

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

***EFFECTOS DE ADITIVOS Y ADICIONES SOBRE LA DURABILIDAD
DEL CONCRETO ESTRUCTURAL***

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR Edgar Palencia

PROFESOR GUÍA Ing. MSc. Guillermo Bonilla

FECHA Caracas, Junio de 2023

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

***EFFECTOS DE ADITIVOS Y ADICIONES SOBRE LA DURABILIDAD
DEL CONCRETO ESTRUCTURAL***

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: **VEINTE (20) PUNTOS.**

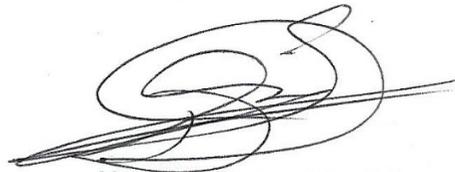
JURADO EXAMINADOR

Firma:



Nombre: Yelitza Sirit

Firma:



Nombre: Danny Linares

Firma:



Nombre: Guillermo Bonilla

REALIZADO POR Edgar Palencia

PROFESOR GUÍA Ing. MSc. Guillermo Bonilla

FECHA Caracas, Junio de 2023

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Católica Andrés Bello, por ser mi casa de estudios en todos estos años, por haberme brindado tantas enseñanzas, buenas amistades, gratas experiencias y sobre todo convertirme en una mejor persona y ahora un profesional de la Ingeniería Civil.

A Premezclados Concreklím Caracas II, Ingra. Estefanía Gutiérrez e Ing. Danny Linares, por sus buenos servicios y por hacer posible la ejecución de este trabajo.

A aquellos(as) profesores(as) cuyo objetivo era compartir sus conocimientos conmigo, en especial a mi tutor, el Ing. MSc. Guillermo Bonilla, el cual me ha dejado importantes aprendizajes sobre el significado de la ingeniería y lo que conlleva.

A mi padre, el Lic. Edgar Palencia, y a mi hermano, el Ing. Erik Palencia, que con su gran esfuerzo y apoyo me han permitido llegar hasta aquí. Este y el resto de mis logros serán en gran parte gracias a ustedes.

A mi hermano, el Arq. Ederik Palencia, por siempre estar pendiente de mí y ayudarme en lo que sea necesario.

A la Ingra. Yelitza Sirit, por sus valiosos consejos y enseñanzas, así como también a la Arq. Iliana Hernández por todo el apoyo a mi persona.

A mis amigos, el Ing. Angel Lacruz y Veralucía Lemus, con quienes compartí gran parte de la carrera, siempre con nuestro lema en alto “fuerza y fe”.

A Silvia Monterosso, por soportarme durante el último tramo de la carrera, y ofrecerme su apoyo en los buenos y no tan buenos momentos.

A la “Canasta de Frutas” y a todos los integrantes del Laboratorio de Materiales.

A aquellos familiares, amigos y conocidos que aportaron algo en el proceso.

Edgar D. Palencia F.

SINOPSIS

La durabilidad del concreto estructural cuenta con un sustento importante en investigaciones realizadas hasta la actualidad, sin embargo se puede decir que su nivel de estudio es relativamente menor en comparación con parámetros como la resistencia mecánica, y por ende se desglosan una serie de temas con requerimientos de información y más estudios, referentes al desempeño de las estructuras ante agentes externos capaces de incidir desfavorablemente en la vida útil del material.

Es por ello que en el presente trabajo de grado, desarrollado en el Laboratorio de Tecnología de Materiales de Construcción UCAB (Caracas, Venezuela), se planteó evaluar alternativas para modificar la durabilidad del concreto en estado endurecido, a partir del uso de productos que influyen en su comportamiento, como lo son los aditivos y las adiciones. Para ello, se elaboraron un total de treinta y tres (33) probetas cilíndricas, con distintas condiciones de interés, tomando como referencia la variación en el tiempo de resistividad eléctrica, humedad y temperatura interna.

En el seguimiento de los objetivos propuestos, también se llevaron a cabo pruebas en ochenta y dos (82) muestras distribuidas entre pasta de cemento y mortero, con la intención de comprender la interacción de los distintos componentes utilizados y lograr diseños de mezcla que permitan generar información relevante para el sector, junto con los controles asociados al concreto en estado fresco. Para estos casos se trabajaron con distintos porcentajes de aditivos y adiciones en función de las variables pertenecientes a cada ensayo, relacionados con fluidez, absorción y resistencia.

Los resultados finales permitieron emitir conclusiones importantes sobre la durabilidad de las muestras y la resistencia a compresión a los catorce (14) días.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	I
SINOPSIS.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
INDICE DE FIGURAS.....	V
INDICE DE ANEXOS.....	VI
CAPITULO I: EL PROBLEMA.....	1
1.1. EL PROBLEMA.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Justificación.....	1
1.2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO.....	3
1.3.1. Alcance y limitaciones.....	3
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO.....	4
2.1. ANTECEDENTES.....	4
2.2. BASE TEÓRICA.....	6
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	9
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
3.2. MATERIALES EMPLEADOS.....	9
3.3. EQUIPOS E INSTRUMENTOS EMPLEADOS.....	12
3.4. VARIABLES EN ESTUDIO.....	13
3.5. MUESTREO.....	14
CAPITULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	27
4.1. RESULTADOS.....	27
CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	37
5.1. CONCLUSIONES.....	37
5.2. RECOMENDACIONES.....	40
REFERENCIAS.....	42
ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Granulometría del agregado grueso.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabla 2. Granulometría del agregado fino.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3. Distribución de series con probetas cilíndricas.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabla 4. Porcentajes de aditivos y adiciones por serie.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 5. Resumen de diseños de mezcla para cada serie.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 6. Resumen de diseños de mezcla por m³.....</i>	<i>23</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema básico sobre las mediciones de resistividad eléctrica.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. Curva granulométrica del agregado grueso.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4. Cenizas volantes.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 5. Polvo calizo.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6. Microsílice.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7. Fases de ejecución.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 8. Masas de agregados con respecto a β en un molde de probetas cilíndricas.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 9. Pasantes acumulados de agregados con respecto a β.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 10. Pruebas de aditivos con pasta de cemento.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 11. Estudio de pasta de cemento con SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 12. Pruebas de aditivos con mortero.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 13. Ecurrimiento en morteros, para WT-100 y SIKAPLAST-450.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 14. Absorción en muestras de mortero con WT-100.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 15. Resistencias de pasta de cemento con SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 16. Resistencias de mortero con WT-100, SIKAPLAST-450 y cenizas volantes.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 17. Variaciones de asentamiento con respecto a la relación a/c.....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 18. Variaciones en las dosis de cemento aplicadas con respecto a la relación a/c.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 19. Ensayo de escurrimiento con concreto fresco en serie P3.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 20. Equipos Resipod e Hygropin.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 21. Variación de la resistividad eléctrica con respecto al tiempo.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 22. Variación de la humedad interna con respecto al tiempo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 23. Variación de la temperatura interna con respecto al tiempo.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 24. Tendencias de resistividad eléctrica con respecto a la humedad interna.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25. Tendencias de resistividad eléctrica con respecto a la temperatura interna.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 26. Tendencias de temperatura interna con respecto a la humedad interna.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 27. Variación de resistividad eléctrica con respecto a la resistencia a compresión.....</i>	<i>35</i>

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO “A”.....	44
Anexo 1. Diseño de Mezcla P0.....	45
Anexo 2. Diseño de Mezcla P1.....	45
Anexo 3. Diseño de Mezcla P2 (0.45% SIKAPLAST-450).....	45
Anexo 4. Diseño de Mezcla P2 (0.6% SIKAPLAST-450).....	45
Anexo 5. Diseño de Mezcla P3.....	46
Anexo 6. Diseño de Mezcla P4.....	46
Anexo 7. Diseño de Mezcla P5.....	46
Anexo 8. Diseño de Mezcla P6.....	46
Anexo 9. Diseño de Mezcla P7.....	47
Anexo 10. Diseño de Mezcla P8.....	47
Anexo 11. Diseño de Mezcla P7*.....	47
Anexo 12. Resistividad eléctrica en función del tiempo.....	48
Anexo 13. Humedad interna en función del tiempo.....	48
Anexo 14. Temperatura interna en función del tiempo.....	48
Anexo 15. Control de durabilidad para P0.....	49
Anexo 16. Control de durabilidad para P1.....	49
Anexo 17. Control de durabilidad para P2.....	50
Anexo 18. Control de durabilidad para P3.....	50
Anexo 19. Control de durabilidad para P4.....	51
Anexo 20. Control de durabilidad para P5.....	51
Anexo 21. Control de durabilidad para P6.....	52
Anexo 22. Control de durabilidad para P7.....	52
Anexo 23. Control de durabilidad para P8.....	53
Anexo 24. Control de durabilidad para P3*.....	53
Anexo 25. Control de durabilidad para P7*.....	54
Anexo 26. Resistividad eléctrica en función de la humedad interna.....	54
Anexo 27. Resistividad eléctrica en función de la temperatura interna.....	55
Anexo 28. Temperatura interna en función de la humedad interna.....	55
Anexo 29. Registro de probetas cilíndricas.....	56

ANEXO “B”.....	57
Anexo 30. Materiales empleados.....	58
Anexo 31. Aditivos WT-100, SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.....	58
Anexo 32. Equipo Ibertest para ensayos de resistencia a compresión.....	58
Anexo 33. Inconvenientes a nivel superficial en muestras con pasta de cemento.....	58
Anexo 34. Retardo de fraguado por exceso de aditivos en serie P7*.....	59
Anexo 35. Lectura nula en serie P7* a las 40 horas de evaluación.....	59
Anexo 36. Procedimiento para manejo de Microsílice.....	59
Anexo 37. Colocación de conductos en probetas.....	59
Anexo 38. Procedimiento de mezcla para concreto.....	60
Anexo 39. Disminución de asentamientos en serie P3 debido a aumentos de relación a/c.....	60
Anexo 40. Pérdida de fluidez en serie P3 debido a aumentos de relación a/c.	60
Anexo 41. Ensayos de resistencia a compresión en cubos.....	61
Anexo 42. Algunas probetas de concreto sometidas a ensayos de carga axial.....	61

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1. EL PROBLEMA

1.1.1. Planteamiento del problema

El interés por la optimización de los diseños de mezcla del concreto siempre ha estado presente en el sector de la construcción, demostrado mediante estudios experimentales que contemplan las distintas sollicitaciones y condiciones ambientales adversas que pueden atentar contra los sistemas estructurales. En este camino del conocimiento, donde se busca generar edificaciones más seguras y eficientes, en cuanto a gestión de recursos y mitigación del impacto ambiental, resulta indispensable por un lado reforzar tanto cualitativa como cuantitativamente las investigaciones dedicadas a parámetros de durabilidad, y por otro proponer nuevas ideas que sean factibles y a la vez favorables para los procesos asociados a esta área de trabajo, a nivel nacional e internacional.

1.1.2. Justificación

Tomando en consideración estos planteamientos y las herramientas disponibles para desarrollar estudios relevantes, nace el interés en el área de aditivos y adiciones, como productos que, además de aportar resistencia, tienen potencial para influir en la durabilidad, debido a su intervención en los procesos físicos y químicos de las mezclas del concreto, respecto a trabajabilidad, fraguado, permeabilidad, entre otros.

El hecho de evaluar su incidencia y aprovechar de manera adecuada sus virtudes (como por ejemplo reducir la relación a/c), puede traer a la comunidad distintos beneficios, no solo en términos de una mejor gestión de recursos (en cuanto a las dosificaciones de estos productos), sino también en la reducción del consumo de cemento, y por ende de las emisiones de CO₂ por parte de la industria cementera, que según la Asociación Global de Cemento y Concreto "GCCA", rondan entre el 5 y el 8% a nivel mundial, y se trabaja en la actualidad con el plan titulado "Ambición Climática 2050", para hacer frente a esta problemática (GCCA, s.f.).

Es por ello que, desde el punto de vista de optimización, de lograr diseños de mezcla con mayor calidad y seguridad para la población, en esta investigación se decidió corroborar el verdadero efecto de estos componentes sobre la vida útil del concreto estructural, ante la posibilidad de proporcionar información interesante sobre el manejo de los materiales de construcción, ya que en la actualidad los datos disponibles sobre este tema son reducidos y requieren de más procedimientos experimentales.

Para alcanzar esta meta, existen varias opciones que permiten estimar la durabilidad del concreto, entre las cuales destaca la medición de resistividad eléctrica. Considerada como un parámetro que define la capacidad propia del material de evitar el desplazamiento de electrones en su interior, cuenta con una base importante en trabajos y artículos de investigación, donde se utiliza como un indicador preciso de la vida útil, debido a su relación con el grado de permeabilidad, la corrosión del acero de refuerzo, la carbonatación, entre otros. A partir de este método, en conjunto con mediciones de humedad y temperatura interna del material, es posible obtener resultados que sustenten la hipótesis inicial sobre los aditivos y las adiciones, conociendo las experiencias previas de otros autores.

1.2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Objetivo general

Analizar los efectos de aditivos y adiciones sobre la durabilidad del concreto estructural.

1.2.2. Objetivos específicos

Evaluar la incidencia de aditivos y adiciones sobre la resistividad eléctrica del concreto estructural.

Evaluar la incidencia de aditivos y adiciones sobre la humedad interna del concreto estructural.

Evaluar la incidencia de aditivos y adiciones sobre la temperatura interna del concreto estructural.

1.3. ALCANCE DEL ESTUDIO

1.3.1. Alcance y limitaciones

En este trabajo especial de grado se presenta la realización de ensayos destructivos y no destructivos con muestras de pasta de cemento, mortero y concreto, tal que se garantice el concepto de “repetibilidad”, es decir, varias probetas con las mismas condiciones, y de “reproducibilidad”, en referencia a varias probetas modificando una o más condiciones (relacionadas al manejo de aditivos y adiciones), lo cual permite un estudio más completo según los objetivos propuestos.

La parte experimental va desde estudios previos y complementarios con pasta de cemento y mortero, tomando en cuenta variaciones en porcentajes de aditivo o adición aplicado, hasta la elaboración y medición de probetas de concreto pertenecientes a la población del estudio, en un lapso de catorce (14) días.

El esquema de medición de cada una de las variables planteadas fue implementado de forma diaria, con ayuda de equipos proporcionados por el Laboratorio de Tecnología de Materiales UCAB (lugar definido para todo el proceso).

Los materiales utilizados, además de ser provenientes en su gran mayoría del territorio nacional (Venezuela), fueron condicionados de un lado por la disponibilidad en el laboratorio, y de otro por las empresas interesadas en facilitar no solo los aditivos y adiciones para el proceso, sino también los agregados y cualquier otro elemento necesario para la elaboración de muestras.

Los diseños de mezcla se centraron en obtener resistencias comerciales (280 – 320 kgf/cm²) y en llevar un control sobre la variación de los asentamientos y las dosis de cemento empleadas.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Goncalves, J.; Albi, J.; Tutor: Ing. MSc. Bonilla, G. (2022). *“Incidencia del polvo calizo en las propiedades del concreto estructural”*. Universidad Católica Andrés Bello (Venezuela).

Trabajo especial de grado dedicado al polvo calizo y su incidencia sobre las propiedades del concreto estructural, para muestras distribuidas en tres (3) resistencias nominales: 210, 280 y 320 kgf/cm², con distintos porcentajes de esta adición en función del agregado grueso. Se estudiaron aspectos como la absorción capilar, la densidad y la resistencia resultante de ensayos a compresión. En el análisis se demuestran disminuciones en la altura de absorción capilar, a medida que aumenta el porcentaje de polvo calizo, así como también crecimiento en la densidad al aumentar el pasante del tamiz N° 200, y límites específicos en las dosificaciones en cuanto a resistencias máximas.

Romero, H. L.; Gálvez, J. C.; Lucea, I.; Moragues, A. (2012). *“Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsílíce y nanosílíce”*. Universidad Politécnica de Madrid (España). 3er Congreso Iberoamericano sobre hormigón autocompactante.

Artículo científico que trata del uso de adiciones en el hormigón, específicamente microsílíce y nanosílíce, evaluando el comportamiento mecánico del material y su durabilidad, manteniendo constante la cantidad de cemento, agregados, agua y aditivos (plastificantes). Para ello, por un lado se realizaron ensayos de resistencia a compresión, y por otro, pruebas asociadas a durabilidad, como medición de permeabilidad, migración de cloruros, resistividad eléctrica, resistencia frente a ciclos hielo deshielo y porosimetría por intrusión de mercurio. En cuanto a las conclusiones de este desarrollo experimental, se habla de un aumento en la resistencia a compresión en muestras con estos materiales, al igual que la durabilidad en cada uno de los métodos utilizados, sobre todo con el humo de sílice (microsílíce), y que su combinación con otros aditivos u adiciones en algunos casos beneficia el comportamiento en condiciones desfavorables.

Peñarroja, O. G.; Tutor: Palencia, J. J. (2015). *“Influencia de aditivo en la durabilidad del hormigón estructural”*. Universitat Jaume (Castellón de la Plana, España).

Trabajo de grado que apunta al estudio de los aditivos, específicamente los modelos SIKAMENT-230 (plastificante) y SIKAPLAST-380 (superplastificante), y su influencia sobre la durabilidad del hormigón estructural, ante la incertidumbre de si estos productos químicos, cuyo objetivo principal es la reducción del agua en la mezcla y lo cual trae consigo distintas ventajas, puede generar un cambio relacionado con la vida útil del material.

Para ello, el autor se basa en tres características propias de la durabilidad: medición de resistividad eléctrica, profundidad de penetración de agua bajo presión (impermeabilidad) y profundidad del frente de carbonatación, variando exclusivamente la cantidad de aditivo en las muestras. Entre las conclusiones emitidas se destaca que por las tres metodologías no se logra observar una tendencia significativa en cuanto a la incidencia de estos modelos de aditivos, caso contrario a los ensayos destructivos, en donde si se logra detectar un ligero aumento en las resistencias a compresión de las muestras, algo de esperarse según la gran cantidad de experiencias realizadas en este ámbito.

2.2. BASE TEÓRICA

2.2.1. Concreto fluido o autocompactante (HAC)

Bobo et al (2007) lo definen como aquel diseñado para obtener una consistencia fluida en la mezcla, capaz de rellenar espacios de vaciado solo por su propio peso, sin representar disminuciones apreciables en calidad. Entre los materiales necesarios para su obtención, se destaca el pasante del tamiz N° 200 y los aditivos superplastificantes.

2.2.2. Durabilidad

Según el Comité Conjunto del Concreto Armado “CCCA” (1966), se refiere a la propiedad de morteros y concretos de resistir la acción continua de agentes destructivos, influenciados en gran parte por el grado de permeabilidad de estos materiales, debido a los procesos físicos y químicos que puede generar la humedad sobre las estructuras.

2.2.3. Permeabilidad

Vélez (2010) describe a la permeabilidad como una propiedad inherente del material, asociada a la recepción y retención de líquidos, en función del grado de porosidad existente.

2.2.4. Reología

Según Bermejo (2009), es una ciencia dedicada al estudio de la deformación y el flujo de los materiales ante tensiones de origen externo, aplicable al concreto, cuya estructura interna es compleja debido a sus propiedades elásticas y viscosas, y se suele relacionar con el uso de aditivos, para describir el comportamiento en la pasta de cemento.

2.2.5. Aditivos

Según Calleja (1969), son sustancias que se añaden en pequeñas dosis al concreto fresco, con el objetivo de modificar propiedades fisicoquímicas según su uso, y a su vez optimizar parámetros como la relación agua/cemento. Siguiendo las especificaciones de la Norma COVENIN 356 (SENCAMER, 1994), se cuenta con distintos tipos de aditivos:

- **Reductores de agua o “plastificantes”:** destinados a mejorar la consistencia de la mezcla, reduciendo los requerimientos de agua (por lo menos un 5%), con aumentos en la trabajabilidad en estado fresco y la resistencia mecánica en estado endurecido. Cuentan con variantes de alto rango, comúnmente llamados “superplastificantes”, cuyo efecto sobre la mezcla es mayor y pueden reducir al menos 15% del agua.
- **Retardadores:** aquellos con la función de retardar el fraguado del concreto, por lo general en condiciones adversas en obra, como altas temperaturas y traslados en trayectos considerables (ANFAH, s.f.).
- **Aceleradores:** a diferencia de los retardadores, su objetivo es acelerar el proceso de fraguado y el desarrollo de la resistencia inicial del concreto, normalmente en condiciones de temperatura baja o en ocasiones donde los tiempos de entrega de la obra son reducidos (ANFAH, s.f.).

