

Resistividad eléctrica del hormigón y su dependencia con parámetros característicos

Furlán, Luciano Mario – Legajo N°34.733
Lanzilotta, Juan Manuel – Legajo N°29.971
Patané, Osvaldo Emmanuel – Legajo N°34.713

Director (o tutor) del trabajo: Ing. Marcelo Guzmán
Integrantes de la cátedra: Tit.: Ing. Pablo Martín
JTP.:Ing. Gustavo Castro
Ayte.:Ing. Helvio Grili

2023

Facultad Regional Mendoza
Universidad Tecnológica Nacional
Departamento Ing. Civil
Cátedra: Proyecto Final

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Dedicatoria

En primer lugar, queremos agradecer a nuestros padres, nuestros hermanos, novias y el resto de nuestra familia que estuvieron presentes brindándonos su apoyo incondicional en todo momento. Gracias por ser nuestros pilares y haber estado en aquellos momentos que tanto los necesitamos.

Especialmente manifestamos nuestro profundo agradecimiento al Dr. Ing. Marcelo Guzmán, por su dedicación, su disposición extraordinaria, fundamentalmente comprometido en la colaboración de la tesis, su importante trabajo y tiempo invertido tanto en las labores de revisión y recomendaciones, siempre con el ánimo de perfeccionar la misma aplicando los criterios que requiere un trabajo de estas características.

Finalmente, agradecer a nuestros amigos y compañeros de la facultad que hicieron que todo sea más fácil. Tantos proyectos, parciales y momentos compartidos con unos buenos mates para olvidarnos de las responsabilidades por un rato.

¡A todos ustedes, les estaremos eternamente agradecido!

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica (CeReDeTeC) de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza para la culminación del trabajo final de carrera de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Mendoza. Los autores agradecen a las autoridades, personal de laboratorio, investigadores y docentes la colaboración prestada.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Resumen

La necesidad de evaluar la durabilidad del hormigón ha llevado a buscar ensayos capaces de cuantificar todas las fases del proceso desde su fabricación hasta su curado y endurecimiento, a través de distintos parámetros. La resistividad eléctrica, como inversa de la conductividad, es una propiedad del hormigón que permite su control de manera no destructiva y que se relaciona íntimamente con otros parámetros característicos del mismo. Siendo la resistividad una medida de la mayor o menor posibilidad que un flujo eléctrico pueda conducirse a través de un material, en el caso específico del hormigón armado, el hecho de que presente una baja resistividad eléctrica atentará contra la durabilidad del mismo, dado que podrá presentarse una elevada velocidad de corrosión en la barra de acero y con ello aumentará la degradación del hormigón. En el presente trabajo se evalúa cómo influye en la resistividad del hormigón la variación de la relación a/c, así como también, dos tipos distintos de cemento, la incorporación de un aditivo hidrófugo, diferentes tiempos de curado por inmersión, y la edad del hormigón desde el momento de su elaboración.

Palabras Clave: resistividad eléctrica, corrosión, sonda de Wenner.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción.....	10
Descripción del problema.....	13
Objetivos de la investigación	18
Objetivo General	18
Objetivos Particulares.....	18
Generalidades	18
Metodología propuesta.....	18
Capítulo 2 Estado del arte.....	21
Capítulo 3 Resistividad.....	30
3.1 Propiedades eléctricas de los hormigones	30
3.2 Resistividad eléctrica	31
3.3 Medición mediante sonda de Wenner.....	32
Capítulo 4 Fase experimental	39
4.1 Hormigones de estudio	39
4.1.1. Hormigones elaborados con cementos puzolánicos.....	39
4.1.2. Hormigones elaborados con cementos fillerizados.....	40
4.1.3. Justificación por el uso del tipo de cementos.....	41
4.1.4. Cementos portland puzolánicos.....	41
4.1.5. Acciones de cementos puzolánicos sobre el hormigón.....	42

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

4.1.6. Cementos con fillers calcáreos.....	43
4.1.7. Influencia de la cantidad y la finura del filler.	43
4.1.8. Hidrófugo utilizado.....	45
4.1.9. Elaboración de probetas	45
4.1.10. Organización de muestras de ensayos.....	47
4.2 Metodología de medición.....	49
4.3 Cronograma de ensayos	50
4.4 Resultados de medición.....	53
Cemento Portland Puzolánico:.....	53
Cemento Portland con Filler Calcáreo:	55
Gráficas Cemento Portland Puzolánico.....	56
Gráficas Cemento Portland con Filler Calcáreo.....	63
Gráficas comparativas para distintos cementos	68
Capítulo 5 Conclusiones.....	73
Lista de referencias.....	77
Apéndice	80

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Lista de tablas

Tabla 1 Factores de forma según tamaño de probeta.....	37
Tabla 2 Características de las pastonadas.....	46
Tabla 3 Dosificación de pastonadas.....	47
Tabla 4 Dosificación de ensayo.....	48
Tabla 5 Designación de probetas.....	49
Tabla 6 Cronograma de curado de probetas.....	51
Tabla 7 Cronograma de mediciones de resistividad.....	52
Tabla 8 Resistividad promedio CPP.....	53
Tabla 9 Resistividad promedio CPF.....	55

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Lista de figuras

Figura 1 Proceso electroquímico (fuente. Hill & Kolb, Cap.8).....	14
Figura 2 Representación de la resistividad eléctrica.....	31
Figura 3 Sonda de Wenner para medir resistividad.....	32
Figura 4 Esquema de medición mediante la sonda de Wenner	33
Figura 5 Sonda de Wenner. Calibración del dispositivo	33
Figura 6 Humedecimiento de la superficie del hormigón a medir	34
Figura 7 Procedimiento de Medición sobre cada Probeta de estudio	35
Figura 8 Pantalla de medición de Resistividad.....	36
Figura 9 Resistencia a compresión vs. finura filler calcáreo.	44
Figura 10 Resistividad en pastonada P07.	58
Figura 11 Resistividad en pastonada P06.	59
Figura 12 Resistividad en pastonada P05.	59
Figura 13 Resistividad entre pastonadas para tiempo de curado 1 día.....	60
Figura 14 Resistividad en pastonada P07H.	61
Figura 15 Resistividad en pastonada P06H.	61
Figura 16 Resistividad en pastonada P05H.	62
Figura 17 Resistividad en pastonadas con y sin aditivo hidrófugo.	62
Figura 18 Resistividad en pastonada F07.....	64

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Figura 19 Resistividad en pastonada F06.....	64
Figura 20 Resistividad en pastonada F05.....	65
Figura 21 Resistividad en pastonada F07H.	65
Figura 22 Resistividad en pastonada F06H.	66
Figura 23 Resistividad en pastonada F05H.	66
Figura 24 Resistividad para diferentes relaciones a/c.	67
Figura 25 Resistividad entre pastonadas con y sin aditivo hidrófugo.	68
Figura 26 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,70.	69
Figura 27 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,60.	70
Figura 28 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,50.	70



Capítulo 1

Introducción

El hormigón armado es un material muy durable en la mayoría de los ambientes, pero en medios contaminados con cloruros o cuando las edades exceden 50 años, se puede producir la corrosión de su armadura. La demanda de durabilidad es actualmente creciente una vez que la resistencia mecánica ha sido bien diseñada y controlada. El diseño de un hormigón durable no es una tarea sencilla si se mantiene el criterio de economía máxima, ya que cualquier método de protección adicional de las armaduras resulta en un incremento de costos apreciable.

