240014
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. In L. John Wiley & Sons (Ed.), *Portland Cement Association: Vol. Primera Ed* (Primera Ed). Portland Cement Association.
- Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (Tercera Ed). Mc Graw Hill. <https://doi.org/101036/007142899>
- Li, L. G., Zheng, J. Y., Ng, P. L., Zhu, J., & Kwan, A. K. H. (2019). Cementing efficiencies and synergistic roles of silica fume and nano-silica in sulphate and chloride resistance of concrete. *Construction and Building Materials*, 223, 965–975. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.241>
- Lone, I. H., Muneeb, A., Ahmad, J., Jasim, S. M., Ali, M., Khan, M. A., & Malik, A. H. (2015). Estudio experimental del efecto de Silicato de Sodio (Na₂SiO₃) en



- propiedades del concreto. *Revista Internacional de Ingeniería Civil y Tecnología*, 6(12), 39–47.
<http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=6&IType=12>
ISSN
- Maldonado Bandala, E. E., Nieves Mendoza, D., Vela Jimenez, J. L., & Castro Borges, P. (2018). Evaluación de problemas patológicos asociados a carbonatación y sulfatos en una torre de concreto con más de 50 años de servicio. *ALCONPAT*, 8(1), 94–107. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.284>
- Medeiros, M. F. ., Pereira, E., & Helene, P. (2013). Revista ALCONPAT. *Alconpat*, 3, 149–161. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2.i3.34>
- Mejía de Gutiérrez, R., Rodríguez, C., Rodríguez, E., Torres, J., & Delvasto, S. (2009). Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista Facultad de Ingeniería*, 48, 55–64.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2021). RNE - Concreto Armado: E060. In *El peruano*. [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366660/55 E.060 CONCRETO ARMADO DS N° 010-2009.pdf?v=1636060379](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366660/55.E.060%20CONCRETO%20ARMADO%20DS%20N%20010-2009.pdf?v=1636060379)
- Moreno, E. I., Domínguez Lara, G. G., Cob Sarabia, E. J., & Duarte Gómez, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8(2), 117–130.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46780210>
- Mosqueira Ramirez, C. P. (2019). *Efecto del tiempo de exposición al CO₂, del concreto de f'c=210 kg/cm², en la profundidad de carbonatación y en la resistencia a compresión* [Universidad Nacional de Cajamarca].
<http://hdl.handle.net/20.500.14074/3408>
- Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2018). Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y redacción de la Tesis. In A. Gutiérrez (Ed.), *Journal of Chemical Information and Modeling* (Quinta edí, Vol. 53, Issue 9). Ediciones de la U.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>



- Nilson, A. H., Darwin, D., & Dolan, C. W. (2010). *Design of concrete structures* (14th editi). Mc Graw Hill.
- NTP 339.034. (2015). *Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas* (Issue Lima 27).
- NTP 339.035. (2015). *Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland*.
- NTP 339.185. (2021). *Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado*.
- NTP 400.012. (2021). *Análisis granulométrico del agregado fino y grueso*.
- NTP 400.017. (2020). *Método de ensayo para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (Peso Unitario) y los vacíos de los agregados*.
- NTP 400.021. (2020). *Densidad relativa (Peso Específico) y absorción del agregado grueso*.
- NTP 400.022. (2024). *Determinación de la densidad relativa (Peso Específico) y absorción del agregado fino*.
- Pachacutec Gutierrez, Y. P., & Vilca Salazar, N. G. (2018). Estudio Comparativo de la determinación de propiedades de resistencia en el concreto utilizando Micro Y Nano Sílice con Agregados de la cantera Cutimbo – Puno [Universidad Nacional del Altiplano]. In *Repositorio Institucional - UNAP*.
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7092>
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Temas de tecnología del concreto* (E. Pasquel Carbajal (ed.); Segunda Ed). Colegio de Ingenieros del Perú.
- Portugal Barriga, P. (2007). *Tecnología Del Concreto De Alto Desempeño* (p. 348). Primera Edición.
- Rivero Lazo, M. S., Meneses, Jara, P. W., García Céspedes, J., Anibal Rivero, R. A., & Zevallos Choy, E. L. (2021). *Metodología de la Investigación* (M. S. Rivero Lazo (ed.); Primera ed). Editorial Universitaria Universidad Nacional Hemilio Valdizán.