Adicionalmente, se suele trabajar desde hace mucho tiempo con aditivos hidrófugos o impermeabilizantes, cuyo propósito es obstaculizar la entrada del agua al concreto endurecido (Hernández, 2005), y aditivos inclusores o incorporadores de aire, capaces de mejorar la trabajabilidad de la mezcla a partir del suministro de burbujas semi microscópicas (ANFAH, s.f.).

2.2.6. Adiciones

Según el Art. 30 de la Instrucción EHE-08 (Comisión Permanente del Hormigón, 2010), son materiales inorgánicos o puzolánicos que divididos en granos muy finos pueden añadirse al concreto, con el objetivo de mejorar sus propiedades o bien aplicarles características especiales. Las principales alternativas mostradas en el mencionado documento son:

- **Cenizas volantes:** residuos sólidos recolectados de quemadores en centrales termoeléctricas o de cualquier otro establecimiento con maquinarias que utilicen carbones pulverizados. Producen fluidez, compacidad y aumentos en las resistencias mecánicas a largo plazo (Peláez, 2014).

- **Microsílice:** proviene de la reducción de cuarzo con carbón en hornos de arco eléctrico, típicos en la producción de silicio. Con su gran finura, aporta compacidad y resistencia mecánica al concreto, sin incurrir en excesos, ya que puede producir reducciones de pH y por tanto carbonatación (Comisión Permanente del Hormigón, 2010).

A parte de estas adiciones, Peláez (2014) añade el polvo o filler calizo, un árido fino normalmente considerado en el grupo de los agregados, el cual otorga cohesión y trabajabilidad a la mezcla, ayudando a evitar problemas de segregación.

2.2.7. Resistividad eléctrica

Badilla (2014) describe a la resistividad eléctrica del concreto como su capacidad de resistir el paso de corrientes eléctricas (electrones) por medio de su masa, lo cual implica la permeabilidad y el grado de saturación de los poros, y justifica los estudios de durabilidad en base a este parámetro, útil para la detección de inconvenientes como la penetración de cloruros y la velocidad de corrosión. Entre los factores que pueden incidir en la resistividad eléctrica se resalta la relación agua/cemento, la calidad de los agregados, el proceso de hidratación de la pasta de cemento, y cualquier otro aspecto ligado al diseño de mezcla y el vaciado.

Para cuantificar la resistividad, Andrade y D'Andrea (2011) exponen el uso de la “Ley de Ohm”, aplicando este parámetro como una propiedad volumétrica del concreto, es decir:

$$R = V/I = \rho * a/A \quad (1)$$

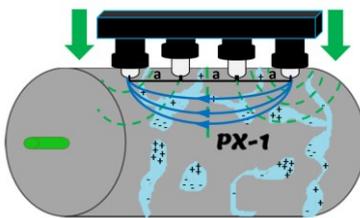


Figura 1. Esquema básico sobre las mediciones de resistividad eléctrica.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Donde:

R: Resistencia eléctrica (kΩ); V: Voltaje aplicado (kV); I: Intensidad de corriente (A);
a: Distancia entre electrodos del equipo medidor (cm); A: Área transversal del paso de corriente (cm²); ρ: Resistividad eléctrica (kΩcm).

CAPITULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Este trabajo desde el punto de vista de la investigación califica como experimental, ya que se manipulan variables y se evalúa en consecuencia el comportamiento de muestras, en cuanto a fluidez, absorción, durabilidad y resistencia mecánica, bajo condiciones ambientales.

3.2. MATERIALES EMPLEADOS

- **Agua:** potable, disponible en la Universidad Católica Andrés Bello (Montalbán, Caracas).
- **Cemento:** Portland Tipo I “Cerro Azul”.
- **Agregado grueso:** piedra picada de tamaño máximo ¾” “O’Rey”.

Tabla 1. Granulometría del agregado grueso.

NORMA COVENIN 277					
Abertura (mm)	Código de Cedazo	Masa retenida (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
63.5	2 1/2	0.0	0.00	0.00	100.00
50.8	2	0.0	0.00	0.00	100.00
38.1	1 1/2	0.0	0.00	0.00	100.00
25.4	1	0.0	0.00	0.00	100.00
19.1	3/4	220.4	11.89	11.89	88.11
12.7	1/2	920.1	49.63	61.52	38.48
9.53	3/8	449.1	24.23	85.75	14.25
6.35	1/4	228.7	12.34	98.09	1.91
4.76	#4	25.5	1.38	99.46	0.54
2.38	#8	3.8	0.21	99.67	0.33
1.19	#16	0.0	0.00		
0.595	#30	0.0	0.00		
0.298	#50	0.0	0.00		
0.149	#100	0.0	0.00		
Pasante #100		6.1	0.33	100.00	
Total		1853.7			

Fuente: Elaboración propia (2023).

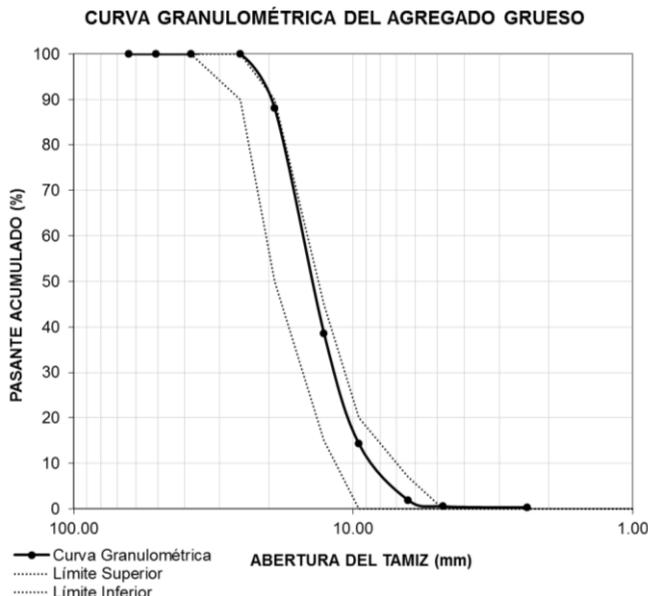


Figura 2. Curva granulométrica del agregado grueso.

Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Agregado fino:** arena de río “Casalbeach”.

Tabla 2. Granulometría del agregado fino.

NORMA COVENIN 277					
Abertura (mm)	Código de Cedazo	Masa retenida (g)	Retenido (%)	Retenido acumulado (%)	Pasante acumulado (%)
63.5	2 1/2	0.0	0.00	0.00	100.00
50.8	2	0.0	0.00	0.00	100.00
38.1	1 1/2	0.0	0.00	0.00	100.00
25.4	1	0.0	0.00	0.00	100.00
19.1	3/4	0.0	0.00	0.00	100.00
12.7	1/2	0.0	0.00	0.00	100.00
9.53	3/8	18.78	0.66	0.66	99.34
6.35	1/4	175.60	6.18	6.84	93.16
4.76	#4	196.40	6.91	13.75	86.25
2.38	#8	520.34	18.31	32.06	67.94
1.19	#16	652.30	22.95	55.01	44.99
0.595	#30	473.40	16.66	71.66	28.34
0.298	#50	450.00	15.83	87.50	12.50
0.149	#100	239.60	8.43	95.93	4.07
0.074	#200	79.81	2.81	98.73	1.27
Pasante #200		36.0	1.27	100.00	
Total		2842.2			
% Tamiz #200		2.81			
Módulo de Finura		3.56			

Fuente: Elaboración propia (2023).

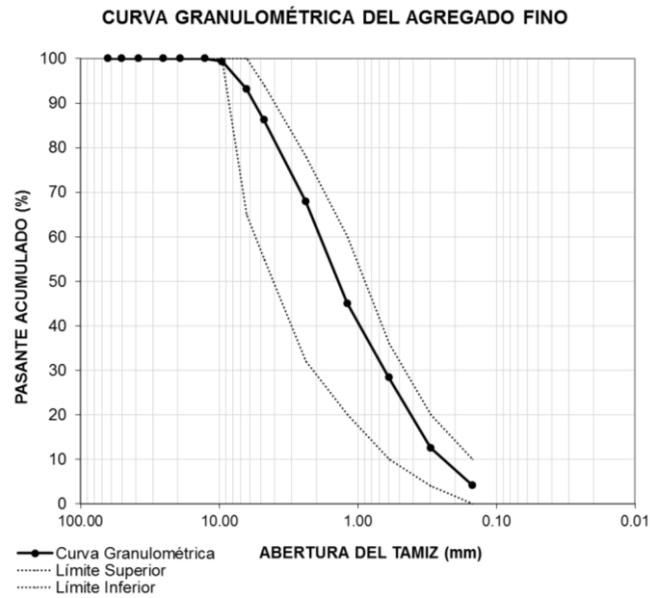


Figura 3. Curva granulométrica del agregado fino.

Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Aditivo Hidrófugo o Impermeabilizante:** WT-100.
- **Aditivo Superplastificante:** SIKAPLAST-450.
- **Aditivo Plastificante:** PLASTIMENT-500.
- **Adición:** Cenizas volantes.



Figura 4. Cenizas volantes.

Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Adición:** Polvo calizo.



Figura 5. Polvo calizo.

Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Adición:** Microsilíce.



Figura 6. Microsilíce.

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.3. EQUIPOS E INSTRUMENTOS EMPLEADOS

- Mezcladora industrial para pasta de cemento y mortero.
 - Cono de Marsh.
 - Cono de Abrams con barra compactadora, embudo y plancha.
 - Plancha lisa para ensayo de escurrimiento.
 - Mezcladora de concreto.
-

- Moldes para cubos y cilindros.
- Máquina de ensayos a compresión para cilindros y cubos.
- Resistivímetro para concreto.
- Medidor de humedad y temperatura.
- Cilindros graduados de plástico y vidrio.
- Balanzas y recipientes.
- Cucharas y palustres de albañil.
- Cono de compactación.
- Cámara de agua.
- Inyectadora.
- Horno para materiales granulares.
- Equipo de seguridad personal ante agentes nocivos.

3.4. VARIABLES EN ESTUDIO

3.4.1. Variables dependientes

- Tiempo de drenaje del Cono de Marsh “ t_m ” (seg).
- Asentamiento en Cono de Abrams (cm ó pulg).
- Diámetros “ $D_{máx}$ ” en ensayos empíricos de escurrimiento (cm).
- Resistividad eléctrica ($k\Omega\text{cm}$).
- Temperatura interna (%).
- Absorción (%).
- Resistencia a compresión (kgf/cm^2).

3.4.2. Variables independientes

- Tiempo (horas).
- Humedad interna (%).
- Dosificación de agregado fino y grueso (kg/m^3).
- Dosificación de cemento (kg/m^3).
- Dosificación de agua (litros/m^3).
- Dosificación de aditivos y adiciones (% de masa cementante).

3.5. MUESTREO

3.5.1. Población

Conformada por treinta y tres (33) probetas cilíndricas de dimensiones estándar en promedio (15x30 cm), distribuidas en once (11) series de tres (3) cada una, a las cuales se realizaron mediciones de resistividad eléctrica, humedad y temperatura interna, así como también ensayos de resistencia a compresión a los catorce (14) días. Adicionalmente, se evaluaron ochenta y dos (82) cubos de 5 cm cada lado, distribuidos en pasta de cemento y mortero, para estudiar las posibles dosificaciones de aditivos y adiciones a emplear en las probetas cilíndricas, y profundizar en el comportamiento de estos.

Tabla 3. Distribución de series con probetas cilíndricas.

Componente / Serie	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P3*	P7*
Piedra	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Arena	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cemento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Agua	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Aditivo – WT-100		X						X	X		X
Aditivo – SIKAPLAST-450			X					X	X		X
Aditivo – PLASTIMENT-500				X						X	
Adición - Cenizas volantes					X			X			X
Adición - Polvo calizo						X			X		
Adición - Microsílice							X				

Fuente: Elaboración propia (2023).

Resulta importante mencionar que las series P3* y P7* representan pruebas iniciales con exceso de aditivos (según los rangos indicados por el fabricante), que se mantuvieron en el proceso de análisis por motivos de investigación (véase Anexo 34 y 35).

3.5.2. Muestra

En cuanto a las mediciones de durabilidad, la muestra está representada por la totalidad de las probetas cilíndricas de la población (33), mientras que para los ensayos de resistencia a compresión, solo se contempla veinte y dos (22) de estas, además de los ochenta y dos (82) cubos correspondientes a los estudios de fluidez y absorción.

3.5.3. Fases de ejecución

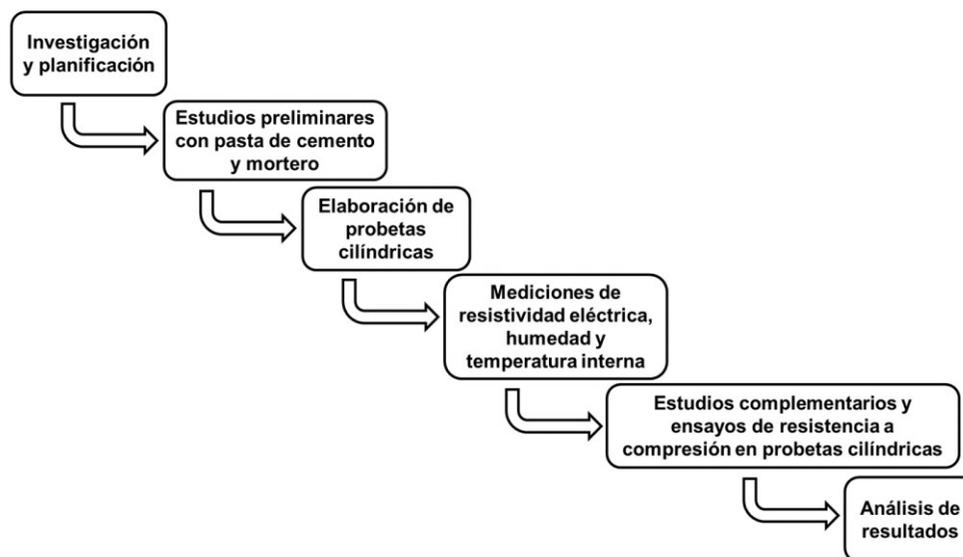


Figura 7. Fases de ejecución.

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.5.4. Dosificación de agua y cemento

Según la Instrucción EHE-08 (Comisión Permanente del Hormigón, 2010), para la obtención de un concreto durable en el tiempo se requiere la disminución de su permeabilidad, mediante la obtención de una relación agua/cemento lo más baja posible, así como también una adecuada dosificación de cemento y su hidratación. En el caso de estudio, se decidió observar la variabilidad de las mezclas en cuanto a asentamientos, a medida que la relación agua/cemento aumenta, tomando en cuenta la consistencia alcanzada y las facilidades que esta permita para su vaciado. A su vez, se decidió trabajar con cantidades de agua añadida similares a la definida inicialmente en la serie de control “P0”, con la intención de valorar mejor la incidencia de los aditivos y adiciones. En cuanto a la cantidad de cemento, se estableció como límite máximo 500 kg/m³ (Comisión Permanente del Hormigón, 2010), y se consideró la necesidad de obtener altas resistencias, de acuerdo a los estándares actuales.

3.5.5. Dosificación de agregados

Definida la cantidad de cemento a emplear, se aplicaron dos metodologías para estimar el porcentaje de agregado fino óptimo a utilizar en las mezclas (β):

$$\beta (\%) = (100 * A) / (A+G) \tag{2}$$

Donde:

A: Masa de agregado fino (g); G: Masa de agregado grueso (g).

- **Método Práctico:**

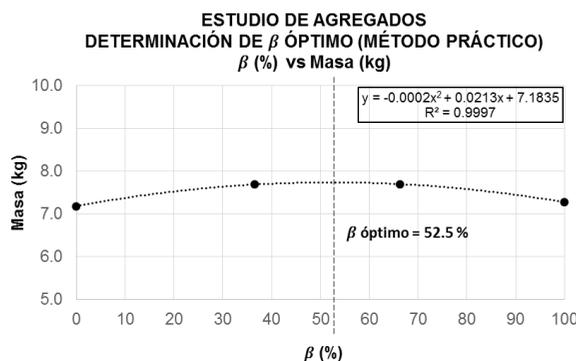


Figura 8. Masas de agregados con respecto a β en un molde de probetas cilíndricas.

Fuente: Elaboración propia (2023). Se determina un β óptimo a un 52.5%.

- **Método Granulométrico (Porrero et al, 2014):**

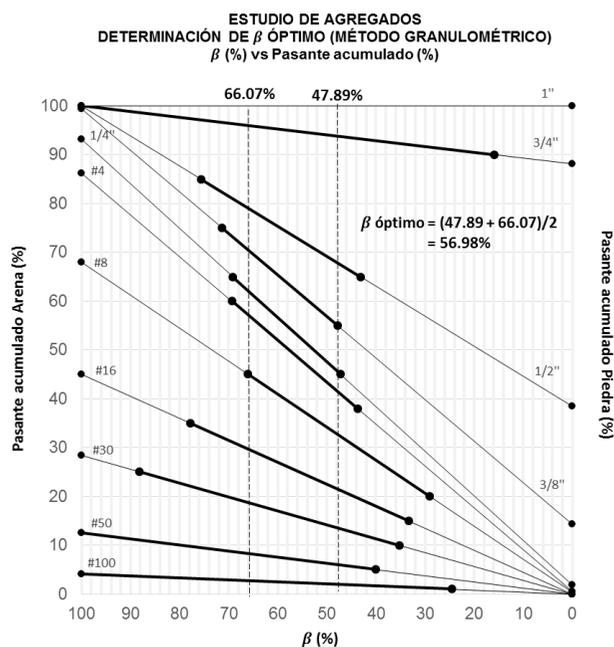


Figura 9. Pasantes acumulados de agregados con respecto a β .

Fuente: Elaboración propia (2023). Se determina un β óptimo a un 56.98%.

En la práctica, la dosificación de agregado fino en las probetas de concreto (tomando en cuenta las correcciones por humedad) oscila entre 54 y 55%.

3.5.6. Dosificación de aditivos

Representado como un porcentaje (%) en función de la masa del cemento en la mezcla, la dosis de aditivo a emplear en cada serie se determinó en función de los rangos recomendados por el fabricante, además de estudios con pasta de cemento y mortero:

- **Estudio con Cono de Marsh:** regido por la Norma ASTM C939, permite determinar la variación de fluidez en la pasta de cemento con respecto a distintas cantidades de aditivo aplicadas, para estimar la dosis óptima a emplear en la mezcla de concreto. En esta oportunidad se utilizaron los productos SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500, con dosificación recomendada de 0.3 – 0.8% y 0.15 – 0.4% respectivamente.



Figura 10. Pruebas de aditivos con pasta de cemento.

Fuente: Elaboración propia (2023).

El ensayo consiste en registrar un tiempo “ t_m ” que tarda en drenar cierta cantidad de pasta, en este caso 200 ml, con ayuda de un cilindro graduado y un sistema de soporte.

Para relación a/c de 0.4 (seleccionada por razones de reología), se presenta la Figura 11 como resultado de los ensayos de Cono de Marsh. En primer lugar, se detectan similitudes entre las curvas de tendencia de ambos aditivos (de tipo potencial), donde la fluidez que aporta SIKAPLAST-450 es relativamente mayor (menores tiempos de drenaje), con requerimientos inferiores de dosis, a comparación del PLASTIMENT-500. De igual forma, se confirma que este último puede seguir produciendo fluidez para dosis superiores al rango recomendado, con el riesgo de afectar negativamente la durabilidad del material, según las experiencias del muestreo (véase Anexo 33).

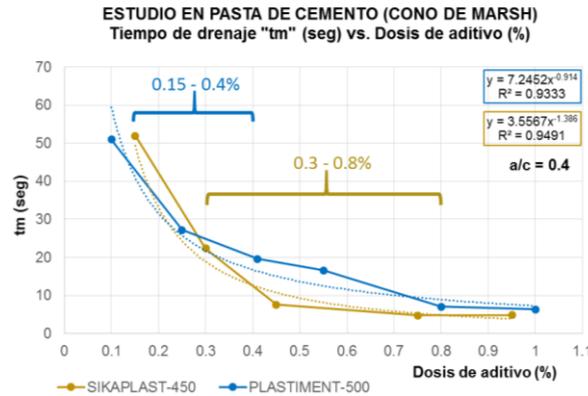


Figura 11. Estudio de pasta de cemento con SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.