Las patologías en el hormigón son problemas o deterioros que pueden ocurrir en las estructuras de hormigón debido a diversas causas. Estas patologías pueden comprometer la integridad, la durabilidad y la funcionalidad de las estructuras. A continuación, se mencionan algunas de las patologías más comunes en el hormigón:

- **Corrosión:** La corrosión de las armaduras es una de las principales patologías que afectan al hormigón armado. Se produce cuando los agentes corrosivos, como la humedad y los cloruros, penetran en el hormigón y alcanzan las armaduras de acero. Esto puede debilitar las armaduras y provocar fisuras, desprendimiento de la capa de recubrimiento y pérdida de resistencia estructural.
- **Congelamiento-deshielo:** En regiones con climas fríos, el agua que penetra en el hormigón puede congelarse y expandirse durante el ciclo de congelación-deshielo. Esto puede provocar fisuras y desprendimiento del hormigón, lo que compromete su resistencia y durabilidad.
- **Acción de sulfatos:** Los sulfatos presentes en el suelo o en el agua pueden reaccionar con los componentes del hormigón y provocar una expansión y deterioro gradual. Esta



reacción puede resultar en fisuras, desintegración y pérdida de resistencia del hormigón.

- **Lixiviación:** La lixiviación es el proceso por el cual los componentes solubles del hormigón, como los iones de calcio, se disuelven y se lavan debido a la acción del agua. Esto puede debilitar el hormigón y provocar pérdida de resistencia y durabilidad.
- **Reacción álcali-agregado:** Algunos tipos de agregados utilizados en el hormigón pueden reaccionar químicamente con los álcalis del cemento, lo que genera una expansión interna en el hormigón a lo largo del tiempo. Esta expansión puede resultar en fisuras y desprendimiento del hormigón, afectando su durabilidad y resistencia.

Estas son solo algunas de las patologías más comunes en el hormigón. Es importante realizar un seguimiento regular de las estructuras de hormigón, implementar medidas preventivas adecuadas durante la construcción y realizar el mantenimiento necesario para prevenir y tratar estas patologías y garantizar la durabilidad y la seguridad de las estructuras, Di Maio et al. (1995).

Cada una de estas patologías mencionadas ocasiona manifestaciones en el hormigón de diversa índole, dependiendo del proceso de degradación y del estadio en que se encuentre el mismo. Al respecto, se puede citar la presencia de eflorescencias, fisuras, grietas, desprendimiento del recubrimiento, delaminación del acero de refuerzo, etc., como las principales sintomatologías de que alguna afectación se esté desarrollando en el hormigón.

En lo que respecta específicamente a la degradación del hormigón por corrosión de las armaduras, esta es una de las principales patologías que afecta a las estructuras de hormigón armado. Estadísticamente, la incidencia de la corrosión puede variar según diferentes factores, como la ubicación geográfica, el entorno ambiental, el tipo de estructura y las condiciones de mantenimiento. Aunque los datos específicos pueden variar, se estima que la corrosión de las

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

armaduras representa aproximadamente el 40% de las patologías observadas en las estructuras de hormigón, Dal Molin (1988).

La corrosión de las armaduras es una preocupación importante debido a su impacto significativo en la durabilidad y la integridad estructural. Los procesos de corrosión pueden verse influenciados por la exposición a agentes agresivos, como cloruros, sulfatos, dióxido de carbono y humedad, así como por deficiencias en el diseño, la construcción y el mantenimiento de las estructuras.

Es importante tener en cuenta que la prevención y el control de la corrosión de las armaduras requieren medidas adecuadas durante la etapa de diseño, la selección de materiales, la aplicación de técnicas de protección y la implementación de programas de mantenimiento. Estas medidas ayudan a minimizar los riesgos asociados con la corrosión y a garantizar la vida útil y la seguridad de las estructuras de hormigón, Bermúdez Miguel A. (2011).

Los costos de reparación de estructuras afectadas por corrosión pueden variar considerablemente dependiendo de varios factores, como el tipo y la gravedad de la corrosión, el tamaño y la complejidad de la estructura, y el acceso a la zona afectada. En los países desarrollados, donde las estructuras suelen ser más grandes y complejas, los costos de reparación pueden ser significativos.

Las reparaciones relacionadas con la corrosión de las armaduras pueden implicar diferentes aspectos, como la eliminación y reemplazo de las áreas afectadas, la reparación del recubrimiento de hormigón, la protección de las armaduras, la rehabilitación estructural y la implementación de medidas de prevención a largo plazo.

Es difícil proporcionar una cifra exacta para los costos de reparación, ya que varían según las circunstancias específicas de cada caso. Sin embargo, algunos estudios e investigaciones indican que los costos de reparación por corrosión pueden oscilar entre el 3% y el 5% del producto interno bruto (PIB) anual de un país. Estos costos incluyen no solo las reparaciones directas, sino

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

también los costos indirectos asociados, como el tiempo de inactividad de la estructura, los costos de inspección y monitoreo, y los impactos económicos en sectores relacionados.

Es importante destacar que la implementación de medidas de prevención y mantenimiento adecuadas desde el inicio de la vida útil de las estructuras puede ayudar a reducir significativamente los costos de reparación a largo plazo. La inspección regular, el monitoreo de la corrosión, la protección catódica, el recubrimiento adecuado de las armaduras y el diseño apropiado son algunas de las medidas que pueden ayudar a prevenir y mitigar los efectos de la corrosión, lo que a su vez reduce los costos de reparación, Castañeda y Rodríguez (2014).

Descripción del problema

La corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón es un fenómeno electroquímico complejo que implica varias etapas. A continuación, se describe brevemente el proceso corrosivo electroquímico (Figura 1):

1. Inicio de la corrosión: La corrosión de las armaduras comienza cuando hay un suministro de oxígeno y humedad en presencia de un electrolito en el hormigón. El agua presente en el hormigón a través de sus poros actúa como el electrolito, mientras que el oxígeno está disponible en el ambiente o se puede disolver en el agua.
2. Formación de celdas electroquímicas: En presencia de humedad, se forman celdas electroquímicas en la superficie del acero de refuerzo. Estas celdas se componen de dos áreas: el ánodo y el cátodo.
3. Ánodo: En el ánodo, ecuación (1), se produce la oxidación del hierro presente en el acero, lo que lleva a la formación de iones de hierro (Fe^{2+}) y la liberación de electrones. La reacción anódica se representa como:



Esta oxidación del hierro ocurre en las áreas expuestas de las armaduras y crea sitios anódicos donde se generan iones de hierro.

4. Cátodo: En el cátodo, ecuación (2), se produce una reducción que generalmente involucra la reacción de oxígeno y agua. La reacción más común es la reducción del oxígeno y la formación de hidróxido de hidrógeno (OH^-) en la siguiente reacción:



La reducción del oxígeno puede tener lugar en áreas cercanas al ánodo, donde hay un suministro de oxígeno disuelto en el agua o en áreas con acceso limitado al oxígeno, como microgrietas o áreas confinadas de la estructura.