- Rojas Bejar, J. M. (2022). *Evaluación comparativa de resistencia a la compresión a diferentes niveles de PH de concretos expuestos a carbonatación acelerada usando fenolftaleína en la ciudad Quillabamba - Cusco 2021*. Universidad Andina del Cusco.
- Romero Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Enfermería Del Trabajo*, 6(3), 105–114.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5633043>
- Sakr, M. R., & Bassuoni, M. T. (2021). Performance of concrete under accelerated physical salt attack and carbonation. *Cement and Concrete Research*, 141(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106324>
- Sánchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero* (Multiletras Editores Ltda. (ed.); Quinta Edi). Bhandar Editores Ltda.
- Sánchez Ruíz, M. D. (2021). *Estudio de la durabilidad de concretos con propiedades de auto reparación a base de silicato de sodio y alcohol de polivinilo*. Instituto Tecnológico de Chetumal.
- Sanjuán Barbudo, M. Á., & Castro Borges, P. (2001). *Acción de los Agentes Químicos y Físicos Sobre el Concreto* (H. Esqueda Huidobro & R. Huerta Martínez (eds.); Primera Ed). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Shi, C., Jiménez Fernández, A., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 41, Issue 7, pp. 750–763). Pergamon.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.016>
- Sika Perú. (2024). *Sika - I Aditivo impermeabilizante*.
<https://per.sika.com/es/construccion/impermeabilizacion-estructuras/impermeabilizacionparaespaciosexteriores/barreras-impermeabilizantes/sika-1.html>
- Stuart, B. H. (2004). Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. In B. H. Stuart (Ed.), *Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications* (Primera Ed). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011149>



- Supo, J., & Zacarías, H. (2020). *Metodología de la Investigación Científica* (Amazon Digital Services LLC (ed.); Tercera ed). Independently published.
- Tinoco, H. (2014). *Protección Superficial del Hormigón Armado: Cloruros y Carbonatación*. June.
https://www.researchgate.net/publication/263443021_Proteccion_Superficial_del_Hormigon_Armado_Cloruros_y_Carbonatacion_Proteccion_Superficial_del_Hormigon_Armado_Cloruros_y_Carbonatacion
- UNE-EN 14630. (2007). *Determinación de la profundidad de carbonatación en un hormigón endurecido por el método de la fenolftaleína*.
<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0039887>
- UNE-EN12390-12. (2020). *Norma Española Parte 12 : Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón Método de carbonatación acelerada Asociación Española de Normalización*.
- Vilches, J., Figueroa, J., Chamorro, L., & Piña, C. (2020). Analysis of the Carbonation in Normal Concrete with the Addition of Tire Rubber Aggregate. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503(1), 1–9.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012069>



ANEXOS

ANEXO 1: Matriz de Consistencia.

ANEXO 2: Certificado de ensayos de Laboratorio de Construcciones de la EPIC.

ANEXO 3: Certificado de ensayos de Laboratorio de Yacimiento Minerales de la EPIG.

ANEXO 4: Certificación de calibración de equipos de laboratorio.

ANEXO 5: Resultados del diseño de mezclas.

ANEXO 6: Resultados del asentamiento del concreto.

ANEXO 7: Resultados de la resistencia a la compresión del concreto por cada adición de aditivos impermeabilizantes.

ANEXO 8: Resultados de densidad, absorción y porcentaje de poros permeables.

ANEXO 9: Resultados del ensayo de Carbonatación Acelerada.

ANEXO 10: Resultados del ensayo de Penetración de Ion Cloruro.

ANEXO 11: Ficha técnica de cemento Yura Tipo IP.

ANEXO 12: Ficha técnica del aditivo Humo de Sílice.

ANEXO 13: Ficha técnica del aditivo Silicato de Sodio.

ANEXO 14: Ficha técnica del aditivo Plastificante.

ANEXO 15: Panel fotográfico.



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo BRYAN GEORGE TAIPE FLORES
identificado con DNI 72814925 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A CONDICIONES
ACELERADAS DE CARBONATACIÓN Y SALES , PUNO 2023 "

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 18 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo ROMY HANCCO SONCCO
identificado con DNI 71662484 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:
" INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMIEABILIZANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A CONDICIONES
ACELERADAS DE CARBONATACIÓN Y SALES, PUNO 2023 "

Es un tema original.

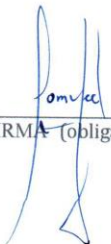
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 18 de NOVIEMBRE del 20 24


FIRMA (obligatoria)





AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo BRYAN GEORGE TAIFE FLORES
identificado con DNI 72814925 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A CONDICIONES
ACELERADAS DE CARBONATACIÓN Y SALES, PUNO 2023 "

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.


En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 18 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo ROMY HANCCO SONCCO
identificado con DNI 71662484 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA CIVIL

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

" INFLUENCIA DE ADITIVOS IMPERMEABILIZANTES SOBRE LAS
PROPIEDADES DEL CONCRETO EXPUESTO A CONDICIONES
ACELERADAS DE CARBONATACIÓN Y SALES, PUNO 2023 "

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los "Contenidos") que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 18 de DICIEMBRE del 2024


FIRMA (obligatoria)



Huella