Fuente: Elaboración propia (2023).

La dosis óptima por fluidez, predefinida con el SIKAPLAST-450 es de 0.45% de la masa del cemento, para un tiempo de drenaje de 8 segundos, y su punto de saturación se estima para 0.75% con 5 segundos. Para el PLASTIMENT-500 se establece un 0.3% como dosis óptima, para drenaje del Cono de Marsh en 25 segundos, respetando las indicaciones del fabricante, y punto de saturación en 0.8% con 7 segundos aproximadamente.

- **Estudio empírico de escurrimiento:** similar al ensayo de “Cono Invertido” regulado por la Norma ASTM C1611, proporciona información sobre el grado de fluidez en muestras de mortero. Se trabajó con los productos WT-100 (dosificación recomendada 1 – 3%) y SIKAPLAST-450.



Figura 12. Pruebas de aditivos con mortero.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Según Okamura et al (2003), consiste en escurrir una mezcla de mortero mediante un cono de dimensiones reducidas, y al finalizar el movimiento de esta sobre una superficie lisa y húmeda, se miden dos diámetros perpendiculares entre sí, los cuales se pueden promediar y así obtener el diámetro “Dmáx” para un porcentaje de aditivo.

Con el propósito de complementar la evaluación del producto SIKAPLAST-450, se realizó un estudio con el mismo agregado fino y cemento de las probetas de concreto, y un a/c de 0.6, dando como resultado el gráfico de la Figura 13. En esta se incluye el producto WT-100, el cual a pesar de estar destinado a producir impermeabilidad, teóricamente aporta fluidez y los resultados lo respaldan.

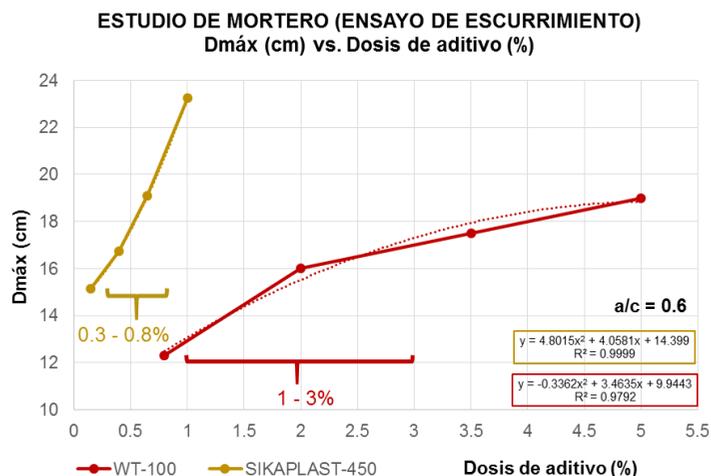


Figura 13. Escurrimento en morteros, para WT-100 y SIKAPLAST-450.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Se observa que el SIKAPLAST-450 es capaz de otorgar mayor fluidez y con menores dosis respecto al WT-100, el cual si bien puede provocar escurrimientos con diámetros de magnitudes similares, se ve limitado por el rango que emite el fabricante a la hora de ser añadido en mortero o concreto (1 – 3%). Por otra parte, a diferencia del estudio con pasta de cemento, en estos ensayos con morteros no se logra determinar una dosis óptima en específico para el SIKAPLAST-450, debido a la forma que adopta la curva de tendencia mostrada. No obstante, se comprueba sin inconvenientes el desarrollo de la reología en la mezcla.

- **Estudio de absorción:** para estimar la dosis óptima del aditivo WT-100 en cuanto a impermeabilidad, se sometieron muestras de mortero a ensayos de absorción, secándolas previamente al horno por un (1) día a 100 °C.

$$\% \text{Absorción} = ((\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}) / (\text{Masa seca})) * 100 \quad (3)$$

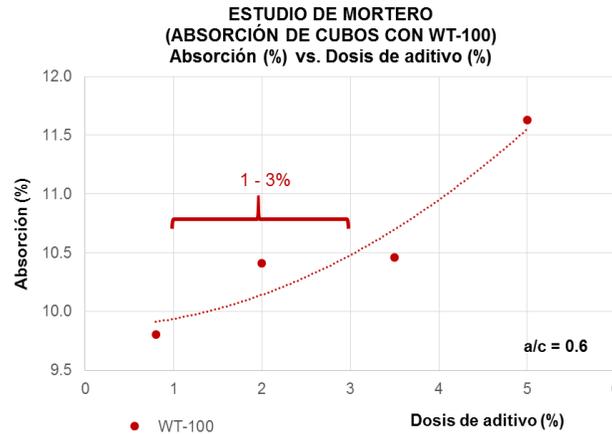


Figura 14. Absorción en muestras de mortero con WT-100.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En base a esto, se registró la curva de la Figura 14, para cuatro dosis distintas, y en donde se puede apreciar que alrededor del 1% de la masa cementante se logra un menor porcentaje de absorción y por ende una mayor impermeabilidad del material.

- Ensayos de resistencia a compresión:** en lo que se refiere a muestras con pasta de cemento, se ejecutaron ensayos de carga axial a los 28 días, tal como puede verse en la Figura 15, donde se evidencian resistencias hasta 520 kgf/cm² para el SIKAPLAST-450, en torno al 0.4%, y resistencias de 510 kgf/cm² para el PLASTIMENT-500, con el 0.15% de masa cementante. Se puede apreciar la caída de resistencia a medida que el porcentaje de dosis aplicado para ambos se acerca a los límites fijados por el fabricante, y que la tendencia a mayores resistencias la tiene el SIKAPLAST-450, por diferencias poco significativas.

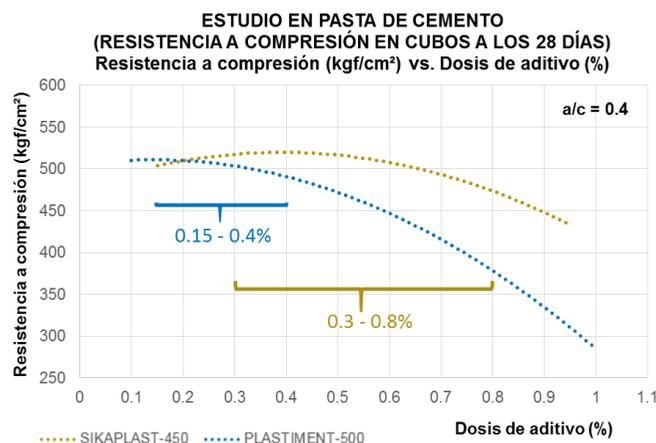


Figura 15. Resistencias de pasta de cemento con SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.

Fuente: Elaboración propia (2023).

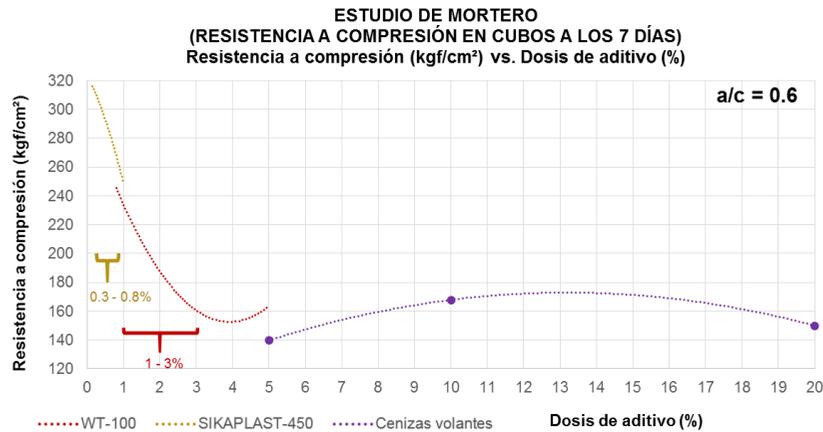


Figura 16. Resistencias de mortero con WT-100, SIKAPLAST-450 y cenizas volantes.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Luego de evaluar tanto fluidez como absorción, se sometieron las muestras de mortero a ensayos de resistencia a compresión a los 7 días, con resultados expuestos en la Figura 16, que demuestran el contraste entre ambos aditivos. Por el lado del SIKAPLAST-450, se alcanzan las mayores resistencias (320 kgf/cm²) alrededor del 0.4% con descensos apreciables a dosis superiores, mientras que para el WT-100, las resistencias más altas (250 kgf/cm²) se encuentran en torno al límite inferior recomendado, con disminuciones hacia el 3%. La curva restante en dicha figura corresponde a mortero con 5, 10 y 20% de cenizas volantes (adición), considerada para seleccionar una cantidad adecuada en la serie P4, en este caso con resistencias superiores en 10% (170 kgf/cm²).

3.5.7. Dosificación de adiciones

Al igual que los aditivos, las adiciones se manejan como un porcentaje en función de la masa cementante, y dependiendo de las propiedades mecánicas que aporten al concreto, mediante experiencias de otros autores se conocen dosificaciones recomendadas:

- **Cenizas volantes:** según la Instrucción EHE-08 (Comisión Permanente del Hormigón, 2010), para concreto pretensado no se puede exceder del 20% de la masa cementante, y para concreto postensado 35%. Por otra parte, su combinación con el microsílíce no puede superar el 20%. Para complementar la decisión sobre la cantidad a usar en este estudio, se realizaron pruebas de resistencia a compresión en cubos de mortero con distintos porcentajes de cenizas volantes, como fue descrito anteriormente en base a la Figura 16, en conjunto con la evaluación de aditivos.

- **Polvo calizo:** Goncalves & Albi (2022) en sus estudios exponen que para muestras de concreto con resistencia nominal de 320 kgf/cm², el porcentaje óptimo de polvo calizo en función de la masa del agregado grueso es del 4%. Por ende, para las condiciones de esta investigación se considera un porcentaje aproximado a este, en función de la masa cementante.
- **Microsílice:** para concreto bien sea pretensado o postensado, se recomienda no exceder del 10% de la masa del cemento (Comisión Permanente del Hormigón, 2010), tomando en cuenta la existencia o no de combinaciones con otros aditivos y/o adiciones. Se consideró un rango comúnmente recomendado por distribuidores, de entre 5 – 10%.

3.5.8. Diseños de mezcla

Tabla 4. Porcentajes de aditivos y adiciones por serie.

Serie	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P3*	P7*
WT-100	-	1%C	-	-	-	-	-	0.6%C	0.6%C	-	1%C
SIKAPLAST-450	-	-	0.6%C	-	-	-	-	0.3%C	0.3%C	-	0.45%C
PLASTIMENT-500	-	-	-	0.3%C	-	-	-	-	-	0.5%C	-
Cenizas volantes	-	-	-	-	10%C	-	-	10%C	-	-	10%C
Polvo calizo	-	-	-	-	-	6%C	-	-	6%C	-	-
Microsílice	-	-	-	-	-	-	5%C	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 5. Resumen de diseños de mezcla para cada serie.

Serie	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P3*	P7*
f'c	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
Humedad Piedra (%)	0.30	2.02	2.33	1.10	2.02	1.27	0.78	0.00	1.10	0.20	1.25
Absorción Piedra (%)	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Piedra Gsss (kg)	12.40	12.19	12.15	12.30	12.19	12.28	12.34	12.43	12.30	12.41	12.28
Humedad Arena (%)	4.70	4.69	3.70	3.30	4.69	3.15	3.33	2.08	3.30	3.14	2.38
Absorción Arena (%)	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68	1.68
Arena Asss (kg)	14.61	14.62	14.75	14.81	14.62	14.83	14.81	14.99	14.81	14.84	14.94
β	54.11	54.53	54.84	54.64	54.53	54.72	54.55	54.66	54.64	54.46	54.90
Cemento "C" (kg)	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80	7.80
Agua (litros)	5.35	5.06	4.75	4.55	5.06	4.75	4.72	4.24	4.55	4.87	4.34
a/c	0.69	0.65	0.61	0.58	0.65	0.61	0.60	0.54	0.58	0.62	0.56
WT-100 (litros)	-	0.078	-	-	-	-	-	0.047	0.047	-	0.078
SIKAPLAST-450 (litros)	-	-	0.041	-	-	-	-	0.020	0.020	-	0.041
PLASTIMENT-500 (litros)	-	-	-	0.020	-	-	-	-	-	0.033	-
Cenizas volantes (kg)	-	-	-	-	0.78	-	-	0.78	-	-	0.78
Polvo calizo (kg)	-	-	-	-	-	0.47	-	-	0.47	-	-
Microsílice (kg)	-	-	-	-	-	-	0.39	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia (2023).

Tabla 6. Resumen de diseños de mezcla por m³.

Serie	P0	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P3*	P7*
Volumen de concreto (m ³)	0.0163	0.0167	0.0162	0.0158	0.0172	0.0167	0.0167	0.0168	0.0167	0.0163	0.0165
Piedra (kg/m ³)	760.79	728.21	752.25	778.41	706.57	735.19	738.72	739.02	736.40	763.18	744.76
Arena (kg/m ³)	896.90	873.33	913.49	937.60	847.38	888.29	886.69	890.94	887.00	912.50	906.44
Cemento (kg/m ³)	478.73	466.09	482.92	493.72	452.24	467.08	467.08	463.64	467.08	479.77	473.09
Agua (litros/m ³)	328.43	302.27	294.09	288.01	293.29	284.36	282.43	251.96	272.46	299.39	262.98
a/c	0.69	0.65	0.61	0.58	0.65	0.61	0.60	0.54	0.58	0.62	0.56
WT-100 (litros/m ³)	-	4.66	-	-	-	-	-	2.78	2.80	-	4.73
SIKAPLAST-450 (litros/m ³)	-	-	2.52	-	-	-	-	1.21	1.22	-	1.85
PLASTIMENT-500 (litros/m ³)	-	-	-	1.24	-	-	-	-	-	2.01	-
Cenizas volantes (kg/m ³)	-	-	-	-	45.22	-	-	46.36	-	-	47.31
Polvo calizo (kg/m ³)	-	-	-	-	-	28.02	-	-	28.02	-	-
Microsilíce (kg/m ³)	-	-	-	-	-	-	23.35	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia (2023).

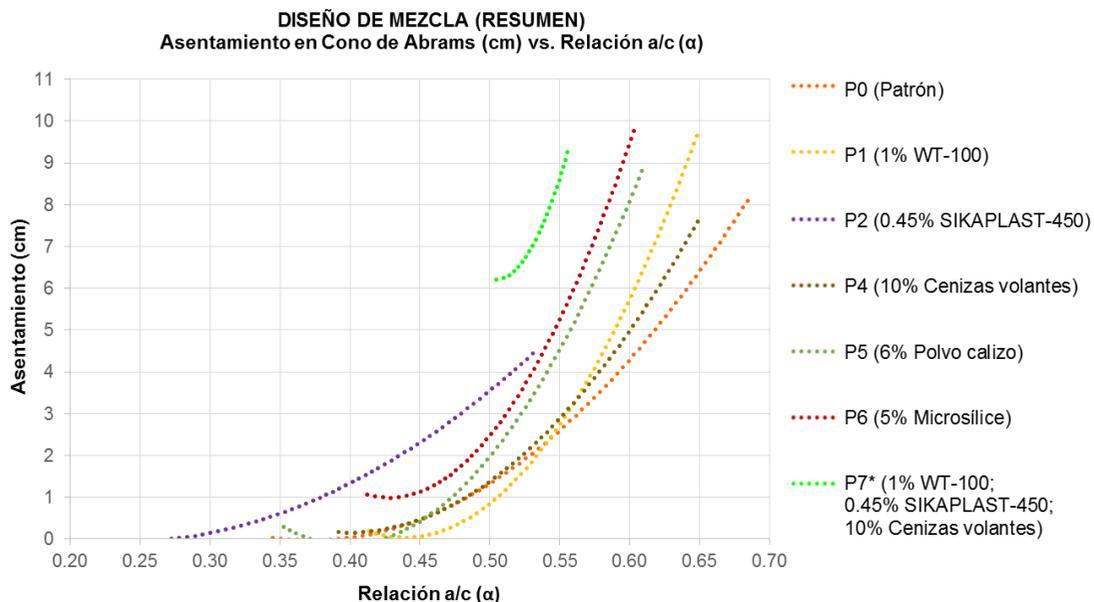


Figura 17. Variaciones de asentamiento con respecto a la relación a/c.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Al momento de elaborar las probetas de concreto de la población, se llevó un control de asentamientos en función del ensayo de Cono de Abrams, variando la cantidad de agua añadida, con dosis de aditivo y/o adición según sea el caso. En general, se trabajó con relaciones a/c altas, debido a las condiciones dadas en las mezclas.

En la Figura 17 se puede apreciar que las curvas de tendencia de las series P1, P5 y P6 tienen cierta similitud en cuanto a desarrollo, con asentamientos finales entre 9 y 10 cm,

para a/c de 0.65, 0.61 y 0.60 respectivamente, lo que se traduce en mayor reducción de agua en la P6 (5% de microsílíce) y menor en la P1 (1% de WT-100).

Para las series P2 y P0 se presentan curvas con crecimiento semejante, donde la P2 (con 0.45% de SIKAPLAST-450) alcanzó un asentamiento de 4.5 cm para a/c de 0.53, mientras que la P0 (patrón) tuvo un asentamiento final de 8 cm para a/c 0.69, con menor reducción de agua respecto a la P2.

La serie P4 (10% de cenizas volantes) muestra un comportamiento intermedio entre las mencionadas anteriormente, con asentamiento final de 7.6 cm para a/c de 0.65, mientras que la P7* (1% WT-100 con 0.45% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes) a pesar de no contar con un registro más completo, registra la tendencia con menor requerimiento de agua en el gráfico, para un asentamiento final de 9.3 cm con a/c 0.56.

En lo que se refiere a las series P2 (para 0.6% de SIKAPLAST-450), P3* (0.5% de PLASTIMENT-500), P3 (0.3% de PLASTIMENT-500), P7 y P8 (combinaciones de aditivos y adiciones indicadas en la Tabla 4), se generaron inconvenientes durante su ejecución, asociados a la interacción de los aditivos plastificantes con la mezcla (véase Anexo 39 y 40). Además de esto, entre las decisiones particulares en los diseños de mezcla, la serie P2 tuvo un aumento en la dosis de aditivo, de 0.45% a 0.6%, durante el mezclado.

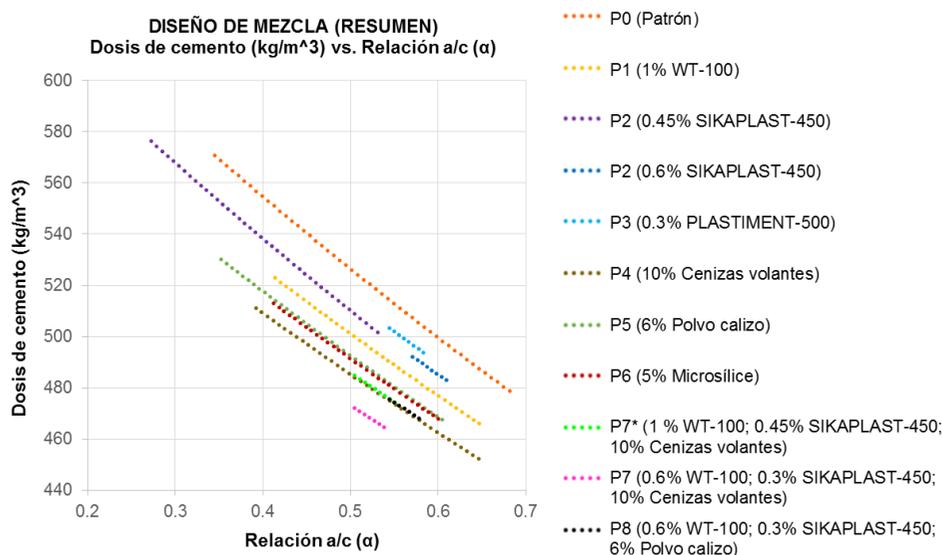


Figura 18. Variaciones en las dosis de cemento aplicadas con respecto a la relación a/c.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Hablando en términos de las dosis de cemento empleadas, según la Figura 18 todas las series adoptan una tendencia descendiente de tipo exponencial, en función del incremento de la relación a/c, con mayores dosis de cemento alcanzadas en la serie P2 con 0.45% de SIKAPLAST-450 (501.55 kg/m³), para a/c de 0.53, y la serie P3 con 0.3% de PLASTIMENT-500 (493.72 kg/m³), para a/c 0.58, mientras que la menor dosis viene dada en la serie P4 con 10% de cenizas volantes (452.24 kg/m³) para a/c de 0.65. Se menciona la semejanza de la serie P5 con la P6 (adiciones), y la P4 con P7* y P8 (aditivos y adiciones), con curvas superpuestas para distintos valores de α .