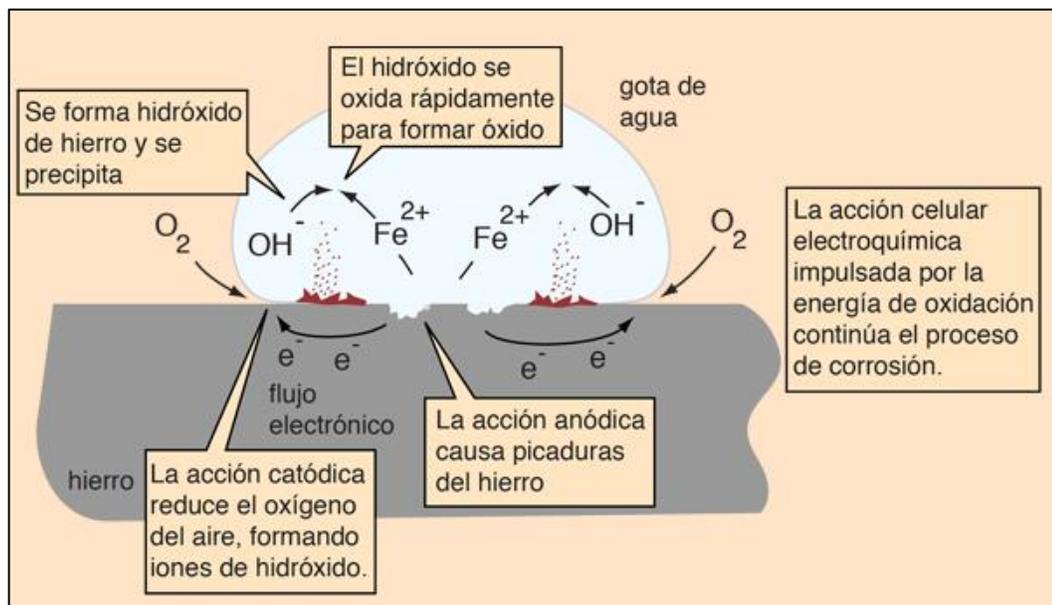


Figura 1 Proceso electroquímico (fuente. Hill & Kolb, Cap.8)



5. Transporte iónico: Para mantener la continuidad de la corriente, los iones de hierro generados en el ánodo se mueven a través del agua del hormigón hacia el cátodo, donde se produce la reacción de reducción. Este transporte iónico puede ocurrir a través del agua de humedad presente en el hormigón.
6. Despasivación: En condiciones normales, el hormigón proporciona una protección pasiva a las armaduras debido a su alta alcalinidad. La alcalinidad del hormigón (pH alto, generalmente superior a 12) crea una capa protectora de óxido de hierro (Fe_3O_4) en la superficie del acero de refuerzo, que se conoce como película pasiva. Esta película pasiva protege el acero de la corrosión al inhibir la oxidación del hierro.
7. Fenómeno de despasivación: Sin embargo, diversas circunstancias pueden provocar la despasivación de las armaduras. La despasivación es el proceso en el cual se rompe la película pasiva y se inicia la corrosión del acero. Las causas más comunes de despasivación son:
 - a. Carbonatación: La carbonatación del hormigón ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico penetra en el hormigón y reacciona con los compuestos alcalinos presentes, reduciendo el pH. La carbonatación disminuye la alcalinidad del hormigón en la zona cercana a la superficie, lo que debilita la película pasiva y puede llevar a la despasivación de las armaduras.
 - b. Ingreso de cloruros: Los iones de cloruro, generalmente provenientes de fuentes externas como el agua salada o productos de limpieza con cloruro, pueden ingresar al hormigón y alcanzar las armaduras. Los cloruros tienen la capacidad de romper la película pasiva y desencadenar la despasivación del acero.
8. Características intrínsecas del hormigón: Varios factores intrínsecos del hormigón pueden influir en el proceso corrosivo. Entre ellos:

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

a. Resistividad eléctrica: es un parámetro importante por considerar en relación con la corrosión del acero embebido en el hormigón. La resistividad eléctrica del hormigón afecta directamente la conducción de corriente eléctrica generada por el flujo de iones en el material.

En un hormigón armado, si la resistividad eléctrica es baja, significa que el material tiene una mayor capacidad de conducir la corriente eléctrica. En este caso, se incrementa la velocidad de corrosión en la barra de acero embebida en el hormigón.

Una baja resistividad eléctrica del hormigón indica que hay una mayor facilidad para el transporte de iones, incluyendo los iones responsables de la corrosión, como los iones de cloruro. Estos iones corrosivos pueden alcanzar más rápidamente las barras de acero, aumentando la velocidad de corrosión y, por lo tanto, la degradación del hormigón.

Por lo tanto, es deseable que el hormigón tenga una resistividad eléctrica alta, lo que indica una menor capacidad de conducir la corriente eléctrica y, en consecuencia, una menor velocidad de corrosión en las armaduras de acero.

La resistividad eléctrica del hormigón puede ser influenciada por varios factores, como la relación agua-cemento, el contenido de humedad, la composición del hormigón y el nivel de carbonatación. Estos factores deben ser considerados durante el diseño y la producción del hormigón, así como durante la evaluación de su durabilidad y mantenimiento a lo largo del tiempo.

b. Relación agua-cemento (a/c): Una alta relación agua-cemento proporciona una mayor porosidad y permeabilidad al hormigón, lo que facilita la entrada de agentes corrosivos y la propagación de la corrosión.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

- c. Porosidad y permeabilidad: El hormigón con alta porosidad y permeabilidad permite la penetración más rápida de la humedad y los agentes corrosivos, lo que acelera el proceso corrosivo.
 - d. Cobertura del refuerzo: La calidad y el espesor de la capa de recubrimiento del hormigón sobre las armaduras (cobertura) son fundamentales para protegerlas de la corrosión. Una cobertura inadecuada o dañada facilita el ingreso de agentes corrosivos y aumenta el riesgo de despasivación.
9. Características exógenas: Además de las características intrínsecas del hormigón, existen factores externos que también influyen en el proceso corrosivo, como:
- a. Exposición a ambientes agresivos: La presencia de sustancias corrosivas, como cloruros, sulfatos, productos químicos industriales o agua salada, puede acelerar la corrosión de las armaduras.
 - b. Humedad y contenido de humedad: Un alto nivel de humedad o exposición constante a la humedad favorece la corrosión al proporcionar un medio para el transporte de iones y el inicio de reacciones electroquímicas.

En resumen, el fenómeno electroquímico de la corrosión de las armaduras en el hormigón implica la despasivación previa del acero, donde se rompe la película pasiva protectora. La carbonatación, el ingreso de cloruros y otras condiciones que reducen la alcalinidad del hormigón pueden desencadenar la despasivación. Además, las características intrínsecas del hormigón, como la relación agua-cemento, porosidad y permeabilidad, resistividad eléctrica, junto con factores exógenos como la exposición a ambientes corrosivos y la humedad, influyen en la velocidad y gravedad del proceso corrosivo.



Objetivos de la investigación

Objetivo General

- Evaluar el efecto que diferentes parámetros característicos del hormigón tienen sobre la resistividad eléctrica.

Objetivos Particulares.

- Contribuir al conocimiento de la propiedad “resistividad eléctrica” del hormigón como un parámetro de durabilidad
- Reconocer cuáles son los parámetros que más influyen en la variación de resistividad eléctrica del hormigón.
- Adquirir experiencia en la técnica de medición de la resistividad eléctrica.
- Potenciar la calidad de la docencia y la investigación dentro de la temática de durabilidad del hormigón armado.

Generalidades

En el presente informe se utiliza el “.” (punto) como separador de miles y la “,” (coma) como indicador de decimales. Las unidades corresponden a lo definido según el Sistema Internacional (SI).

Todas las figuras, diagramas, gráficos y tablas se consideran elaboración propia a menos que explícitamente se indique la fuente.