3.5.9. Mediciones para control de asentamientos

3.5.9.1. Cono de Abrams

Su procedimiento se indica en la Norma COVENIN 339:2021.

3.5.9.2. Ecurrimiento o Cono Invertido

Debido a las consistencias obtenidas durante la elaboración de las mezclas, el estudio del concreto fluido no se ejecutó en su máxima expresión. No obstante, en la serie P3 se presentó la posibilidad de realizar el ensayo de escurrimiento para una relación a/c de 0.54 y dosis de PLASTIMENT-500 de 0.3%, resultando un diámetro promedio de 36.25 cm.



Figura 19. Ensayo de escurrimiento con concreto fresco en serie P3.

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.5.10. Mediciones de resistividad eléctrica, humedad y temperatura interna

Para la resistividad eléctrica se empleó el equipo Resipod (Proceq), el cual funciona según el principio del “Método Wenner”, mediante cuatro sondas separadas a una cierta distancia, en donde las dos exteriores aportan una corriente eléctrica y las dos centrales miden diferencias de potencial entre ellas, generando lecturas del concreto en $k\Omega\text{cm}$.



Figura 20. Equipos Resipod e Hygropin.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En cuanto a la humedad y temperatura interna, se utilizó el equipo Hygropin (Proceq), con una sonda de dos sensores, los cuales captan valores de humedad y temperatura en sitios puntuales. Se colocaron conductos en las probetas durante el vaciado hasta una profundidad media, permitiendo la recolección de datos internos del concreto.

3.5.11. Mediciones de resistencia a compresión en cilindros y cubos

Realizadas con el equipo “Ibertest”, disponible en el laboratorio (véase Anexo 32).

CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Resistividad eléctrica con respecto al tiempo

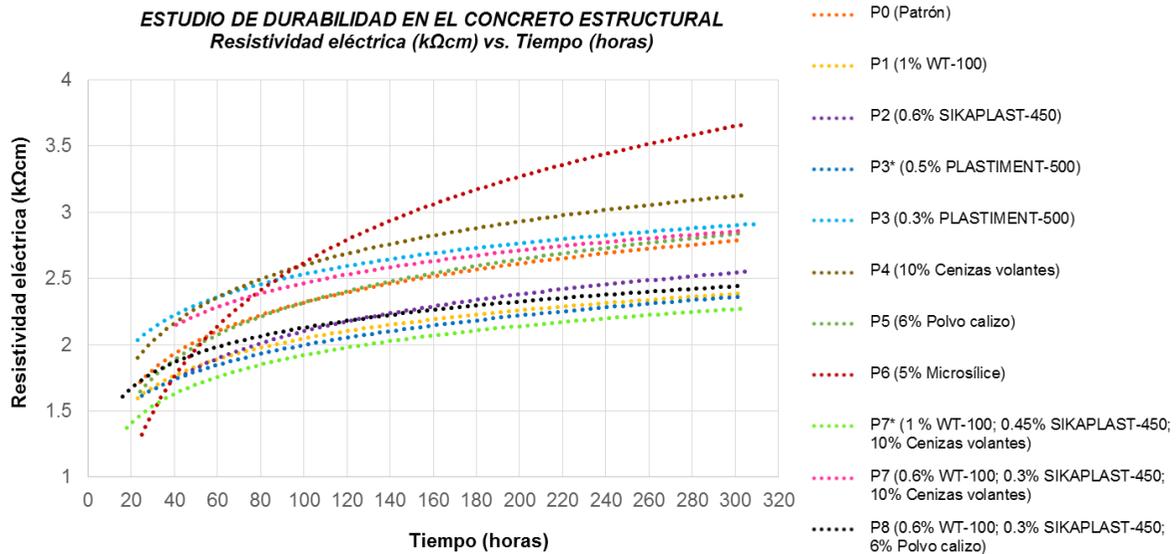


Figura 21. Variación de la resistividad eléctrica con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En la Figura 21 se comparte el gráfico que expone la resistividad eléctrica promedio en función del tiempo transcurrido en cada serie, agregando que todas estas adoptan un comportamiento logarítmico de tendencia ascendente, con cierto paralelismo entre ellas, excepto en la serie P6 (5% de microsilíce), la cual representa el caso con mayor resistividad eléctrica a partir de las 100 horas, con el crecimiento más pronunciado hasta 3.98 kΩcm (véase Anexo 12).

En niveles de importancia, la serie P4 con 10% de cenizas volantes (resistividad final de 2.98 kΩcm) ocupa el segundo lugar, con magnitudes superiores al resto durante todo el período, a la par de la serie P3 con 0.3% de PLASTIMENT-500 (resistividad final de 2.87 kΩcm), durante las primeras 60 horas, con una dosificación que permitió obtener mejores resultados a comparación de la P3* (0.5% de PLASTIMENT-500). A continuación se encuentra la serie P7 con 0.6% de WT-100, 0.3% de SIKAPLAST-450 y 10% de cenizas volantes (resistividad final de 2.8 kΩcm), con una importante tendencia durante el muestreo, pero por debajo de las anteriores descritas. Luego se posiciona la serie P5 con 6% de polvo

calizo (resistividad final de 2.78 kΩcm), con tendencia similar a la serie patrón P0, lo cual hace referencia a un bajo grado de influencia. En los casos con menor resistividad final (entre 2.3 y 2.5 kΩcm) están la P2 (0.6% de SIKAPLAST-450), P8 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 6% polvo calizo), P1 (1% WT-100) y P3*, en ese orden, así como también la P7* (1% WT-100 con 0.45% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes), que se perfila como la serie más desfavorable de la investigación en este ámbito, con interferencias de resistividad en los primeros 3 días de evaluación (véase Anexo 12 y 35).

Tomando en consideración la relación α y las diferencias definitivas entre series, un análisis con mayor precisión a efectos de evaluar la incidencia de aditivos y adiciones en la resistividad eléctrica, viene dado en las siguientes comparaciones:

- **P1 con P4 (a/c de 0.65):** mayor resistividad eléctrica promedio en la serie P4.
- **P2 con P5 (a/c de 0.61):** mayor resistividad eléctrica promedio en la serie P5.
- **P3 con P8 (a/c de 0.58):** mayor resistividad eléctrica promedio en la serie P3.

4.1.2. Humedad interna con respecto al tiempo

Para el parámetro de la humedad interna desarrollada en las muestras, se tiene el gráfico de la Figura 22, el cual demuestra que los datos recogidos van en promedio desde el 91 hasta el 100%.

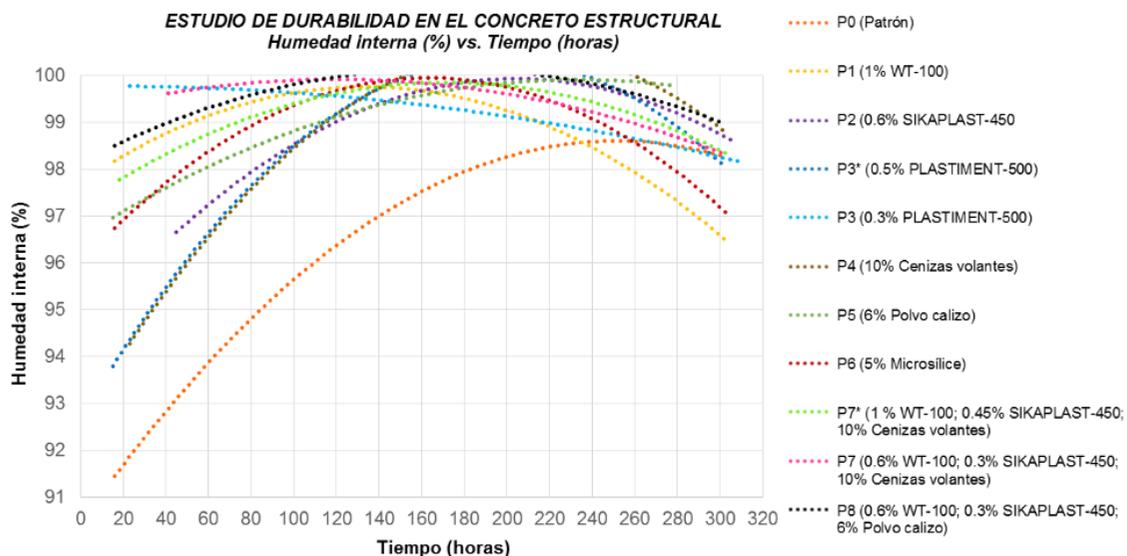


Figura 22. Variación de la humedad interna con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia (2023).

A simple vista, la serie patrón P0 alcanzó en promedio menor porcentaje de humedad interno, desde un 91.5% hasta un 98.5%, pero también experimentó el crecimiento más significativo de la población (7%), hasta un punto de inflexión a las 260 horas.

La P1 en cambio (1% de WT-100), comenzó con humedad entre el 97 y 98%, con proximidad al 100% a las 140 horas, para posteriormente descender a un 96.5%.

Las series P3* (0.5% de PLASTIMENT-500) y P4 (10% de cenizas volantes) resultaron ser compatibles en la mayor parte del muestreo, con humedad inicial entre 94-95%, crecimiento hasta el 100% a las 160 horas, y reducciones desde las 220 horas hasta 97-98%. A este patrón se une la serie P2 (0.6% de SIKAPLAST-450), desde 97%.

Por su parte, P3 (0.3% de PLASTIMENT-500) y P7 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes) desarrollaron una tendencia al 100% de humedad en sus inicios, con descensos continuos hasta un 98%. La P8 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 6% polvo calizo) mostró un comportamiento similar, con descenso de humedad desde las 220 horas, hasta un 99%.

P5 (6% de polvo calizo) y P7* (1% WT-100 con 0.45% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes) presentan curvas prácticamente en paralelo, con crecimiento desde un 97-98%, hasta el 100% a las 180 horas, incluyendo posteriormente descensos en la P7* hasta un 98%.

Por último, la P6 (5% de microsílíce) se tiene un comportamiento relativamente simétrico en 14 días, ya que comienza en un porcentaje de humedad cercano al 97%, asciende al 100% a las 160 horas, y luego desciende hasta el 97% a las 300 horas.

En lo que respecta a la relación a/c, para las comparaciones descritas anteriormente:

- **P1 con P4 (a/c de 0.65):** menor humedad promedio en P1.
- **P2 con P5 (a/c de 0.61):** menor humedad promedio en P2.
- **P3 con P8 (a/c de 0.58):** menor humedad promedio en P3.

En el apartado 4.1.4 se comentan los resultados obtenidos por humedad interna.

4.1.3. Temperatura interna con respecto al tiempo

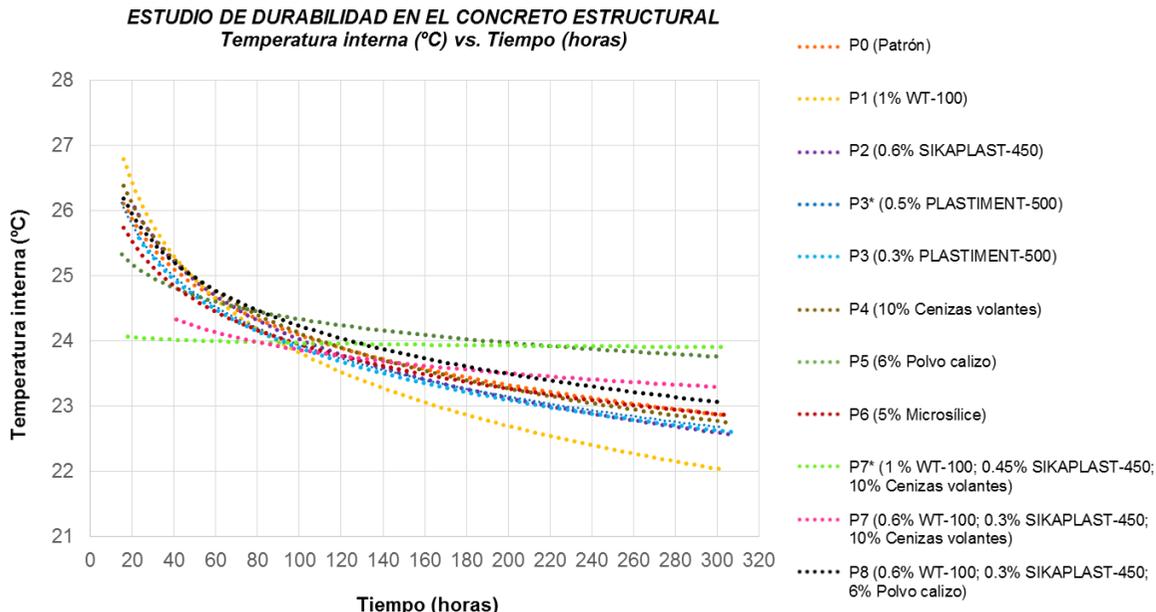


Figura 23. Variación de la temperatura interna con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En la Figura 23 se comparten los registros de temperatura interna de la población con respecto al tiempo, con curvas de comportamiento logarítmico y tendencia descendente.

Se puede observar que las series P0, P2, P3*, P3, P4, P6 y P8 (dosis indicadas en Figura 23) resultaron con tendencia similar de principio a fin, con temperatura inicial entre 26 y 27 °C, y final entre 22.5 y 23.5 °C, en donde la P8 supera ligeramente al resto.

Por otro lado, se detectan cuatro series con contrastes en su comportamiento:

- **P1 (1% de WT-100):** con lectura inicial por encima de los 28 °C (véase Anexo 14), experimentó la caída de temperatura más significativa en el período de evaluación, notable a partir de las 90 horas aproximadamente, llegando hasta los 22 °C en 14 días.
- **P5 (6% de polvo calizo):** a pesar de tener un registro inicial bajo con respecto al promedio (entre 25 y 26 °C), a partir de las 85 horas se posiciona entre las series con mayor temperatura interna, oscilando los 24 °C.

- **P7* (1% WT-100 con 0.45% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes):** con excesos en la dosificación de aditivos, su desarrollo es particular y se puede observar que la variación de temperatura es casi nula, situada alrededor de los 24 °C y por ende entre las series con mayor temperatura, junto a la P5.
- **P7 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes):** ronda en promedio de 24 a 23 °C, y se diferencia ligeramente del resto por sus bajas temperaturas en las primeras 100 horas.

Con este parámetro, para una misma relación α :

- **P1 con P4 (a/c de 0.65):** menor temperatura promedio en P1.
- **P2 con P5 (a/c de 0.61):** menor temperatura promedio en P2.
- **P3 con P8 (a/c de 0.58):** menor temperatura promedio en P3.

Los resultados sobre temperatura interna se comentan en el apartado 4.1.5

4.1.4. Relación entre resistividad eléctrica y humedad interna

Con miras a una mejor comprensión del comportamiento y el posible efecto de aditivos y adiciones, así como también estimar la precisión de las mediciones realizadas, a continuación se relacionan los parámetros correspondientes a los objetivos específicos de este trabajo, mediante un análisis de tendencias con desarrollo exponencial.

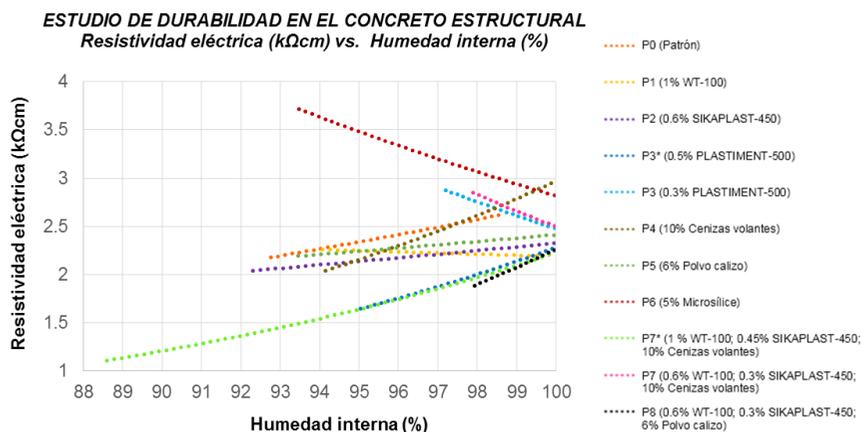


Figura 24. Tendencias de resistividad eléctrica con respecto a la humedad interna.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En la Figura 24 se refleja la tendencia que adopta cada serie de la investigación, para resistividad eléctrica en función de la humedad interna. En la teoría, según Badilla (2014), la resistividad eléctrica y la humedad del concreto tienen una relación inversamente proporcional, es decir, a medida que la humedad aumenta, esto se puede traducir a una mayor ocupación de líquido en los poros del material y por consiguiente mayor capacidad de conducción eléctrica, contraria a la resistividad. Se puede observar en las curvas presentadas, que en la mayoría de las series hay un aumento de resistividad eléctrica, directamente proporcional al aumento de la humedad, lo cual puede tener dos razones: la presencia de perturbaciones en las lecturas de este último parámetro, partiendo del hecho de que las mediciones de resistividad tienen el mayor grado de ajuste entre todas las variables (véase Anexo 12, 13 y 14), o un comportamiento atípico relacionado al proceso de hidratación durante los primeros 14 días, para muestras con ciertos aditivos y/o adiciones. Las series que en cambio, presentan aumento de resistividad a medida que disminuye la humedad, en concordancia con los fundamentos teóricos, son las siguientes:

- **P1 (1% de WT-100):** con poca pendiente, es decir, bajo ascenso de resistividad eléctrica para una disminución de humedad significativa. En otras palabras, bajo efecto de la reducción de humedad sobre la resistividad.
- **P3 (0.3% de PLASTIMENT-500):** mayor pendiente respecto a la P1, es decir, mejor crecimiento en la resistividad eléctrica ante la caída de la humedad interna y por ende, probabilidad de mayor durabilidad a futuro.
- **P6 (5% de microsílíce):** pendiente similar a P3, con crecimiento de resistividad favorable y mayores magnitudes logradas. Se perfila como la serie con mejor desempeño ante la humedad interna.
- **P7 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes):** a pesar de tener una pendiente ligeramente mayor a las mencionadas, se encuentra por debajo de la serie P6 en cuanto a magnitud en los primeros 14 días de estudio.

En otro orden de ideas, llama la atención que tres de estas series se encuentran entre las que desarrollan mayores magnitudes de resistividad eléctrica en la población, según la Figura 21 (sin incluir a la serie P4 con 10% de cenizas volantes), lo cual se ajusta a

la hipótesis referente a contrastes reales en la variación de humedad interna, entre las series que generan mejorías de resistividad eléctrica y las que no, con base en la serie patrón P0 (sin aditivos ni adiciones). También es importante tomar en cuenta que algunas de estas curvas no se ajustan de forma idónea a los datos respectivos y por ende se sugiere mayores estudios en esta área (véase Anexos 26, 27 y 28).

4.1.5. Relación entre resistividad eléctrica y temperatura interna

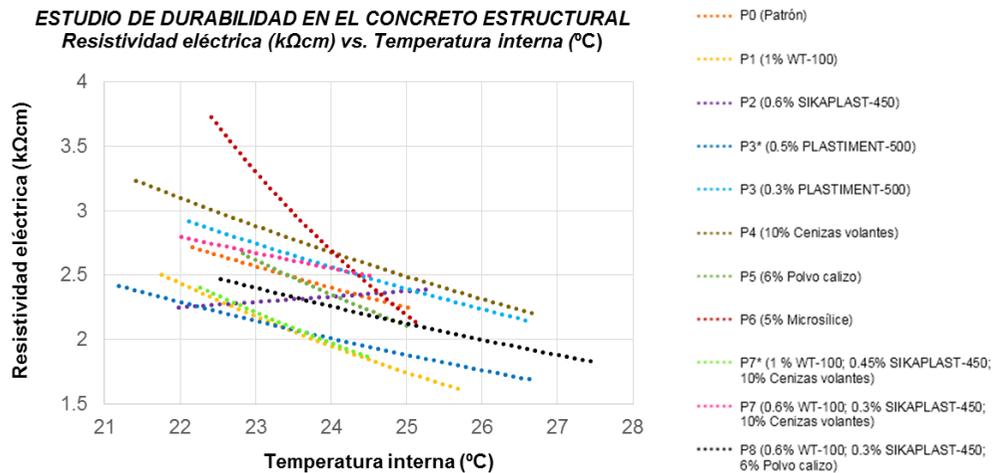


Figura 25. Tendencias de resistividad eléctrica con respecto a la temperatura interna.

Fuente: Elaboración propia (2023).

Desde otra perspectiva, se tiene la Figura 25, donde se establecen aproximaciones entre la resistividad eléctrica y la temperatura interna de las probetas. Badilla (2014) al igual que el caso anterior, asegura que la relación entre la resistividad y la temperatura es inversamente proporcional, refutado por estudios como el de Picos (2014), en donde se demostraron disminuciones de resistividad alrededor de un 28% para a/c 0.45, 33% para a/c 0.55 y 37% para a/c 0.65, a medida que la temperatura del agua de curado aumenta.

Aplicado a la investigación, en líneas generales se cuenta con aumentos de resistividad eléctrica a medida que disminuye la temperatura interna, en concordancia con los principios propuestos, para todas las series con excepción en la P2 (0.6% de SIKAPLAST-450), con el porcentaje más bajo de ajuste (véase Anexo 27), por lo cual se demuestra la necesidad de verificar este parámetro por lapsos de tiempo mayores, en especial para esta serie.

Basándose en estas primicias, el otro factor diferenciador entre cada serie son las pendientes que adoptan las curvas de tendencia, donde P6 (5% de microsílíce) muestra el mejor desempeño de resistividad en función de la temperatura, sobre todo entre 22.5 y 24 °C, ya que en este rango tiene niveles de resistividad mayores o iguales a otras series, para mayores temperaturas. Por ejemplo, en la Figura 25, para 3.25 kΩcm, cuenta con una temperatura interna próxima a 23 °C, mientras que la serie P4 desarrolla la misma resistividad en promedio, pero para una temperatura menor (21.5 °C), es decir, menor respuesta con respecto a aumentos de temperatura. Estas afirmaciones pueden ser aplicables a las demás series, según los rangos evaluados.

A menor grado se encuentran las otras series en el mismo orden de la Figura 21, con curvas de pendiente semejante entre P0, P3, P3*, P4 y P8; P1 con P5 y P7*, y P7 con un crecimiento ligeramente menor al resto.

4.1.6. Relación entre temperatura y humedad interna

Con ayuda de la Figura 26 (dosis indicadas) se evalúan los cambios de temperatura con respecto a la humedad interna de las muestras de concreto. En base a las pendientes obtenidas, se pueden subdividir las series en dos grupos:

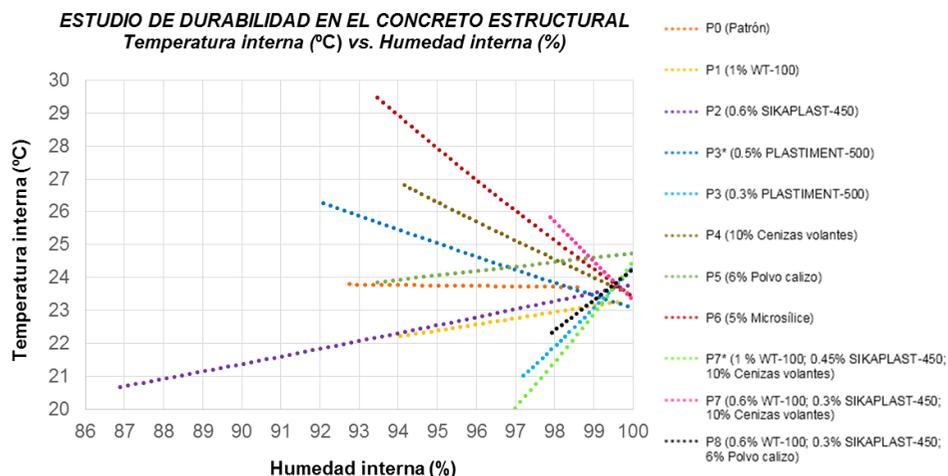


Figura 26. Tendencias de temperatura interna con respecto a la humedad interna.

Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Temperatura directamente proporcional a la humedad:** P1, P2, P3, P5, P7* y P8.
- **Temperatura inversamente proporcional a la humedad:** P0, P3*, P4, P6 y P7.

Según lo expresado en los apartados anteriores, lo lógico es que estas variables sean directamente proporcionales. Si se toma en cuenta la hipótesis asociada a inconsistencias por humedad en la Figura 24, como también por temperatura según la Figura 25, las curvas de tendencia con menor porcentaje de error podrían ser la P1, P3, P6 y P7, donde se destaca que la P1 (1% de WT-100) y la P3 (0.3% de PLASTIMENT-500) adoptan un comportamiento directamente proporcional, mientras que la P6 (5% de microsílíce) y P7 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes) al contrario. Debido a este contraste, al carácter experimental de esta investigación y al grado de ajuste en los últimos gráficos, no se descarta la veracidad de estos comportamientos, ni tampoco los de las series restantes, y se sugiere continuar esta línea de investigación.

4.1.7. Relación entre resistividad eléctrica y resistencia a compresión

Analizadas las variables principales, se evalúan las resistencias a compresión promedio en dos probetas de cada serie a los 14 días de estudio, elaborando un gráfico que las relaciona con las lecturas finales de resistividad eléctrica.

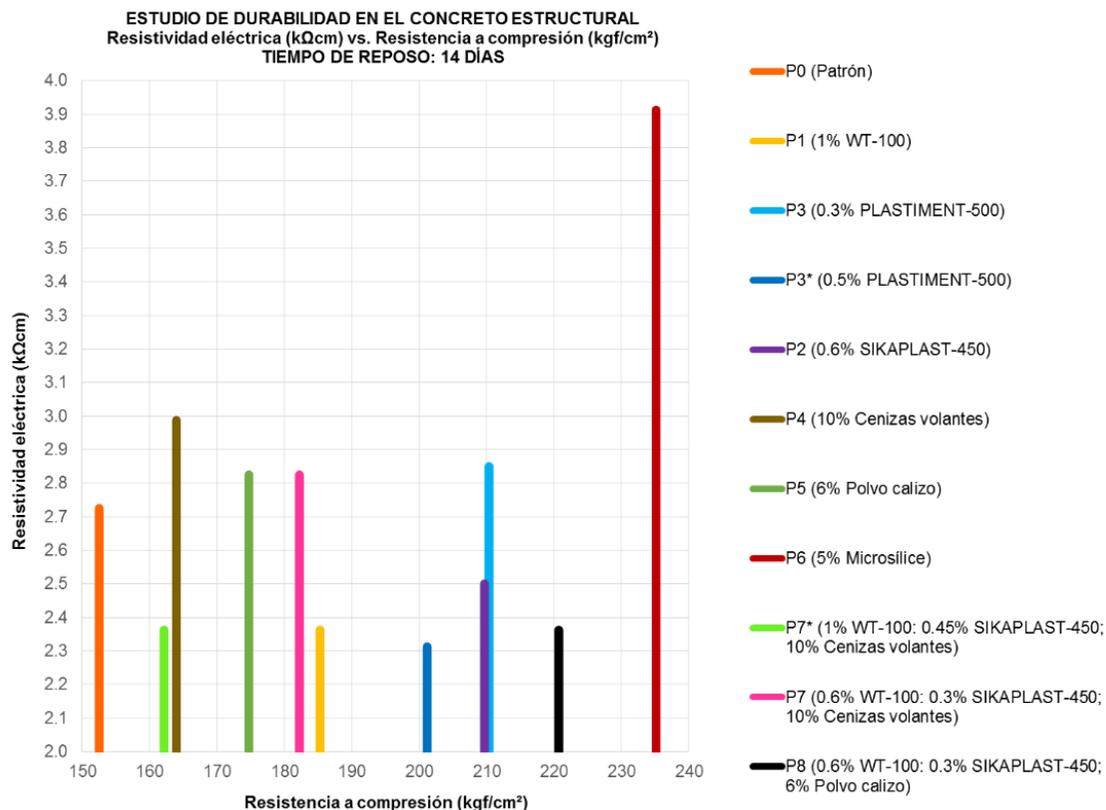


Figura 27. Variación de resistividad eléctrica con respecto a la resistencia a compresión.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En la Figura 27 se indica que la serie patrón P0 es la que menor resistencia alcanzó durante el proceso (153 kgf/cm^2), para una resistividad de $2.75 \text{ k}\Omega\text{cm}$, mientras que la serie P6 (5% de microsílíce) resultó con la mayor resistencia y resistividad del estudio (235 kgf/cm^2 y $3.91 \text{ k}\Omega\text{cm}$).

Las series P2, P3, P3* y P8 registran resistencias de entre 200 y 220 kgf/cm^2 , mientras que P1, P4, P5, P7 y P7* culminan con magnitudes de 160 a 185 kgf/cm^2 .

En lo que se refiere a los aditivos y adiciones empleados, para todas las series distintas a la P0 (patrón) se lograron cambios de resistencia a los 14 días, con especial mención a los productos SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500, con aumentos de hasta el 37% en las series P2 y P3, y 44% en la serie P8 en combinación con el polvo calizo. Por el lado del aditivo WT-100, se obtuvo un aumento del 20%, superior al efecto de P4, P5, P7 y P7*.

Para igual relación a/c:

- **P1 con P4 (a/c de 0.65):** mayor resistencia promedio en P1.
- **P2 con P5 (a/c de 0.61):** mayor resistencia promedio en P2.
- **P3 con P8 (a/c de 0.58):** mayor resistencia promedio en P8.

En el Anexo 29 se presentan los datos de cada probeta cilíndrica, junto con las lecturas de resistencia a compresión y resistividad eléctrica en dos de cada serie, con sus respectivas desviaciones estándar.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Luego de haber llevado a cabo las actividades correspondientes a la evaluación de aditivos y adiciones, se puede concluir lo siguiente:

- Se confirma la incidencia de aditivos y adiciones sobre la resistividad eléctrica de las muestras de concreto consideradas en el período de muestreo de 14 días. Se evidencia el gran impacto de la serie P6 en este parámetro, gracias a la dosificación seleccionada de microsílíce (5% de la masa cementante) con a/c de 0.6, llegando a lecturas superiores al resto por 1 kΩcm o más. Se hace énfasis en el requerimiento de estudios con menores variaciones en la relación a/c.
- Entre las series que presentaron aumentos de resistividad eléctrica con respecto a la mezcla patrón P0 (a/c de 0.69), se resalta la P4 (10% de cenizas volantes), P3 (0.3% de PLASTIMENT-500) y la P7 (combinación de aditivos con cenizas volantes), con a/c de 0.65, 0.58, y 0.54, respectivamente.
- La serie P5 (6% de polvo calizo) con a/c 0.61 se define como el caso con menor incidencia en la resistividad eléctrica, debido a su semejanza con la serie patrón P0, mientras que las series P1 (1% de WT-100), P2 (0.6% de SIKAPLAST-450), P3* (0.5% de PLASTIMENT-500), P7* (combinación de aditivos con cenizas volantes) y P8 (combinación de aditivos con polvo calizo), se catalogan como los casos desfavorables en cuanto a este parámetro, para a/c de 0.65, 0.61, 0.62, 0.56 y 0.58, respectivamente.
- La dosificación de las series P3 y P7 resultaron ser favorables en cuanto a resistividad eléctrica, a comparación de las series P3* y P7*, lo cual da indicios sobre un límite en las dosis de los aditivos, a partir del cual la durabilidad se ve afectada negativamente.
- Se confirma la incidencia de aditivos y adiciones en la humedad interna de las muestras de concreto en 14 días de estudio, en función de los resultados obtenidos. No obstante, se considera la necesidad de un mayor período de estudio (por lo menos 90 días) para

establecer tendencias más uniformes, y verificar su relación con los fundamentos teóricos respecto al aumento de resistividad eléctrica en el tiempo (véase el apartado 4.1.4). Entre los resultados finales a los 14 días, las series P1 y P6 son las que llegan a menor humedad interna (entre 96 y 97%), y las demás oscilan entre 98 y 99%.

- En función de lo mostrado en las Figuras 22 y 24, se puede decir que las series P1, P3, P6 y P7, tienen resultados de humedad interna acorde a los fundamentos teóricos, resaltando el desempeño de la adición del microsílíce (5%) y el aditivo WT-100 (1%) frente a este aspecto. Sin embargo, por lo indicado en el apartado 4.1.6, no se puede descartar que las demás series realmente experimentan un comportamiento de humedad interna atípico, dentro de los primeros 14 días de edad.
- Se confirma la incidencia de aditivos y adiciones en la temperatura interna de las muestras de concreto en 14 días de estudio, a falta de mayores tiempos de muestreo, considerando lo descrito en la Figura 25 para serie la P2 (0.6% de SIKAPLAST-450). Se proyecta la serie P1 (1% de WT-100) a experimentar las temperaturas más bajas de la investigación, según la Figura 23, lo cual en la teoría responde a disminuciones de humedad interna (compatible) y a futuro mejoras en cuanto a durabilidad. Por otro lado, las series P5 (6% de polvo calizo) y P7* (combinación de aditivos con cenizas volantes), resultan con tendencia a temperaturas mayores al resto, y con probabilidad de aumentos poco significativos en durabilidad.
- Valoradas las mediciones de resistividad eléctrica, humedad y temperatura interna en 14 días, se puede estimar que la adición del 5% de microsílíce sobre la masa cementante tiene el mayor potencial para mejorar la durabilidad del concreto estructural, dentro de las opciones presentadas. Así mismo, se demostró que los casos con 10% de cenizas volantes y aditivos plastificantes en dosis conservadoras (como el 0.3% de PLASTIMENT-500), pueden traer beneficios en la vida útil. En cuanto a las combinaciones empleadas, se dice que la P7 (10% de cenizas volantes) puede aportar mayor durabilidad al concreto, con respecto a la P8 (6% de polvo calizo). Por otra parte, las muestras con dosis importantes de aditivos (como la P7*), pueden provocar afectaciones negativas en estos términos.

- Para el comportamiento mecánico del concreto (véase Figura 27), además de mencionar que todas las series diferentes a la patrón P0 alcanzaron mejoras en resistencia a carga axial, se destaca también el empleo del microsílíce en dosificación del 5%, con diferencias representativas en comparación con cualquier otro caso, y la superioridad de la dosis de polvo calizo sobre la de cenizas volantes, ya que las resistencias de las series P5 (6% de polvo calizo) y P8 (combinación de aditivos con polvo calizo) resultaron ser mayores a las series P4 (10% de cenizas volantes) y P7 (combinación de aditivos con cenizas volantes) respectivamente. También es importante resaltar el aporte de SIKAPLAST-450 (0.6%) y PLASTIMENT-500 (0.3% y 0.5%).
- Al comparar series con la misma relación a/c, la P4 (10% de cenizas volantes) resultó en promedio mejor que la P1 (1% de WT-100) en cuanto a resistividad eléctrica, del mismo modo la P5 (6% de polvo calizo) sobre la P2 (0.6% de SIKAPLAST-450) y la P3 (0.3% de PLASTIMENT-500) sobre la P8 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 6% polvo calizo). En lo que respecta a la humedad y temperatura interna, P1 genera menores niveles que la P4, la P2 menores a la P5, y la P3 menores a la P8, lo cual habla de una relación directamente proporcional entre la temperatura y humedad para estas condiciones. Por último, para resistencia a compresión, la P1 supera a la P4, la P2 a la P5 y la P8 a la P3.
- El nivel de fluidez provocado por el aditivo WT-100 resultó sensiblemente menor al aportado por los productos SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500, según los resultados de los estudios con pasta de cemento y mortero, y las consistencias en las mezclas de concreto. Respetando los rangos recomendados por los fabricantes, se define en principio al SIKAPLAST-450 como el aditivo con mayor alcance en este ámbito.
- Los resultados de ensayos a carga axial en concreto demuestran cierta compatibilidad con los estudios de pasta de cemento y mortero, ya que en estos las resistencias alcanzadas con los productos SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500 resultaron similares (entre ellos) y superiores a las muestras con WT-100 y cenizas volantes.
- En las pruebas de absorción con morteros, el aditivo WT-100 presentó un mejor desempeño con una dosificación cercana al 1% de la masa cementante, y esto se vio reflejado en los resultados de humedad y temperatura interna en muestras de concreto

(acorde a los fundamentos teóricos). No obstante, en los estudios de resistividad eléctrica, la serie P1 (con dicho porcentaje) se ubicó entre las opciones con menor magnitud a los 14 días, y por ende con un grado de permeabilidad posiblemente significativo, en comparación a los demás casos. Este comportamiento pudiera tener una influencia representativa de la relación a/c (0.65), por lo cual se requieren más estudios variando este parámetro y la dosis aplicada. Del mismo modo se habla de la serie P4 (10% de cenizas volantes), cuyas magnitudes de resistividad eléctrica y temperatura no se ajustan (en la teoría) a la humedad interna, con la misma relación α de P1.

- Entre las series con mayor reducción de agua se resaltan la P7, P7* y P8, las cuales constan de combinaciones de WT-100, SIKAPLAST-450 y adiciones de cenizas volantes y polvo calizo (véase Tabla 4). A pesar de esto, las cantidades de agua añadida pueden llegar a ser menores, dependiendo del control durante el mezclado.

5.2. RECOMENDACIONES

En base a las experiencias desarrolladas en la evaluación de aditivos y adiciones sobre la durabilidad del concreto, se puede emitir como recomendaciones:

- Realizar mediciones de resistividad eléctrica, humedad y temperatura interna por lo menos durante 90 días, con miras a estimar la durabilidad de las muestras con mayor precisión.
- Ampliar estudios de aditivos y adiciones en cuestión, para dosis distintas, considerando la incidencia de la relación a/c, y evaluando tanto durabilidad como resistencia. Estudiar con mayor profundidad el comportamiento del aditivo WT-100, ya que los resultados de humedad y temperatura interna inducen a aumentos importantes en la durabilidad, lo cual no corresponde a las magnitudes de resistividad eléctrica alcanzada en los 14 días de estudio. Dicha sugerencia aplica también a la adición de cenizas volantes, ya que su desempeño en resistividad eléctrica y temperatura interna da indicios sobre un impacto positivo en la durabilidad, contrario a los datos de humedad interna, según lo descrito por otros autores.

- Por razones de durabilidad, tomando en cuenta a la resistividad eléctrica como el principal indicador de este trabajo, se recomienda el empleo de dosificaciones análogas a las series P3 (0.3% de PLASTIMENT-500), P4 (10% de cenizas volantes), P6 (5% de microsílíce) y P7 (0.6% WT-100 con 0.3% SIKAPLAST-450 y 10% cenizas volantes).
- Precaución al utilizar dosis de aditivos en exceso, ya que, además de afectar en temas económicos y de resistencia mecánica, puede traer consigo problemas de durabilidad.
- A la hora de medir humedad y temperatura interna en probetas de concreto con una sonda, se debe tener especial cuidado en evitar ingreso de agua por el conducto correspondiente, puesto que las lecturas pueden verse afectadas. Se recomienda mantener cerrado el conducto en la parte superior.
- En lo posible no añadir agua luego de aplicar dosis de los aditivos SIKAPLAST-450 PLASTIMENT-500, ya que los niveles de fluidez en la mezcla pueden reducirse significativamente. Es viable comprender el comportamiento de estos productos en la mezcla y definir estrategias para su manejo, con baja relación α .
- Al medir resistividad eléctrica con equipos similares al utilizado, se debe en principio asegurar su calibración, y luego registrar lecturas en por lo menos cuatro sitios distintos en la probeta y promediarlos, corroborando debidamente cada medición al momento.