Metodología propuesta

La metodología propuesta en la presente investigación implica:

1. Análisis del estado del arte: se procederá a la lectura de los artículos más relevantes y actuales referidos a la temática abordada.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

2. Elección de parámetros característicos: dado el interés en evaluar el efecto de estos sobre la resistividad eléctrica del hormigón, la elección de los mismos surgirá a partir del análisis de la literatura y de aspectos regionales tales como el uso de materiales locales y de las costumbres constructivas de mayor apego en obras de pequeña envergadura.
3. Selección de dosificaciones de estudio: se adoptarán fundamentalmente distintas relaciones agua/cemento para las mezclas de estudio, considerando para las mismas distintos tipos de cemento, y la incorporación en algunos casos de un aditivo hidrófugo.
4. Elaboración de mezclas y moldeo de probetas: las dosificaciones serán proporcionadas empíricamente, en peso, considerando las costumbres de uso local. En cuanto a la preparación de las probetas, se considerará lo establecido en la Norma IRAM 1524.
5. Medición de resistividad eléctrica: como técnica de evaluación se utilizará el método de las cuatro puntas o también conocido como sonda de Wenner, la cual se dispone en el dispositivo CANIN (Proceq). Previo a las mediciones experimentales, se procederá a una capacitación acerca del uso del dispositivo propuesto.
6. Interpretación de resultados: obtenidas las diferentes mediciones, se procederá a la interpretación de las mismas. Para evaluar la tendencia de las resistividades medidas y el efecto que sobre estas producen los diferentes parámetros característicos considerados en el estudio, se utilizará una planilla de cálculo Excel.
7. Conclusiones de la investigación: a partir de la interpretación de los resultados obtenidos, se procederá a describir una síntesis con las conclusiones consideradas más relevantes.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

8. Redacción del Proyecto Final: redacción del reporte final el cual será puesto a consideración del cuerpo docente de la cátedra de Proyecto Final de Grado para su respectiva evaluación.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	----------------	---------------------

Capítulo 2

Estado del arte

Una metodología de predicción de la vida útil de estructuras de hormigón armado mediante el uso de indicadores de corrosión fue propuesta por D'Andréa R. (2010). En ese sentido, se encontró que la resistividad eléctrica es el indicador de corrosión mejor valorado en cuanto a la técnica y a los atributos de aplicación. Se trata de una propiedad que se correlaciona apropiadamente con la resistencia a compresión y la capacidad de transporte de los agentes agresivos hacia el interior del hormigón. Entre otras determinaciones, se proponen valores mínimos de resistividad aparente que los hormigones debieran presentar, según el tipo de exposición, el recubrimiento mínimo y la vida útil prevista para estos.

Por otra parte, Orellana V. M. y Estrella J. P. (2010) determinaron la resistividad eléctrica del hormigón con el propósito de conocer su comportamiento a la protección que le confiere a las armaduras embebidas. Se elaboraron dos tipos de hormigón, con cemento puzolánico y con cemento portland tipo II, los cuales fueron expuestos a distintas condiciones de exposición, una cámara de carbonatación, inmersión en cloruro de sodio, y en una condición de exposición de ambiente normal. Las mediciones de resistividad fueron llevadas de forma periódica cada 15 días y durante seis meses. Se observó que la resistividad fue creciente con el tiempo, y que los hormigones con cemento puzolánico presentaron mejor resistividad que los elaborados con cemento tipo II. En los que respecta a los tipos de exposición, la inmersión en cloruro de sodio resultó ser la condición más agresiva para las armaduras.

La relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro fue estudiada por González Sersen (2011), enmarcándose la investigación en la necesidad de encontrar un procedimiento rápido y no destructivo de inspección que permita

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

evaluar in situ la vulnerabilidad de una estructura de hormigón armado. Para abordar la investigación se compararon 12 series de hormigones con distinta permeabilidad (a/c 0,45 y 0,55) y distintos tipos de cemento (Portland puro, Portland puzolánico y Portland siderúrgico). También se consideró como variable la temperatura de colocación del hormigón (15°C y 30 °C) para verificar la posible alteración en la permeabilidad de este. La medición de la resistividad fue llevada a cabo con el método de Wenner. Se concluye que, para garantizar la durabilidad y protección contra la corrosión de las armaduras, se debe obtener una microestructura de hormigón densa con sus redes de poros discontinuas para dificultar el desplazamiento de iones y el paso de cloruros a través del hormigón. Para ello es necesario utilizar relaciones a/c bajas, adecuada compactación y un curado apropiado. Las puzolanas pueden mejorar la impermeabilidad del hormigón al reducir el transporte de sustancias agresivas. La humedad, sin llegar a la saturación, y las altas temperaturas pueden influir en la corrosión. Por último, se recomienda realizar pruebas específicas para evaluar el transporte de sustancias agresivas y tener en cuenta las normativas específicas para estructuras de hormigón en ambientes agresivos. Se enfatiza que el control de resistencia es orientativo y que se deben considerar otros aspectos para evaluar la durabilidad de una estructura de hormigón armado.

C. Andrade y R. d'Andréa (2011), abordaron el análisis de la resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. En la investigación se destaca que la resistividad eléctrica es una propiedad física del hormigón, la cual permite ser un indicador de la calidad del hormigón dado que se relaciona con la porosidad y con el grado de saturación, por lo tanto, puede servir para el control del grado de curado que se ha llevado a cabo. Experimentalmente la medida de la resistividad fue determinada mediante dos métodos: la medición directa, colocando unos electrodos en las caras paralelas de las probetas cilíndricas, y la medición mediante el método de las cuatro puntas o método de Wenner, que consiste en usar un resistímetro portátil. La medición de la resistividad también fue correlacionada con otras características del hormigón, permitiendo valorar aspectos tales como el endurecimiento

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

en estado fresco, la resistencia a la penetración de los cloruros, la carbonatación, y la velocidad de corrosión de la armadura. Una de las conclusiones más relevantes obtenidas y relacionadas con la durabilidad frente a procesos corrosivos de las armaduras, indica que a mayor resistividad se produce un movimiento menor de las cargas eléctricas (los iones de los poros del hormigón) debido a que mayor resistividad indica menor porosidad del hormigón.

Hornbostel et al. (2013) analiza la relación existente entre la velocidad de corrosión y la resistividad del hormigón. El proceso de corrosión de las armaduras del hormigón está parcialmente controlado por el transporte de iones a través de la microestructura del hormigón. La capacidad de un material para resistir la transferencia de carga depende de la resistividad eléctrica. Por lo tanto, podría esperarse una conexión entre el proceso de corrosión del acero embebido en el hormigón y la resistividad eléctrica del hormigón. El documento identifica la aplicabilidad y la limitación de la relación Corrosión-Resistividad y evalúa su idoneidad para la evaluación y predicción del período de propagación. La dependencia entre la velocidad de corrosión y la resistividad varía entre estudios y no se puede establecer una única relación entre ellos. El artículo revisa y evalúa la influencia de factores que incluyen la configuración experimental, el diseño de la mezcla de hormigón y la causa de la corrosión para abordar la variación. Se observa la variación en la relación C-R y evalúa la influencia del material y la exposición en la relación. La discusión se basa en las líneas de regresión de la figura. La dispersión de los datos de campo abarca todas las líneas de tendencia, lo que demuestra las dificultades que se enfrentan al tratar de evaluar la tasa de corrosión de manera precisa midiendo la resistencia del concreto en el campo. La investigación identifica la aplicabilidad y la limitación de la relación C-R y evalúa su idoneidad para la evaluación y predicción del período de propagación. La dependencia entre la velocidad de corrosión y la resistividad varía entre estudios y no se puede establecer una única relación entre ellos. Se evalúa también la influencia de factores que incluyen la configuración experimental, el diseño de la mezcla de concreto y la causa de la corrosión para abordar la variación. Se concluye que existe una correlación

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

inversamente proporcional entre la velocidad de corrosión y la resistividad del hormigón. Sin embargo, la dependencia varía entre estudios y no se puede establecer una única relación entre estos parámetros. La resistividad del hormigón está influenciada por una variedad de parámetros y es particularmente susceptible a los cambios de humedad. Los iones de cloruro disminuyen la resistividad, mientras que el tipo de cemento y la relación a/c tienen un efecto menos significativo.

Según Guzmán et al. (2018), se observó la dependencia de los valores de resistividad eléctrica con la relación a/c (0,5; 0,6, 0,7 y 0,8), con el tipo de cemento (puzolánico y fillerizado), y con la incorporación del aditivo hidrófugo (con y sin hidrófugo). Para inferir la probabilidad de corrosión, se tomaron los valores de referencia establecidos en las Instrucciones de uso del analizador de corrosión de Proceq, i) Si $\rho_p > 12 \text{ k}\Omega\text{cm}$ no es probable que exista corrosión; ii) Si $8 \text{ k}\Omega\text{cm} < \rho_p < 12 \text{ k}\Omega\text{cm}$ es posible que exista corrosión; y iii) Si $\rho_p < 8 \text{ k}\Omega\text{cm}$ es muy probable que exista corrosión. En ninguno de los casos de estudio se logró alcanzar la zona de baja probabilidad de corrosión. Para las relaciones a/c utilizadas, se pudo establecer que las mismas incidieron en los valores determinados de resistividad eléctrica en estado saturado. A mayor relación a/c, menor resistividad. Diseñar un hormigón durable frente a un mecanismo de degradación que involucre la corrosión del acero, implica la utilización de relaciones a/c no mayores a 0,45. De este modo se logra una matriz cementicia menos permeable a la solución de poros y, en consecuencia, a una mayor dificultad al desplazamiento de los electrones en la microestructura del hormigón. Esta limitación a la máxima relación a/c inferida, fundamentada en los valores experimentales obtenidos para la resistividad, se corresponde con los valores límites indicados por las reglamentaciones como uno de los requisitos de durabilidad a ser tenidos en cuenta en hormigones armados y/o pretensados. En cuanto a los tipos de cementos utilizados, las pastonadas elaboradas con cemento puzolánico tuvieron un mejor desempeño que aquellas en las que se utilizó cemento fillerizado. Esto se debería a que la reacción puzolánica da lugar a una disminución de la concentración de Ca(OH)_2 , y con ello, a una menor



concentración iónica (menor conductividad eléctrica). Por ello, en condiciones ambientales propicias para el desarrollo del fenómeno de corrosión, resultaría recomendable la utilización de cementos puzolánicos.

Morris W. et al. (1996) establecieron valores de una constante de corrección, denominada K, para relacionar los valores de resistividad obtenidos en probetas estándar cilíndricas de hormigón con los valores verdaderos de resistividad que tendría realmente el hormigón, utilizando el método de las 4 puntas o de la sonda de Wenner. Los valores de K fueron determinados de forma experimental y numéricamente mediante simulación de Elementos Finitos con poca variación entre los valores medidos empíricamente y los obtenidos por el modelo. Se utilizaron mezclas con la misma relación agua/cemento (0,37), pero con cementos de diferente tipo I y II, y diferentes tipos de agregados y porcentaje de puzolanas. Se obtuvieron gráficos que, mediante la relación entre la distancia de los electrodos centrales de la sonda de Wenner (a) y el diámetro d y la longitud L de la probeta, permiten obtener el valor de la constante de corrección K. Dicha constante varía entre un valor de 1,2 a 3,8 dependiendo de la relación L/a y d/a que tengan.

Gowers y Millard (1999) establecieron en su investigación las 6 principales fuentes de error al medir resistividad utilizando el método de la sonda de Wenner. El primero de ellos son las limitaciones geométricas, las cuales pueden dar sobre estimaciones en los valores medidos si el elemento analizado es demasiado pequeño. De manera experimental se obtuvo que el espaciado de los nodos no debe superar $\frac{1}{4}$ de las dimensiones de la sección de hormigón y que la distancia de dichos contactos respecto del borde del elemento estudiado debe ser al menos el doble del espaciado entre nodos. La segunda fuente de error es la superficie de contacto, en la cual debe asegurarse una correcta transmisión eléctrica. La tercera es la no homogeneidad del hormigón, al estar compuesto por agregados, los cuales tienen mucha más resistividad que el resto de los componentes de la mezcla, la separación de las puntas de la sonda debería ser

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

superior a 1,5 veces el tamaño máximo del árido. La cuarta es la presencia de armadura de acero, la cual distorsiona los valores obtenidos si se mide directamente sobre la misma. Para evitar errores significativos se puede medir de forma ortogonal a la armadura o con una separación de contactos de la sonda que sea menor a 2/3 del recubrimiento de hormigón de la armadura. La quinta es la existencia de una capa superficial de diferente resistividad, como lo puede ser una capa carbonatada, su espesor debe medirse y la separación entre contactos debe ser al menos 8 veces dicho espesor para evitar errores en la medición. Por último, se encuentra el efecto de las condiciones ambientales, como es la temperatura ambiente, la cual ocasiona variación en las mediciones y se debe aplicar un factor de corrección de +1 kΩcm por cada 3° C de caída de temperatura respecto de una temperatura considerada estándar para las mediciones. Si ha llovido y la superficie de medición se encuentra húmeda, la separación entre nodos debe ser mayor o igual a 4cm para evitar errores.

Otros autores y comités dedicados a la investigación como RILEM se han abocado al estudio de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de hormigón desde el 1960. En este sentido, RILEM TC 154-EMC (2000), presenta un informe relacionado con las técnicas electroquímicas de medición de la corrosión en el acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado; para lo cual plantean dos métodos generales, uno de ellos denominado Medición de Potencial de Media Celda, el cual utiliza distintas técnicas de medición para establecer cuál es la tasa de corrosión en el acero de refuerzo medida a partir de la resistencia de polarización, definida como la pendiente de la curva que relaciona la diferencia de potencial con la intensidad de corriente. Teniendo en cuenta que la corrosión en el acero está directamente relacionada con la resistividad eléctrica del hormigón, el otro método que propone el autor es la medición de la resistividad in-situ del hormigón. En este sentido los métodos propuestos son el método de Wenner o de las cuatro puntas, con cuatro sondas exteriores que se apoyan en la superficie de hormigón; y métodos que involucran la red de barras de acero de refuerzo usados como electrodos, en donde se coloca un electrodo de metal sobre la superficie del hormigón y se mide

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

la resistencia entre este electrodo y el acero de refuerzo, siendo denominado el Método de dos electrodos. Para ser utilizado, requiere una conexión entre el mallado del acero y una continuidad completa del mismo, siendo una característica que lo hace más complejo que el método de cuatro puntas. Por último, se menciona otro arreglo que puede utilizarse en la medición de resistividad mediante la utilización de dos electrodos colocados en la superficie de hormigón, evitando la necesidad de hacer contacto eléctrico con el acero de refuerzo, siendo una técnica muy sensible a la presencia de barras de acero que pueden ocasionar una alteración en la medición. Debido a que la cantidad de corriente en funcionamiento depende del contacto entre el electrodo y el hormigón, el método es más sensible a las variaciones en la ejecución que los otros métodos descritos anteriormente. Para un diámetro de electrodo dado y una operación precisa, este método puede dar buenos resultados de resistencia, no se recomienda la conversión a resistividad. Como un aporte importante al tema, se presentan valores de globales de referencia de resistividad eléctrica en estructuras existentes, construidas con cemento Portland Normal, relacionado con el riesgo de corrosión del acero. Dichos valores establecen que cuando la resistividad es menor a 10 kΩ.cm la probabilidad de riesgo de corrosión es alta, entre 10 y 50 la probabilidad es moderada, entre 50 y 100 es baja, y por último, para resistividades superiores a 100 la probabilidad es despreciable.

Silva et al. (2011) abordan el control de calidad del hormigón y proponen la medición de la resistividad eléctrica (RE) como un indicador de sus características y durabilidad. La RE del hormigón se relaciona con la corrosión, la protección del refuerzo de acero y el rendimiento duradero. Se determina mediante la colocación de electrodos en la superficie y la medición de la resistencia. La RE está influenciada por la microestructura de la matriz de cemento, la hidratación de la pasta de cemento, la humedad relativa, la temperatura y la concentración de iones en los poros. Se utiliza principalmente para evaluar la actividad de corrosión del refuerzo.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

El estudio comparó dos métodos de medición, el de electrodo de dos placas y el de cuatro puntos (método de Wenner). Se encontró que el método de cuatro puntos proporciona valores de resistividad más altos que el de dos placas. Además, se establece una buena conexión entre las medidas de resistividad obtenidas con corriente alterna (CA) y corriente continua (CC). La resistividad medida con CC fue mayor que la medida con CA. Los resultados mostraron una evidencia positiva entre la resistividad y la resistencia mecánica del hormigón. Se concluyó que el método de cuatro puntos es una técnica simple y efectiva para el control de calidad de la resistividad eléctrica, la cual, puede ser un parámetro adicional para evaluar el comportamiento y la durabilidad de las estructuras de hormigón, lo que contribuye al desarrollo sostenible al minimizar reparaciones y maximizar la vida útil de las estructuras.