REFERENCIAS

Andrade, C.; D'Andrea, R. (2011). “*La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*”. Recuperado de:

<https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/8/8>

ANFAH (s.f.). “*Tipos de Aditivos*”. Recuperado de: <https://anfah.org/aditivos/tipos-de-aditivos/#:~:text=Los%20aditivos%20retardantes%20se%20usan,Estructuras%20sin%20discontinuidades>

Badilla, V. (2014). “*Correlación de diferentes métodos de detección no destructivos de anomalías en el hormigón*”. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/41812777.pdf>

Bermejo, E. (2009). “*Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación*”. Recuperado de:

https://oa.upm.es/1733/1/ESTER_B_BERMEJO_NUNEZ.pdf

Bobo, S.; Sierra, M.; Salas, M.; Barquero, R.; Atienza, M.; Garrido, L.; Camero, J.; Odriozola, A.; Hurtado, J. (2007). “*Recomendaciones para la redacción de: pliegos de especificaciones técnicas generales para hormigones autocompactantes HAC*”. Recuperado de:

https://www.aopandalucia.es/inetfiles/area_tecnica/calidad/Recomendaciones_y_pliegos_varios/HAC_GIASA_version_febrero_07.pdf

Calleja, J. (1969). “*Estado actual de los estudios sobre aditivos para hormigón en España*”.

Recuperado de:

<https://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/download/1576/1909/3012>

CCCA (1966). “*Ensayos de laboratorio y especificaciones*”. Tomo I. Caracas, Venezuela.

Comisión Permanente del Hormigón (2010). “*EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural*”.

Recuperado de: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/1820100.pdf

GCCA (s.f.). “*Ambición Climática*”. Recuperado de: <https://n9.cl/qtz1z>

Goncalves, J.; Albi, J. (2022). *“Incidencia del polvo calizo en las propiedades del concreto estructural”*. Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.

Hernández, C. (2005). *“Plastificantes para el hormigón”*. Recuperado de:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcih557p/doc/bmfcih557p.pdf>

Okamura, H.; Ouchi, M. (2003). *“Self-compacting concrete”*. Japan Concrete Institute.
Recuperado de: https://www.j-act.org/headers/1_5.pdf

Peláez, A. (2014). *“Hormigón autocompactante con nano-adiciones de sílice y alúmina”*.
Recuperado de: https://oa.upm.es/31173/1/Tesis_master_Alfonso_Pelaez_Carretero.pdf

Peñarroja, Ó. (2015). *“Influencia de aditivo en la durabilidad del hormigón estructural”*.
Recuperado de: <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/166119>

Porrero, J.; Ramos, C.; Grases, J.; Velazco, G. (2014). *“Manual del Concreto Estructural”*.
Primera Edición Digital. Caracas, Venezuela.

Romero, H.; Gálvez, J.; Lucea, I.; Moragues, A. (2012). *“Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón autocompactante con adición de microsílíce y nanosílíce”*.
Recuperado de: https://oa.upm.es/19981/1/INVE_MEM_2012_135072.pdf

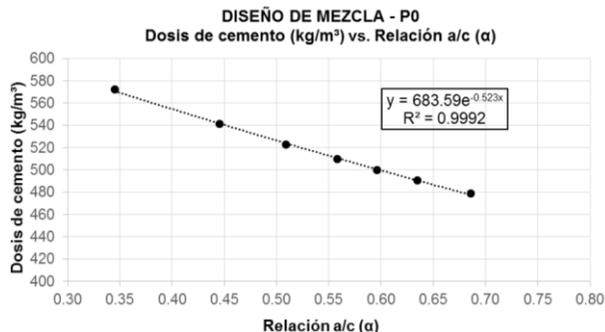
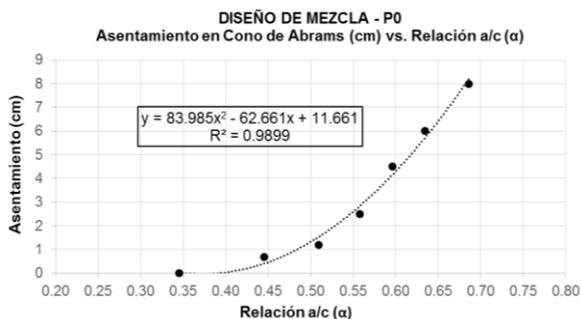
SENCAMER (1994). *“Norma COVENIN 356:1994. Aditivos químicos utilizados en el Concreto. Especificaciones”*. Recuperado de:
<http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/356-94.pdf>

Vélez, L. (2010). *“Permeabilidad y Porosidad en Concreto”*. Recuperado de:
<http://repositorio.itm.edu.co/bitstream/handle/20.500.12622/869/131-Manuscrito-245-1-10-20170208.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

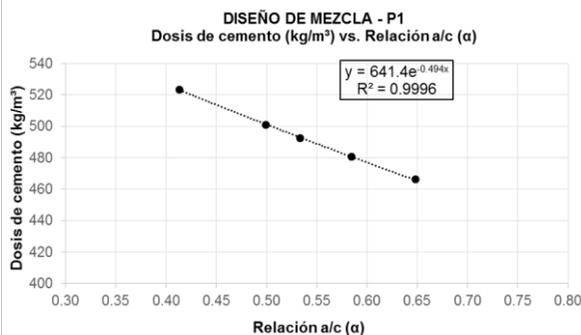
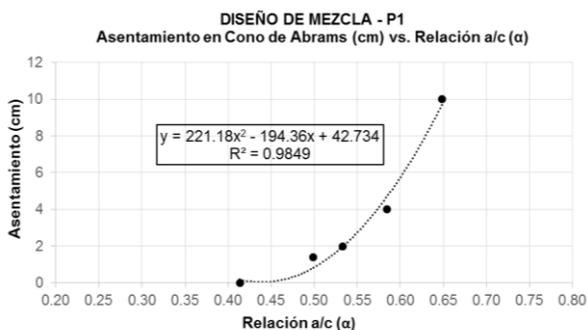
Picos, M. (2014). *“Durabilidad en el hormigón armado”*. Universidade da Coruña.
Recuperado de:
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/13747/PicosPerez_MariaDelCarmen_TFG_2014.pdf?sequence=2&isAllowed=y

ANEXOS

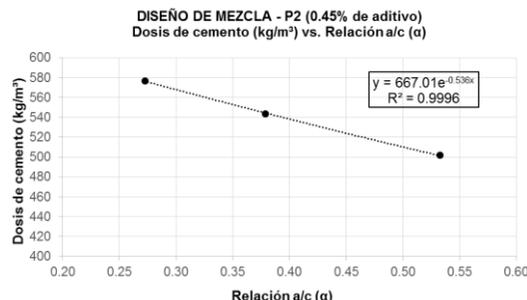
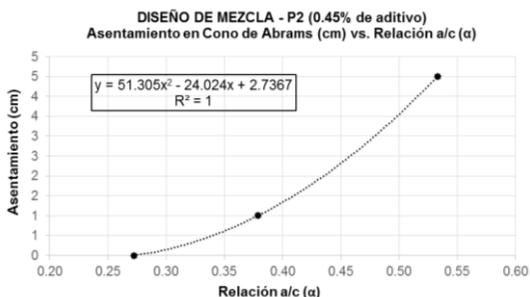
**ANEXO “A”
REGISTRO DE DATOS**



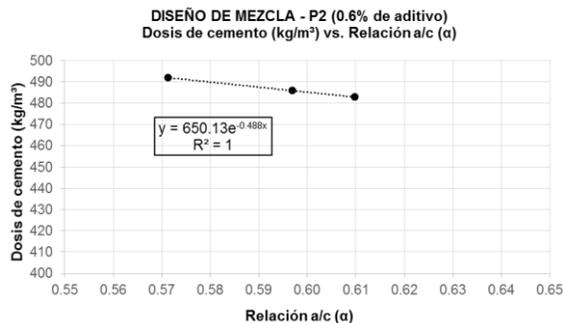
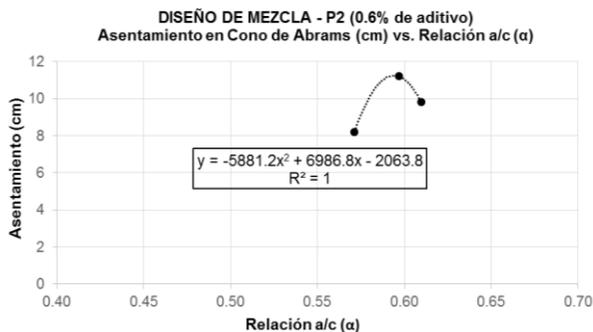
Anexo 1. Diseño de mezcla P0.
Fuente: Elaboración propia (2023).



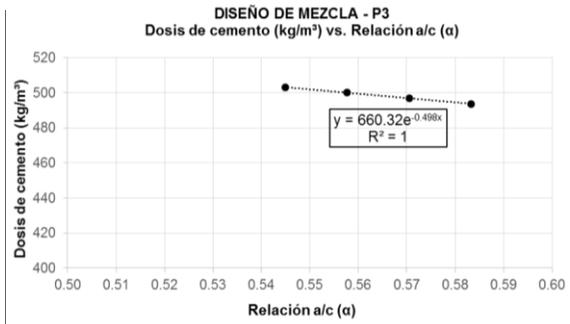
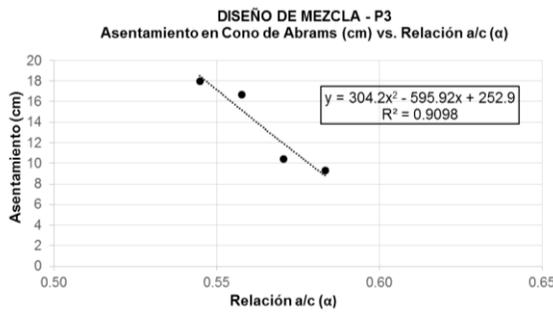
Anexo 2. Diseño de mezcla P1.
Fuente: Elaboración propia (2023).



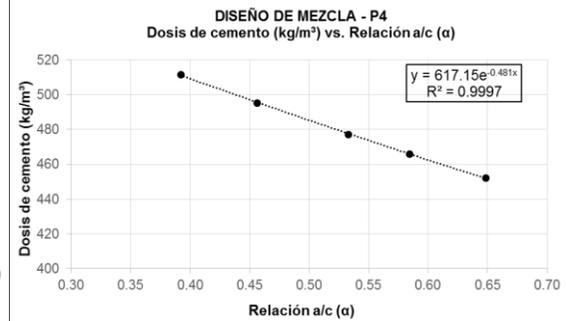
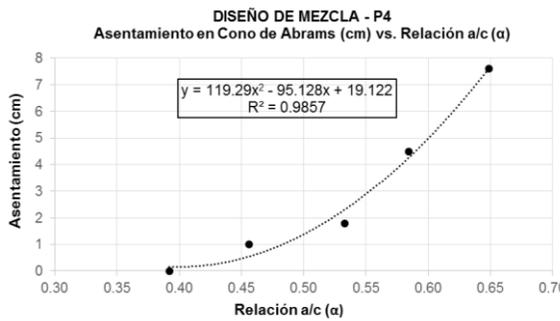
Anexo 3. Diseño de mezcla P2 (0.45% SIKAPLAST-450).
Fuente: Elaboración propia (2023).



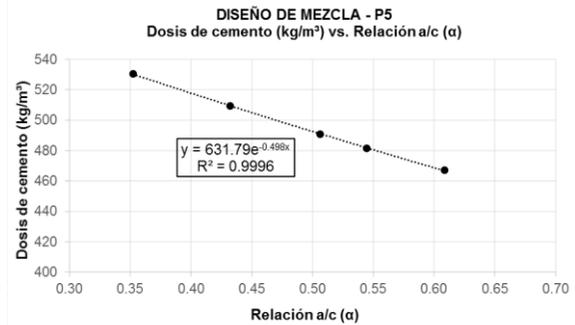
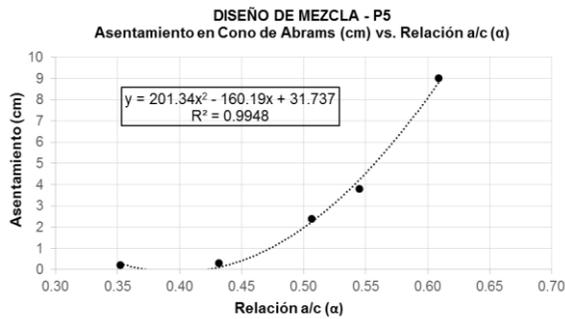
Anexo 4. Diseño de mezcla P2 (0.6% SIKAPLAST-450).
Fuente: Elaboración propia (2023).



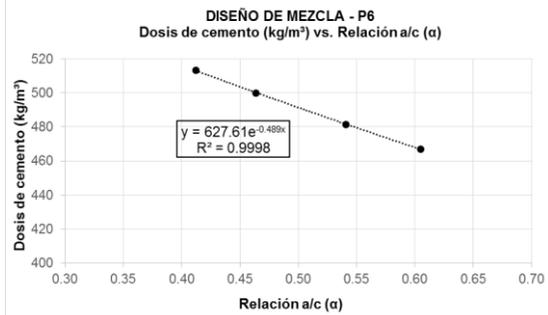
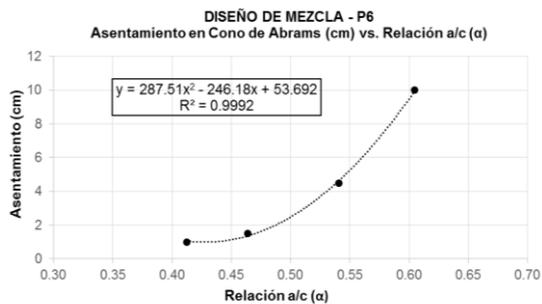
Anexo 5. Diseño de mezcla P3.
Fuente: Elaboración propia (2023).



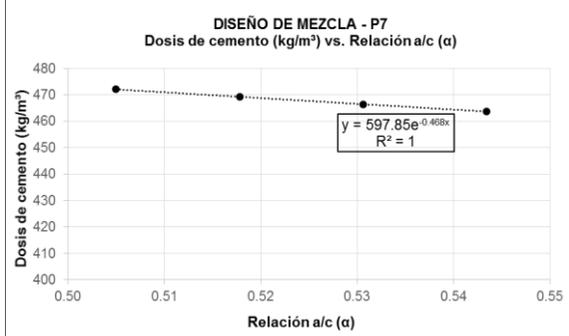
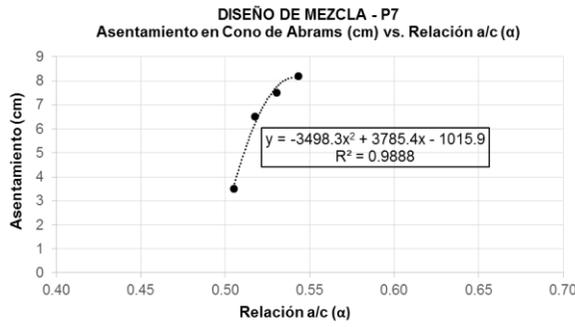
Anexo 6. Diseño de mezcla P4.
Fuente: Elaboración propia (2023).



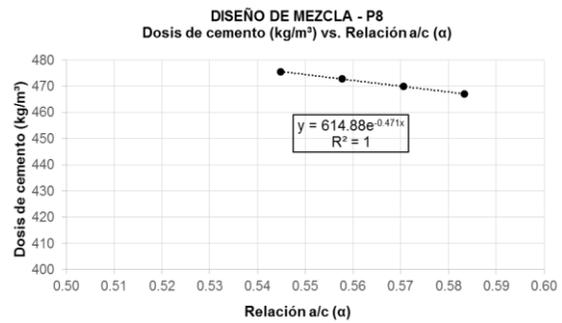
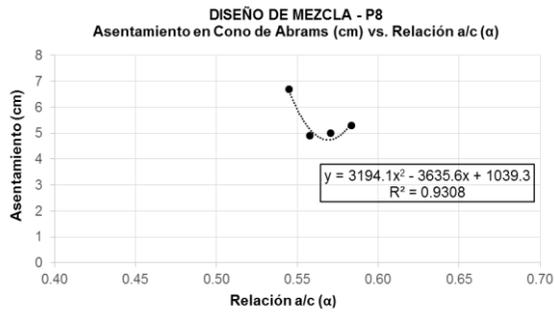
Anexo 7. Diseño de mezcla P5.
Fuente: Elaboración propia (2023).



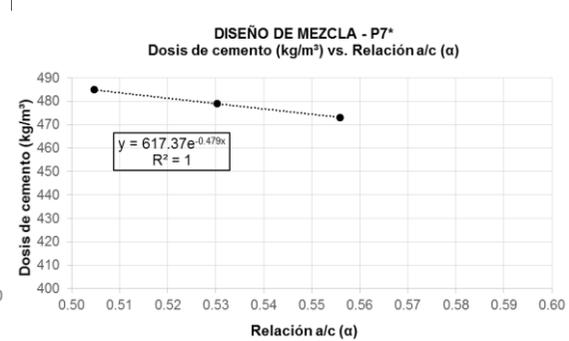
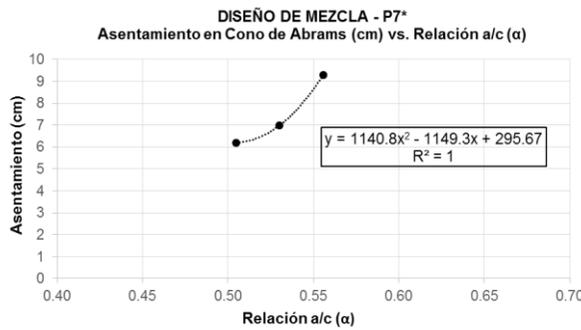
Anexo 8. Diseño de mezcla P6.
Fuente: Elaboración propia (2023).



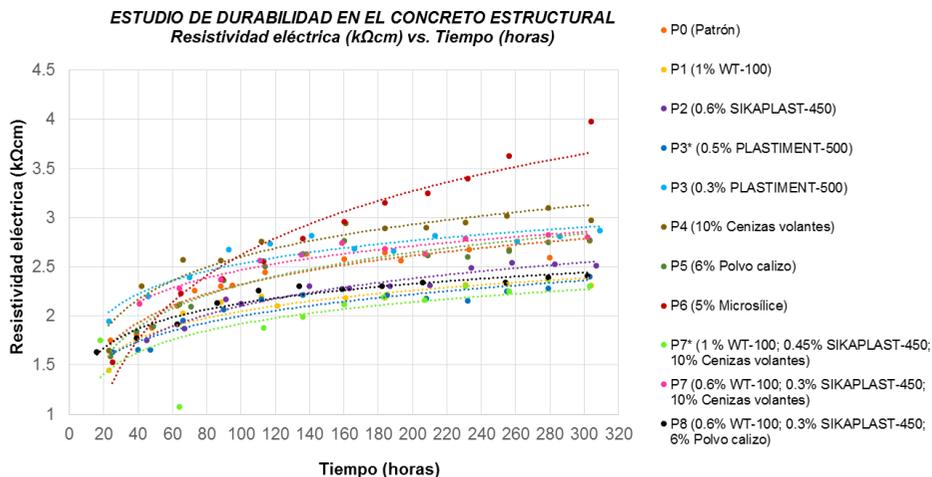
Anexo 9. Diseño de mezcla P7.
Fuente: Elaboración propia (2023).



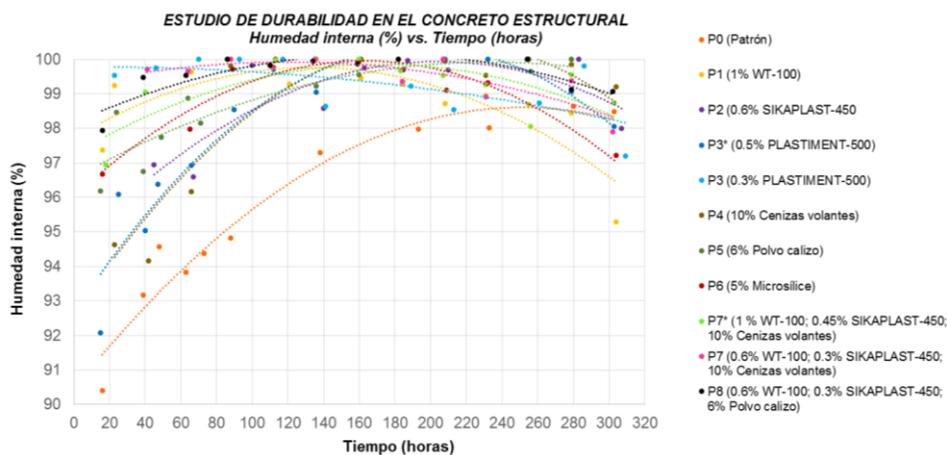
Anexo 10. Diseño de mezcla P8.
Fuente: Elaboración propia (2023).