La norma estadounidense ASTM C1202 (2012) también establece un método diferente de medición, en este caso de conductividad, de probetas o testigos cilíndricos de hormigón que permiten determinar la penetrabilidad de iones de cloruro en el hormigón. Establece varios niveles de penetrabilidad que van desde “negligente” cuando la carga que circula por las probetas es menor a 100 C (Coulombs) hasta “alta” cuando la carga circulante es superior a 4000 C.

La norma española UNE 83988-1 (2014) establece el método de ensayo para determinar el valor de resistividad mediante el método directo. Por otro lado, la norma UNE 83988-2 (2014) establece el método de ensayo para determinar el valor de resistividad de probetas o testigos cilíndricos utilizando el método de las 4 puntas o de Wenner. Además de establecer el procedimiento estandarizado que se debe seguir para lograr las mediciones, establece factores de corrección geométrica para cuando se utiliza este método en medios semi-finitos y también da la forma de calcular factores de corrección de forma para cuando se aplica dicho ensayo en probetas de diferentes dimensiones y con distancias entre puntas de la sonda de Wenner distintas.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Araújo y Meira (2020) establecieron una correlación entre las propiedades resistentes del hormigón y su resistividad superficial. En este estudio ensayaron probetas cilíndricas de hormigón de 10 cm de diámetro y 20 cm de largo con diferentes resistencias características. Se realizaron mediciones de resistividad utilizando el método de la sonda de Wenner, y ensayos de compresión y de tracción indirecta por corte. Obtuvieron como conclusión una correlación aproximada entre los valores de resistencia característicos y los valores obtenidos de resistividad, con la cual lograron establecer funciones logarítmicas que establecen dicha relación.

De la revisión de la literatura abordada, se puede establecer que la resistividad eléctrica del hormigón es una propiedad de sumo interés, ya que está directamente relacionada con la durabilidad del hormigón ante mecanismos de degradación que involucran a la corrosión de las armaduras embebidas. Conocer entonces aquellas variables que inciden en la resistividad, permiten prever características propias del diseño de hormigones que permitan garantizar la vida útil deseada para los mismos. Por otra parte, el control de la resistividad en estructuras existentes permite entender el posible deterioro de estas. Al respecto, poder valorar la resistividad que un hormigón posee implica el poder medirla. En la actualidad, el método de medición más difundido es el de sonda de 4 puntas o método de Wenner, caracterizado por ser un método sencillo, no destructivo y, de rápida aplicación.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	----------------	---------------------

Capítulo 3

Resistividad

3.1 Propiedades eléctricas de los hormigones

Los hormigones, al igual que el resto de los materiales, poseen propiedades que los identifican. Son de particular interés para el desarrollo de este proyecto, las propiedades eléctricas que los caracterizan, específicamente lo relacionado a la resistividad eléctrica. En ese sentido, la resistividad eléctrica es una propiedad única para cada material, y es el recíproco de su conductividad. La unidad de medida empleada es el $k\Omega \cdot \text{cm}$ u $\Omega \cdot \text{m}$.

En el caso del hormigón, la resistividad eléctrica depende del grado de hidratación, de la porosidad, de la composición química de la solución de poros y del grado de saturación de estos (Polder et al., 2000), pero también, del tiempo disponible de curado al cual ha estado sujeto el hormigón (Guzmán et al., 2017).

Una vez que se destruye la pasividad del acero, ya sea por carbonatación, lixiviación de compuestos cálcicos o bien por penetración del ion cloruro, las armaduras embebidas podrán estar sujetas a procesos corrosivos toda vez que exista disponibilidad de humedad y oxígeno.

La velocidad a la cual se desarrolla el proceso de corrosión en las armaduras es controlada por la resistividad eléctrica del hormigón, siendo esta una medida de la menor o mayor capacidad del hormigón de actuar como electrolito y, en consecuencia, de poder conducir las corrientes inducidas por el fenómeno electroquímico de corrosión.



3.2 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad que presenta un material para oponerse a la conducción de la corriente eléctrica a través de este. La Ley de Ohm establece que la intensidad I de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico medida en amper [A] es directamente proporcional a la diferencia de potencial V aplicada, medida en volt [V], e inversamente proporcional a la resistencia R del material medida en ohm [Ω]. Esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

La resistividad es definida como el grado de dificultad que encuentran los electrones en sus desplazamientos, y su valor describe el comportamiento de un material frente al paso de corriente eléctrica, por lo que da una idea de lo buen o mal conductor que este resulta ser. Un valor alto de resistividad indica que el material es mal conductor, mientras que uno bajo indica que es un buen conductor. La resistividad eléctrica se define como:

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (4)$$

siendo ρ la resistividad eléctrica medida en [$\Omega \cdot m$], A el área de la sección transversal del material [m^2] y L la longitud del material [m], según esquema Figura 2 .

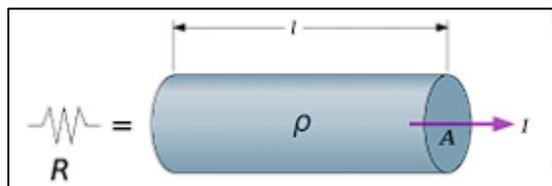


Figura 2 Representación de la resistividad eléctrica



En el caso particular del hormigón, cuanto mayor resulta ser su resistividad eléctrica, menor es su porosidad, y en consecuencia, mayor resulta ser su resistencia mecánica al tener más fase sólida por volumen (grado de hidratación). Por otra parte, si el hormigón no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación.

3.3 Medición mediante sonda de Wenner

Por lo dicho, la valoración de la resistividad eléctrica en hormigones resulta de sumo interés. En ese sentido, para poder medirla en estructuras existentes, así como también en probetas moldeadas, es común emplear como técnica de valoración el método de la sonda de las cuatro puntas o también conocido como método de Wenner (Polder et al., 2000).



Figura 3 Sonda de Wenner para medir resistividad

Dicho ensayo es una técnica del tipo END (Ensayo No Destructivo), lo cual la califica como un ensayo práctico y de amplia aplicación. En la figura 3 se muestra la sonda de Wenner utilizada en la presente investigación.