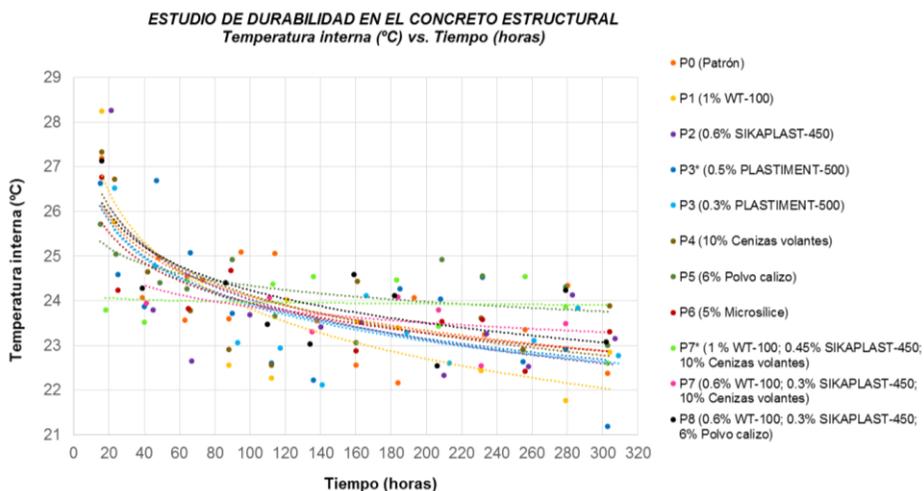
Anexo 11. Diseño de mezcla P7*.
Fuente: Elaboración propia (2023).



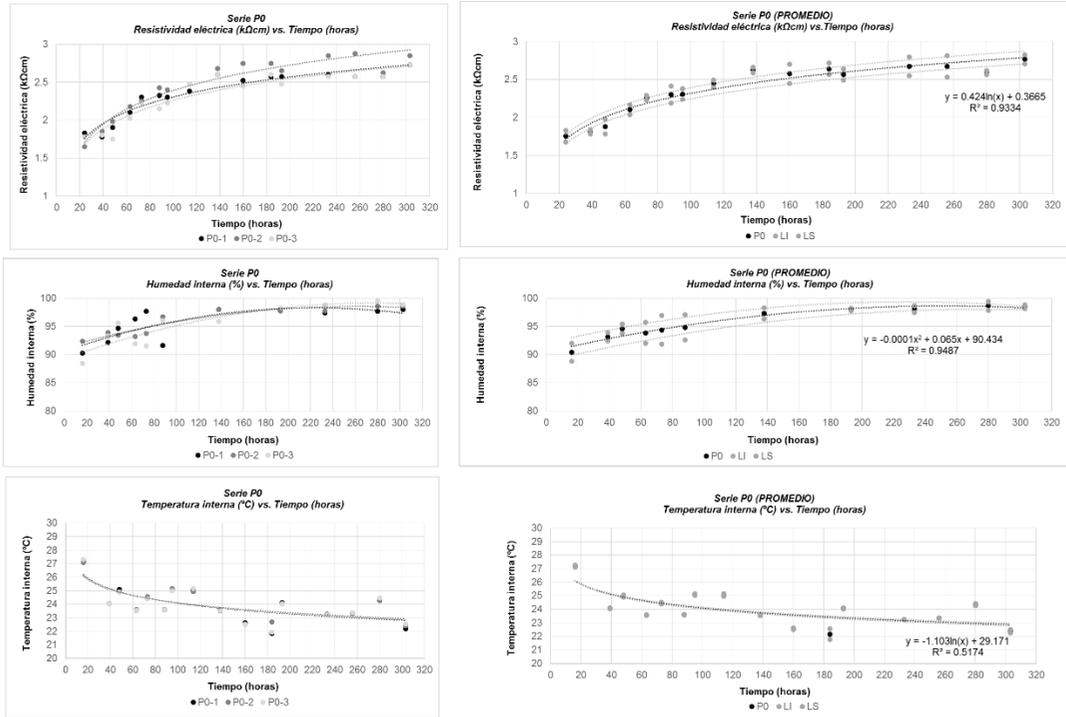
Anexo 12. Resistividad eléctrica en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 13. Humedad interna en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia (2023).

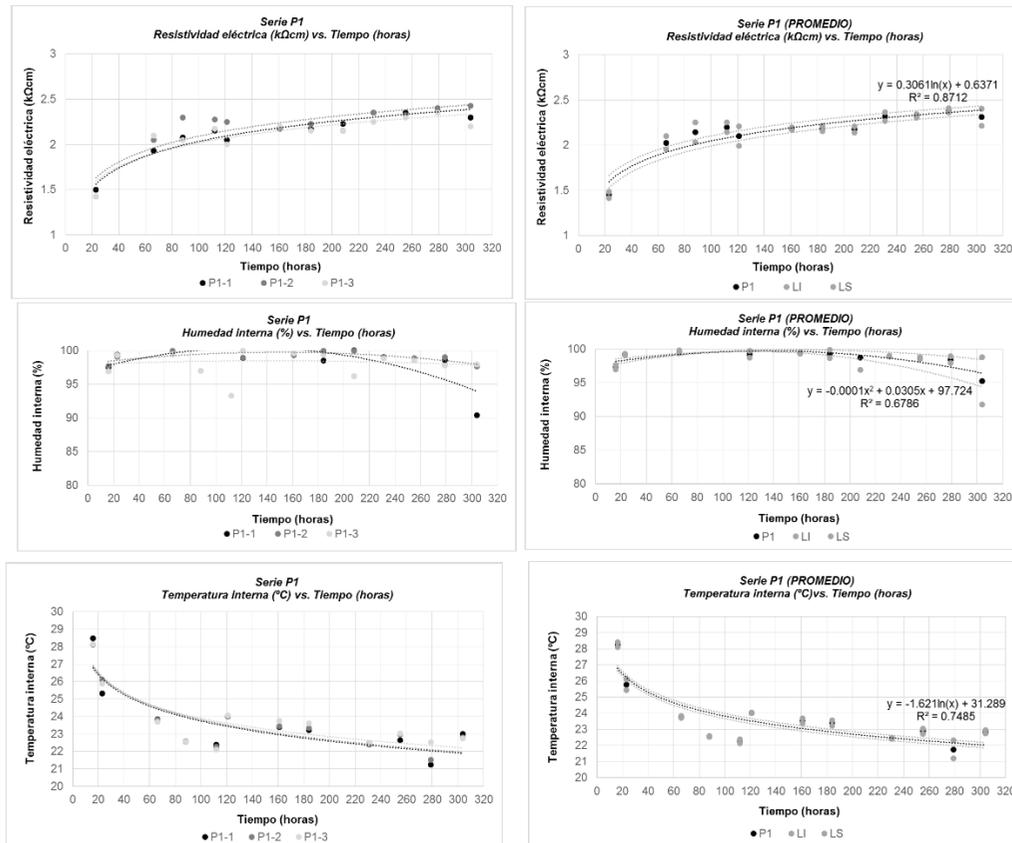


Anexo 14. Temperatura interna en función del tiempo.
Fuente: Elaboración propia (2023).



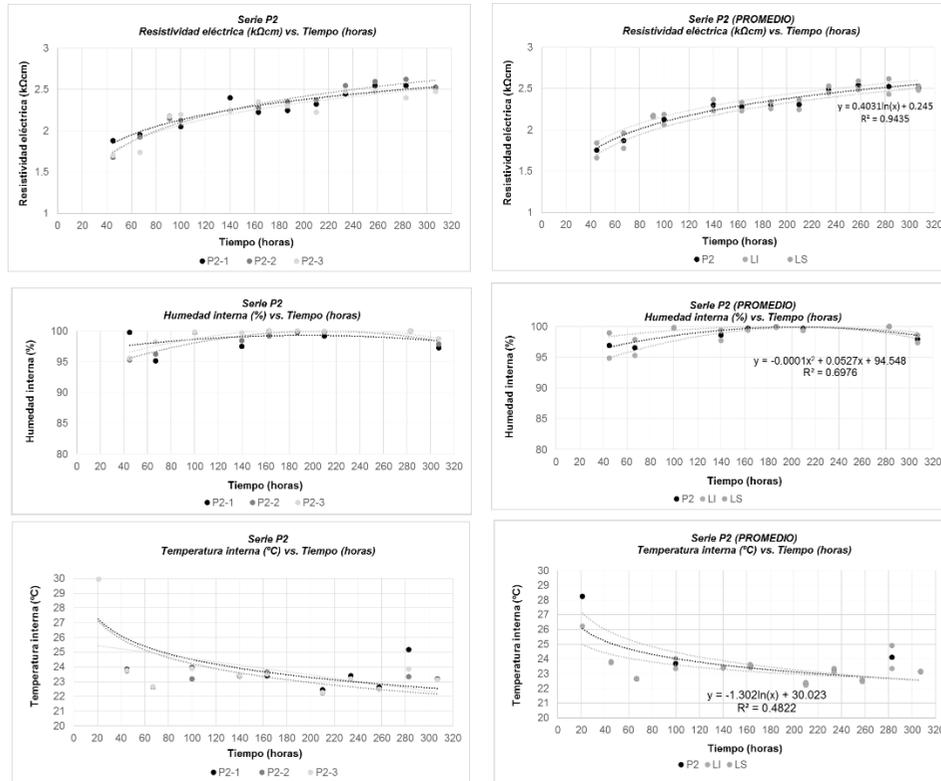
Anexo 15. Control de durabilidad para P0.

Fuente: Elaboración propia (2023).



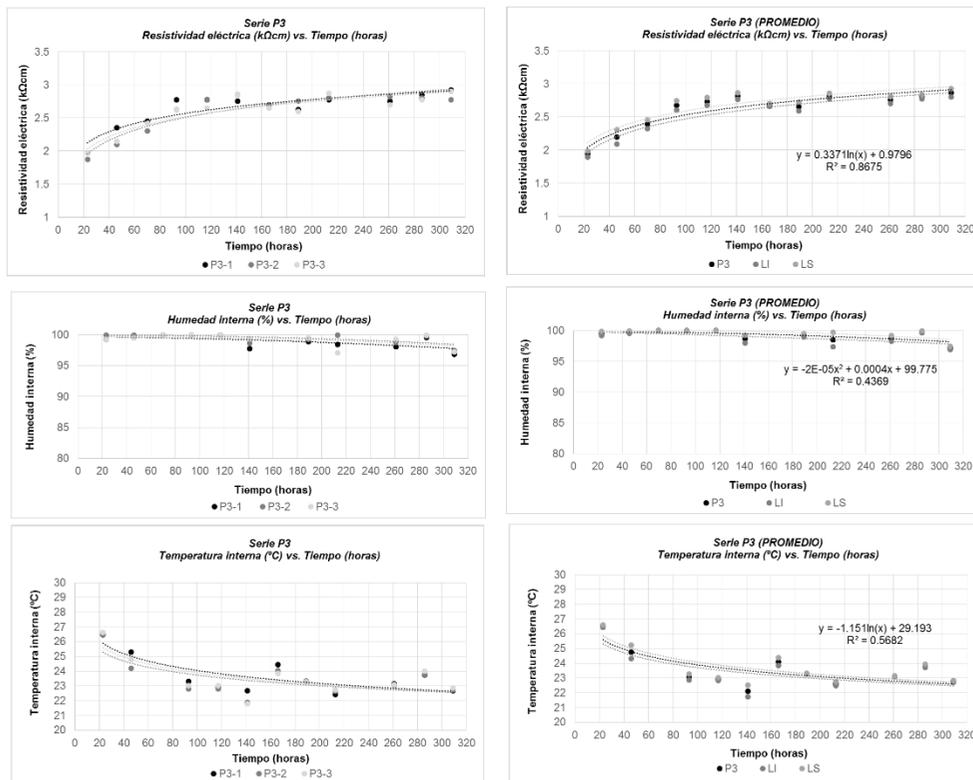
Anexo 16. Control de durabilidad para P1.

Fuente: Elaboración propia (2023).



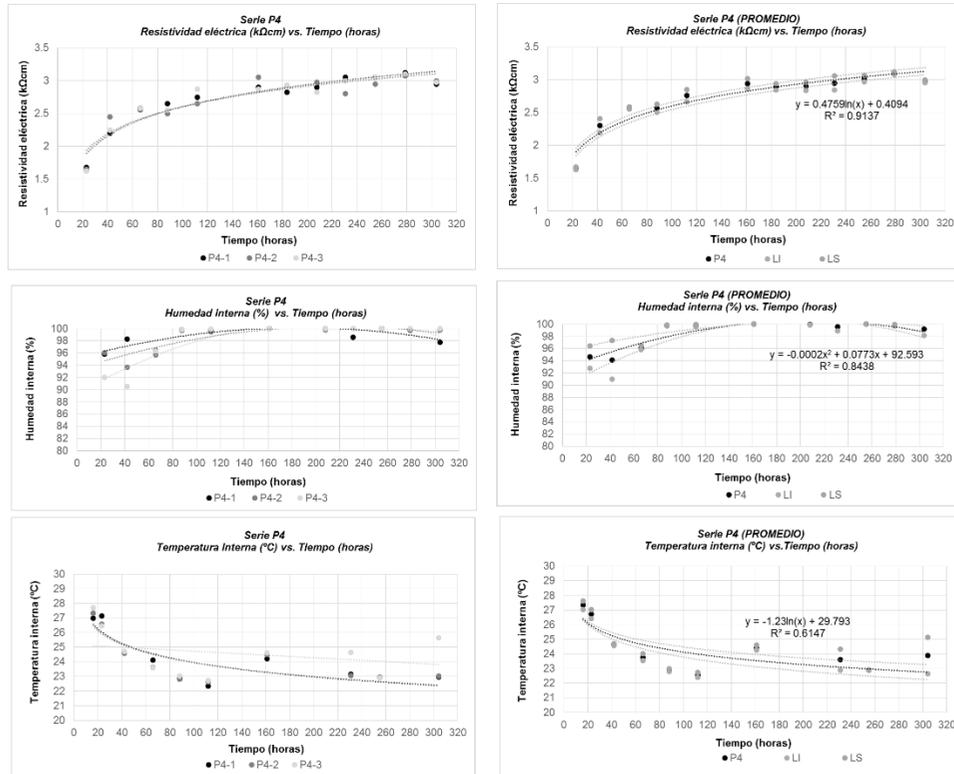
Anexo 17. Control de durabilidad para P2.

Fuente: Elaboración propia (2023).

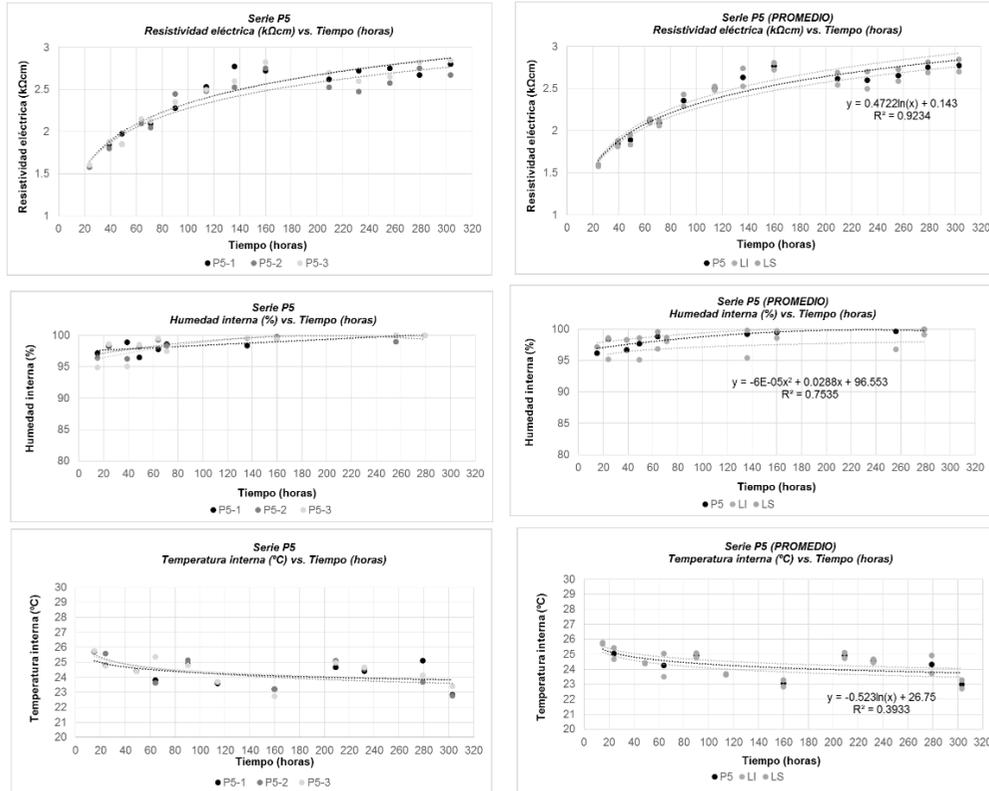


Anexo 18. Control de durabilidad para P3.

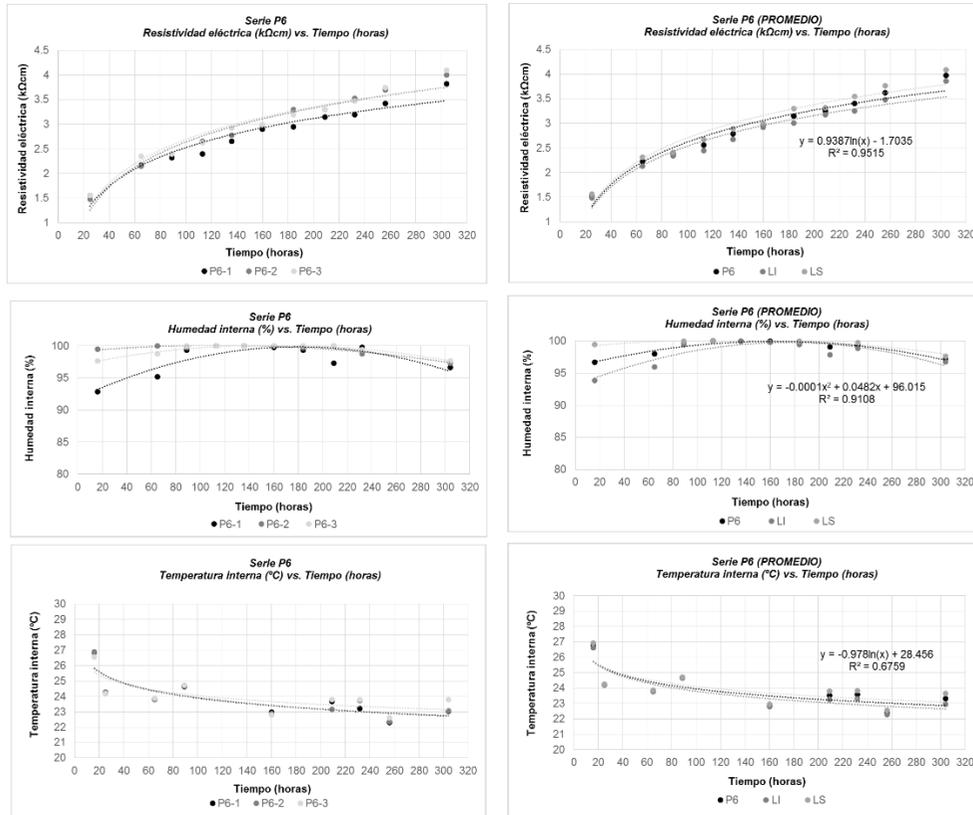
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 19. Control de durabilidad para P4.
Fuente: Elaboración propia (2023).