Sobre la superficie del hormigón a medir, se colocan los electrodos en línea separados una distancia "a" entre sí, y se aplica una corriente de Intesidad " I " a través de los electrodos extremos, mientras que la caída de potencial " V " resultante se mide con los electrodos internos. En Figura 4 se presenta el esquema de medición mediante la sonda de Wenner. La resistividad expresada en $k\Omega.cm$ resulta entonces:



$$\rho = 2 \pi a \frac{V}{I}$$

(5)

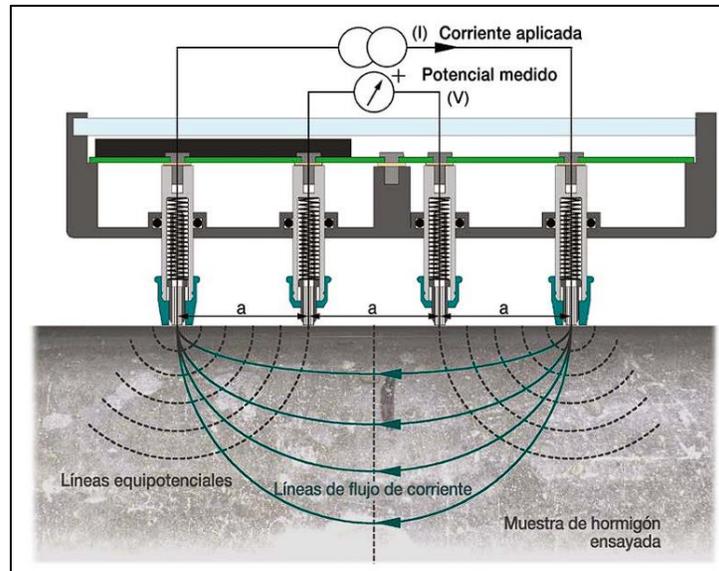


Figura 4 Esquema de medición mediante la sonda de Wenner

En nuestro caso, el equipo utilizado cuenta con la sonda Wenner de 4 puntas con una separación “a” entre electrodos de 50 mm, y con el dispositivo de interfaz encargado de registrar las mediciones realizadas.



Figura 5 Sonda de Wenner. Calibración del dispositivo



Previo a la medición de la resistividad en las probetas de estudio, se tuvieron en cuenta ciertas premisas tales como la calibración de la sonda de acuerdo con lo establecido en el manual de instrucciones Proceq emitido por el fabricante del equipo (Figura 5), y con la preparación de la superficie de medición, lo cual consistió en dejar las probetas sumergidas en agua durante 72 h previas a la medición, para garantizar así la saturación de estas.

Con el fin de garantizar un adecuado contacto entre la sonda y la superficie del hormigón, se procedió a humedecer las almohadillas de la sonda, así como también, a humedecer la superficie de hormigón a medir, utilizando para ello una goma espuma saturada con agua la cual se pasó sobre la superficie de la probeta (Figura 6). Posteriormente, se procedió a la medición de la resistividad (Figura 7).



Figura 6 Humedecimiento de la superficie del hormigón a medir



Por cada probeta, se tomaron tres lecturas en distintos sectores de la superficie de esta, siendo el valor de resistividad obtenido el correspondiente al promedio de estas tres lecturas obtenidas.



Figura 7 Procedimiento de Medición sobre cada Probeta de estudio

En la pantalla del dispositivo de registro se registran distintos valores, de acuerdo a la indicado en la Figura 8, entre ellos se destaca número de objeto medido "1", la posición de medición según las posiciones guardadas en el equipo "2", la posición en la memoria del instrumento "3",



el valor de resistividad registrado “4” y el valor de corriente que monitorea el flujo de corriente a través del hormigón “5”, indicando si existe un contacto adecuado entre la sonda y el hormigón.

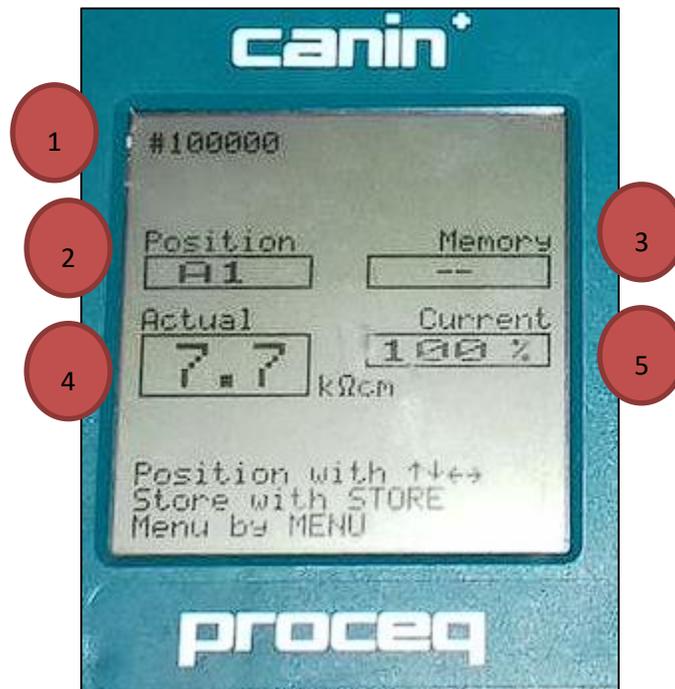


Figura 8 Pantalla de medición de Resistividad.

El valor de corriente, expresado en porcentaje, nos indica la fiabilidad de la lectura que hemos obtenido. Si el valor se encuentra entre 100% y 50%, la lectura es confiable, entre 50% y 20% es un valor no exacto y menos de 20 % el valor no es confiable ya que no existe un contacto adecuado entre la sonda y la superficie del hormigón. Cuando la lectura es estable, se registra dicho valor y/o se guarda en la memoria del instrumento. (Proceq Canin, 2009)

La resistividad medida mediante sonda Wenner corresponde a una ρ_w (resistividad de Wenner), pero por tratarse la probeta de un medio finito, debe considerarse un factor de forma (F_f) según Tabla 1 (Morris et al., 1996; UNE 83988-2, 2008) que tiene en cuenta las dimensiones de la

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

probeta, y de ese modo poder determinar la resistividad eléctrica de la probeta (ρ_p) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \rho_w * Ff \quad (6)$$

Tabla 1 Factores de forma según tamaño de probeta

Tipo de probeta	a=0,035 m	a=0,05 m
Cilíndrica 30 x 15 cm	0,714	0,606
Cilíndrica 20 x 10 cm	0,571	0,37
Cilíndrica 15 x 7,5 cm	0,384	-
Prismática 4 x 4 x 16 cm	0,172	-

La resistividad eléctrica es una propiedad importante de los hormigones que está influenciada por diversos factores, como el grado de hidratación, la porosidad, la composición química de la solución de poros y el grado de saturación. Esta propiedad es un indicador de la capacidad del hormigón para conducir corrientes eléctricas y actuar como electrolito en el fenómeno de corrosión. Cuanto mayor es la resistividad eléctrica del hormigón, menor es la probabilidad de que se produzca el desarrollo de un mecanismo de corrosión en las armaduras embebidas; además un aumento de la resistividad eléctrica se relaciona íntimamente con una menor porosidad y mayor resistencia mecánica en los hormigones. Además, la resistividad puede ser medida utilizando el método de la sonda de Wenner, que es un ensayo no destructivo ampliamente utilizado. La medición de la resistividad eléctrica proporciona información sobre la calidad del hormigón, su grado de porosidad y saturación, lo que puede ser útil para controlar el

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

proceso de curado y prevenir la corrosión de las armaduras. Sin embargo, es importante tener en cuenta factores como la calibración de la sonda y el factor de forma al interpretar los resultados de las mediciones de resistividad.



Capítulo 4

Fase experimental

4.1 Hormigones de estudio

4.1.1. Hormigones elaborados con cementos puzolánicos.

El cemento Portland puzolánico es una variante especial de cemento que combina las propiedades del cemento Portland convencional con la adición de materiales puzolánicos. Estos materiales, como las cenizas volantes, la sílice activa y el metacaolín, reaccionan químicamente con el cemento, mejorando significativamente las propiedades del hormigón resultante. Al utilizar este tipo de cemento, se logra reducir la cantidad de clinker utilizado en la fabricación. El clinker, principal responsable de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a la producción de cemento, se reduce considerablemente. Esto resulta en una disminución significativa de las emisiones de CO₂, contribuyendo así a mitigar el cambio climático y promover prácticas más sostenibles en la industria de la construcción.

En su revisión de los efectos de la adición de puzolanas al cemento portland Gutiérrez et al. (2006), se destaca que en comparación con el hormigón convencional, el cemento Portland puzolánico ofrece propiedades superiores en ciertos aspectos. Una de estas propiedades es su mayor durabilidad. El hormigón elaborado con este tipo de cemento presenta una resistencia mejorada a la corrosión y a los ciclos térmicos, lo que lo convierte en una opción ideal para ambientes agresivos o sometidos a cambios bruscos de temperatura.