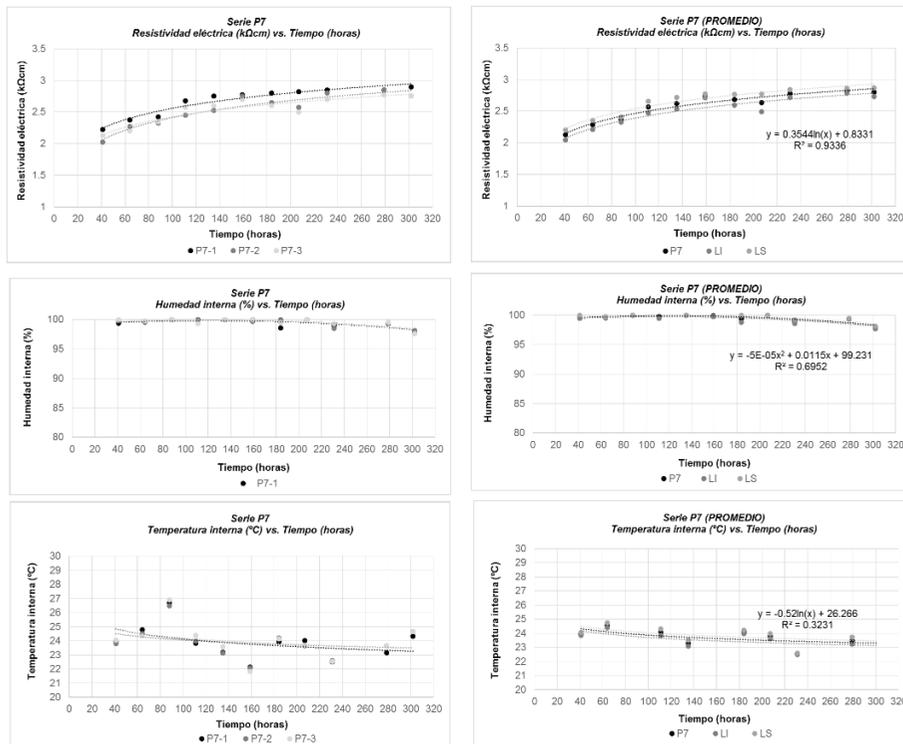


Anexo 20. Control de durabilidad para P5.
Fuente: Elaboración propia (2023).



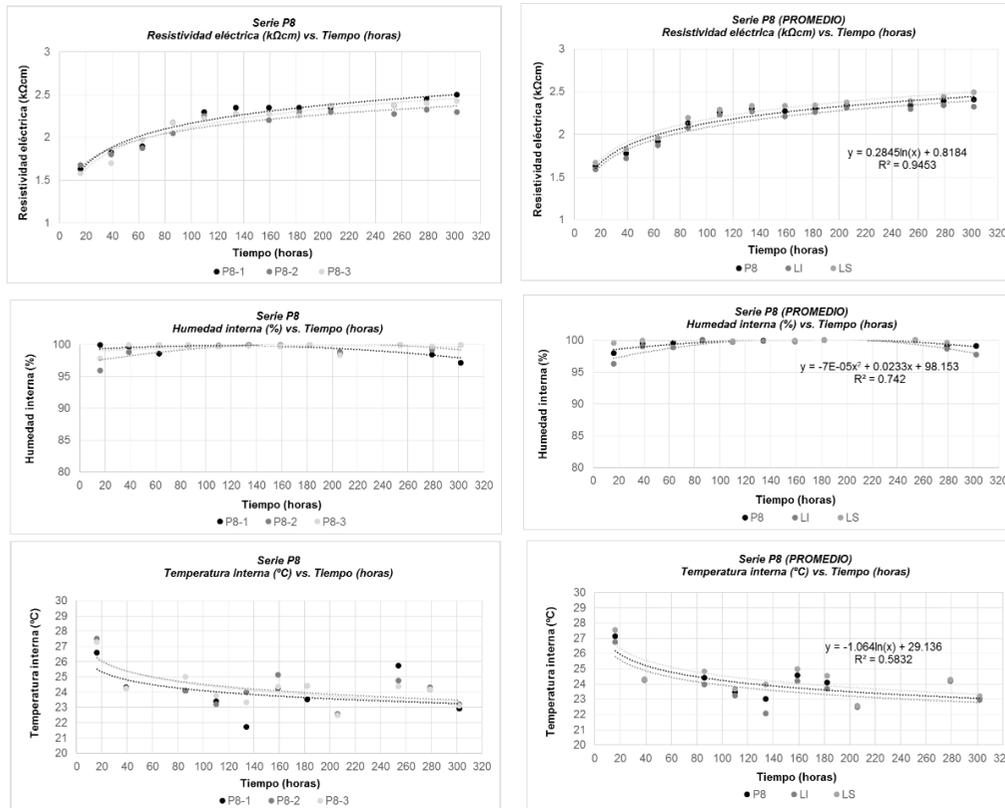
Anexo 21. Control de durabilidad para P6.

Fuente: Elaboración propia (2023).



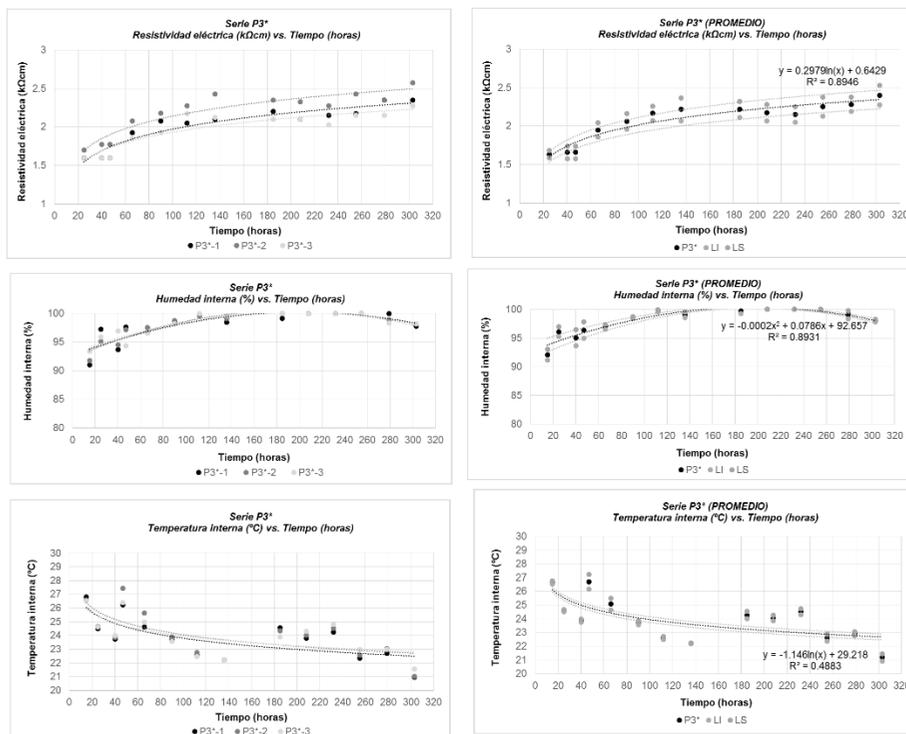
Anexo 22. Control de durabilidad para P7.

Fuente: Elaboración propia (2023).



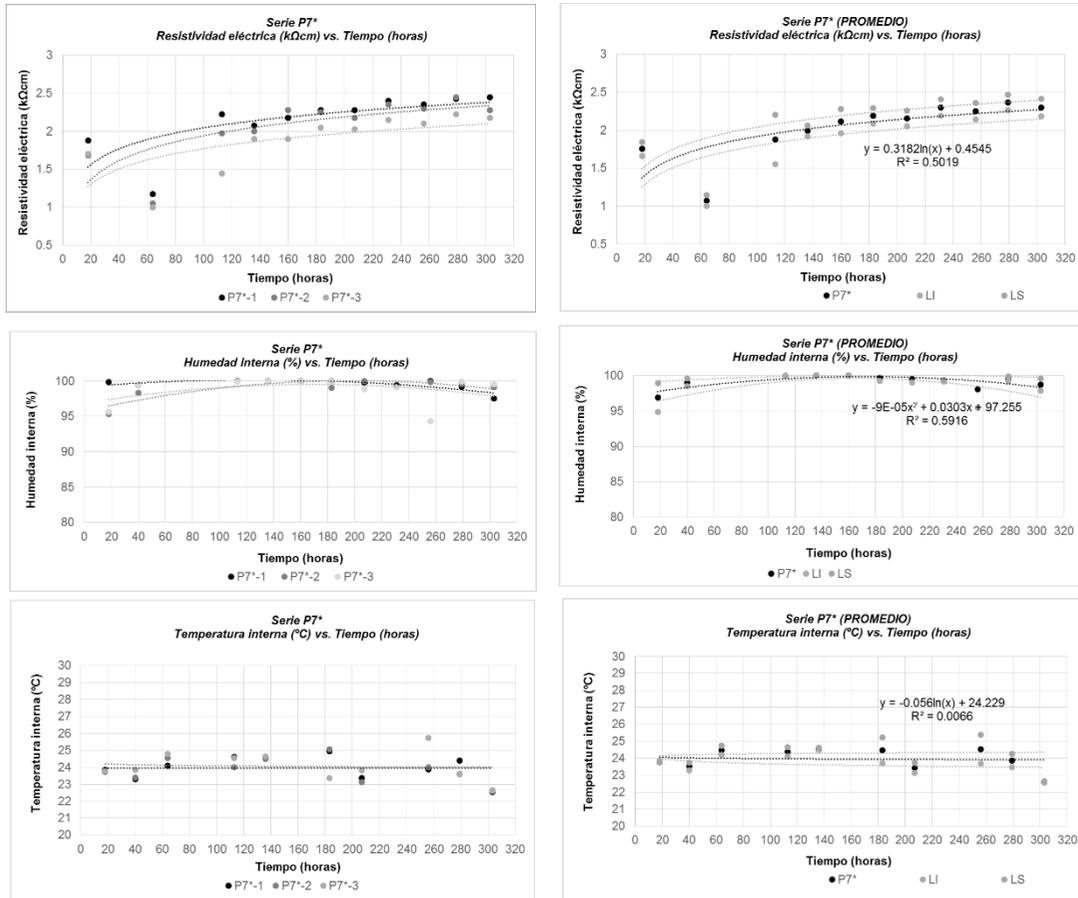
Anexo 23. Control de durabilidad para P8.

Fuente: Elaboración propia (2023).

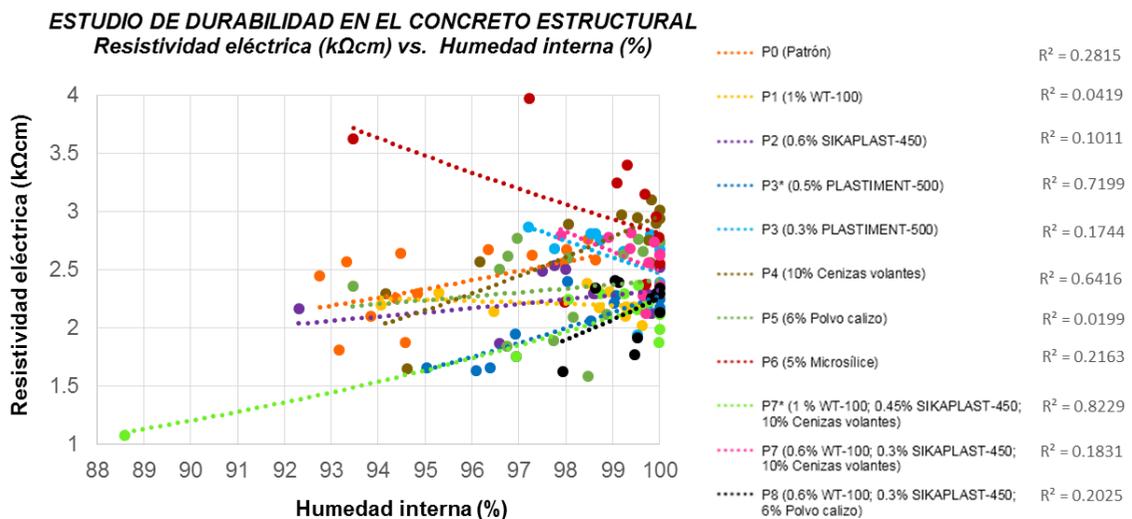


Anexo 24. Control de durabilidad para P3*.

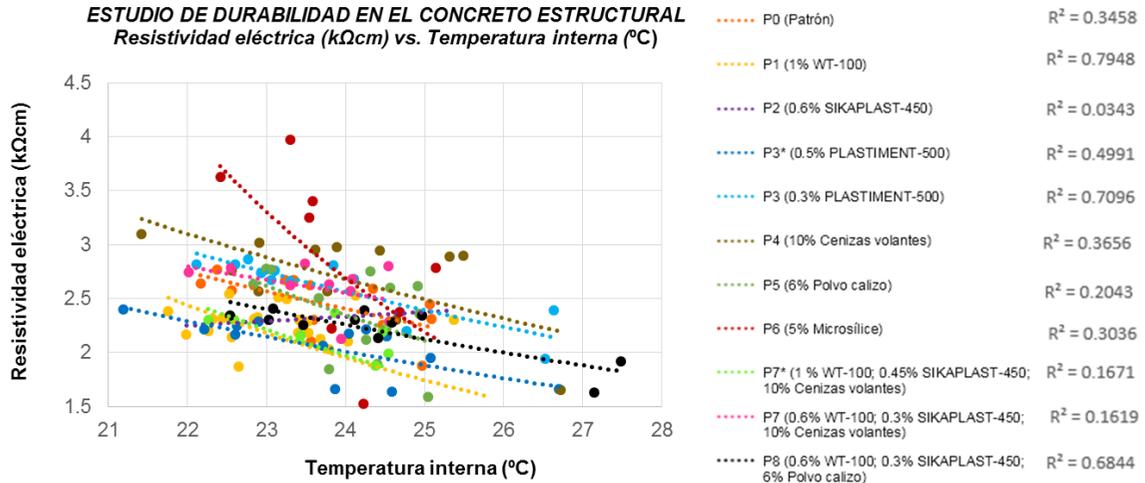
Fuente: Elaboración propia (2023).



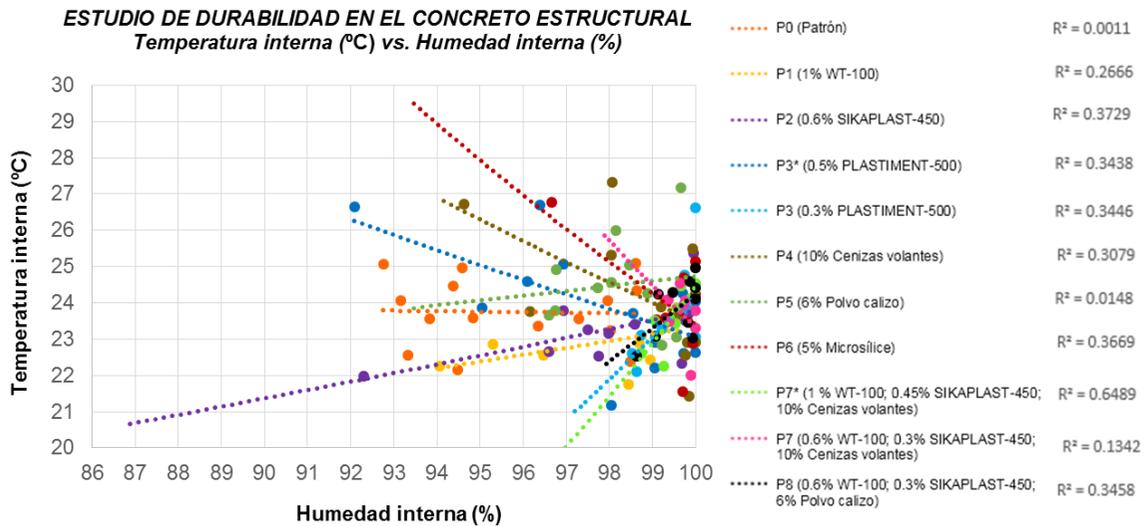
Anexo 25. Control de durabilidad para P7*.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 26. Resistividad eléctrica en función de la humedad interna.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 27. Resistividad eléctrica en función de la temperatura interna.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 28. Temperatura interna en función de la humedad interna.
Fuente: Elaboración propia (2023).

Código de serie	Código de Probeta	Peso (kg)	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Área transversal (cm ²)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión a los 14 días (kgf/cm ²)	Media aritmética (kgf/cm ²)	Desviación estándar	Resistividad eléctrica a los 14 días (kΩcm)	Media aritmética (kΩcm)	Desviación estándar
P0	P0-1	12.23	30.3	15	176.71	28100	159.01	-	-	2.73	-	-
	P0-2	12.87	30.2	15	176.71	-	-	152.51	7.97	-	2.73	0.00
	P0-3	12.08	30.3	15	176.71	25800	146.00	-	-	2.73	-	-
P1	P1-1	12.14	30.2	14.7	169.72	27450	161.74	185.28	28.83	2.30	2.36	0.08
	P1-2	12.24	30.2	15	176.71	36900	208.81	-	-	2.43	-	-
	P1-3	12.22	30.2	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
P2	P2-1	12.24	30.0	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
	P2-2	12.25	30.2	15	176.71	38700	219.00	209.66	11.44	2.53	2.50	0.03
	P2-3	12.09	30.2	15	176.71	35400	200.32	-	-	2.48	-	-
P3	P3-1	12.31	30.1	14.75	170.87	36350	212.73	-	-	2.93	-	-
	P3-2	12.17	30.1	15	176.71	36750	207.96	210.35	2.92	2.78	2.85	0.09
	P3-3	11.90	29.2	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
P4	P4-1	12.15	30.2	14.75	170.87	-	-	-	-	-	-	-
	P4-2	12.15	30.1	15	176.71	28900	163.54	163.96	0.52	3.00	2.99	0.02
	P4-3	12.17	30.3	15	176.71	29050	164.39	-	-	2.98	-	-
P5	P5-1	12.12	30.3	15	176.71	32950	186.46	-	-	2.80	-	-
	P5-2	12.70	30.1	15	176.71	-	-	174.72	14.38	-	2.83	0.03
	P5-3	12.22	30.3	15	176.71	28800	162.97	-	-	2.85	-	-
P6	P6-1	12.70	30.7	15	176.71	40750	230.60	-	-	3.83	-	-
	P6-2	12.21	30.3	15	176.71	42350	239.65	235.12	5.54	4.00	3.91	0.11
	P6-3	12.21	30.0	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
P7	P7-1	12.41	30.3	15	176.71	32650	184.76	-	-	2.90	-	-
	P7-2	12.28	30.1	15	176.71	31750	179.67	182.21	3.12	2.75	2.83	0.09
	P7-3	12.28	30.1	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
P8	P8-1	12.33	30.1	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-
	P8-2	12.79	30.4	15	176.71	37250	210.79	220.69	12.13	2.30	2.36	0.08
	P8-3	12.44	30.5	15	176.71	40750	230.60	-	-	2.43	-	-
P3*	P3*-1	12.04	30.0	15.1	179.08	34250	191.26	-	-	2.35	-	-
	P3*-2	12.17	30.0	15	176.71	-	-	201.16	12.13	-	2.31	0.05
	P3*-3	12.03	30.7	15.2	181.46	38300	211.07	-	-	2.28	-	-
P7*	P7*-1	12.28	30.0	15	176.71	30600	173.16	-	-	2.45	-	-
	P7*-2	12.19	30.0	15	176.71	26700	151.09	162.13	13.51	2.28	2.36	0.11
	P7*-3	12.62	30.3	15	176.71	-	-	-	-	-	-	-

Anexo 29. Registro de probetas cilíndricas.

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXOS

**ANEXO “B”
REGISTRO FOTOGRÁFICO**



Anexo 30. Materiales empleados.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 31. Aditivos WT-100, SIKAPLAST-450 y PLASTIMENT-500.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 32. Equipo Ibertest para ensayos de resistencia a compresión.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 33. Inconvenientes a nivel superficial en muestras con pasta de cemento.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 34. Retardo de fraguado por exceso de aditivos en serie P7*.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 35. Lectura nula en serie P7* a las 40 horas de evaluación.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 36. Procedimiento para manejo de Microsilíce.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 37. Colocación de conductos en probetas.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 38. Procedimiento de mezcla para concreto.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 39. Disminución de asentamientos en serie P3 debido a aumentos de relación a/c.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 40. Pérdida de fluidez en serie P3 debido a aumentos de relación a/c.
Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 41. Ensayos de resistencia a compresión en cubos.

Fuente: Elaboración propia (2023).



Anexo 42. Algunas probetas de concreto sometidas a ensayos de carga axial.

Fuente: Elaboración propia (2023).