Otra ventaja importante del cemento Portland puzolánico es su menor permeabilidad. Gracias a esta característica, el hormigón es menos susceptible a la penetración de agua y otros líquidos,



lo que aumenta su resistencia y durabilidad a largo plazo. Además, esta propiedad contribuye a prevenir la aparición de fisuras y grietas, prolongando así la vida útil de las estructuras construidas con este tipo de hormigón.

En cuanto a la trabajabilidad del hormigón fresco, el cemento Portland puzolánico también marca la diferencia. Las puzolanas actúan como agentes dispersantes, mejorando la distribución uniforme de las partículas de cemento en la mezcla. Esto tiene como resultado una reducción de la segregación y el sangrado del hormigón, facilitando su colocación y manipulación durante el proceso de construcción. Como resultado, los trabajadores de la construcción pueden obtener una mejor calidad de acabado y mayor eficiencia en la colocación del hormigón.

4.1.2. Hormigones elaborados con cementos fillerizados.

La utilización de materiales calcáreos en la fabricación de cemento ha sido ampliamente reconocida por sus múltiples funciones esenciales. En primer lugar, permiten complementar la distribución granulométrica en aquellos cementos que presentan una carencia de finos, mejorando así sus características. Además, estos materiales desempeñan un papel fundamental al obstruir los poros capilares y favorecer la interacción durante el proceso de hidratación.

Es esencial destacar que estos materiales no poseen propiedades puzolánicas, lo que significa que no contribuyen a la formación de silicato de calcio hidratado, pero su participación en la mezcla es valiosa por otras razones.

El impacto de los cementos fillerizados se manifiesta principalmente a nivel físico. Actúan como un relleno entre los granos de clinker, lo que acelera significativamente la hidratación del C_3S y la fase aluminato, resultando en una reacción más rápida y efectiva. No obstante, es crucial encontrar un equilibrio en la cantidad de filler incorporado, ya que un aumento excesivo puede disminuir la importancia de su efecto físico, llegando incluso a afectar negativamente la resistencia de la pasta.



Para lograr un rendimiento óptimo, se debe tener una comprensión detallada de la composición del clinker, especialmente en lo que respecta a los contenidos de C_3S y C_3A , así como su nivel de reactividad. Estos factores desempeñan un papel crucial en determinar el papel y la cantidad de filler que debe agregarse a la mezcla. Al abordar cuidadosamente estos parámetros, es posible incorporar estos materiales en la formulación del cemento sin comprometer las propiedades mecánicas del producto final.

4.1.3. Justificación por el uso del tipo de cementos.

Para este proyecto de investigación se utilizó cemento puzolánico y cemento con filler calcáreo por tratarse de cementos de popularidad y disponibilidad en la zona para la elaboración de hormigones. De la misma forma la incorporación de aditivo hidrófugo a las pastonadas, si bien este tipo de aditivos está diseñado para morteros y no para hormigones según las especificaciones de los fabricantes, se explica por la popularización de su uso en construcciones de hormigones en la zona.

4.1.4. Cementos portland puzolánicos

El cemento puzolánico, conforme a la norma IRAM 50000 (2000), permite sustituir entre un 15% y un 50% del clinker por puzolanas en su composición. Estas puzolanas deben poseer un índice de actividad puzolánica mínimo del 75%. Estos cementos son recomendados en proyectos de hormigón masivo debido a su menor generación de calor durante la hidratación, en obras hidráulicas por su incremento en impermeabilidad, y en estructuras expuestas a entornos agresivos o álcalis reactivos. Se deben usar con precaución en climas fríos y durante el curado, especialmente en climas secos.

Las propiedades clave de los cementos puzolánicos incluyen la reducción progresiva del calor de hidratación a medida que aumenta la proporción de puzolanas. Esto resulta en una menor propensión a fisuras térmicas en el hormigón. También exhiben mayor resistencia química ante

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

ambientes agresivos, ya que las puzolanas contribuyen a disminuir la liberación de cal en el cemento hidratado, lo que reduce la alcalinidad y la vulnerabilidad a reacciones secundarias perjudiciales, Sánchez et. al (2000).

En términos de resistencia mecánica, el cemento puzolánico inicialmente actúa como un componente inerte y lento en su endurecimiento, pero con el tiempo, las puzolanas se convierten en componentes activos que combinan con los compuestos de silicato en el cemento para formar compuestos hidráulicos estables. Esto resulta en una resistencia final superior al cemento Portland normal, especialmente en términos de resistencia a la flexión con relación a la compresión. Además, algunas puzolanas mejoran la trabajabilidad del hormigón y reducen la segregación de los áridos, mientras que otras pueden requerir más agua para lograr una mezcla trabajable, Montes de Oca, J. J. et al. (2009).

4.1.5. Acciones de cementos puzolánicos sobre el hormigón.

La reacción puzolánica conduce a la refinación tanto de los poros como del tamaño de los granos en el hormigón. En relación con los poros, los productos secundarios de hidratación generados son de menor densidad, lo que llena los espacios en las cavidades capilares, reduciendo su tamaño y bloqueando la comunicación entre ellos. La incorporación de adiciones minerales activas en el cemento Portland afecta propiedades en estado fresco, como la trabajabilidad y la exudación, así como propiedades en estado endurecido, como la resistencia a la compresión. Las puzolanas también contribuyen a inhibir la reacción álcali-sílice, lo que previene la degradación del hormigón y la pérdida de propiedades mecánicas.

En estado fresco, las puzolanas reducen la exudación y la segregación, mejorando la cohesión de la matriz. Además, reducen la velocidad de reacción de hidratación, lo que disminuye el calor generado durante el proceso. También existe la pérdida de asentamiento al adicionar puzolanas al hormigón fresco. En estado endurecido, las adiciones de puzolanas influyen en la resistencia a la compresión, con reducciones en resistencias a corto plazo que se compensan con mejoras a

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

edades avanzadas. La reactividad de las puzolanas depende de su composición, cantidad de material vítreo y finura. Las adiciones refuerzan la matriz del hormigón, resultando en una estructura más densa y menos permeable, lo que puede mejorar la durabilidad del hormigón en diferentes entornos, López, M. & Castro, J. T. (2010).

Los efectos positivos en la reducción de la reacción álcali-sílice y la mejora de la matriz matriz-agregado hacen de las puzolanas un recurso valioso para la mejora del rendimiento y la vida útil del hormigón.

4.1.6. Cementos con fillers calcáreos

La adición de materiales calcáreos al cemento desempeña diversas funciones, como completar la curva granulométrica de los cementos con deficiencia de finos y obstruir los poros capilares. A diferencia de los materiales puzolánicos, estos materiales no generan la formación de silicato de calcio hidratado y su efecto es principalmente físico. Los fillers actúan como un relleno entre los granos del clinker y aceleran la hidratación del C3S y de la fase aluminato. No obstante, es importante tener en cuenta que el efecto beneficioso del filler está condicionado por el porcentaje que se incorpora, ya que un incremento excesivo puede diluir el cemento y afectar negativamente la resistencia de la pasta.

4.1.7. Influencia de la cantidad y la finura del filler.

La cantidad y la finura del filler ejercen una influencia significativa en los mecanismos de hidratación y en la resistencia del conjunto. En un estudio realizado por S. Sprung and E Siebel. (1991) se evaluó el efecto de la incorporación de un 15% de caliza con diferentes finuras en la resistencia a compresión de una mezcla de cemento (Figura 9). Los resultados mostraron que, en las primeras etapas de fraguado (2 y 7 días), existe un ligero aumento de la resistencia con la superficie específica, pero a los 28 días, las muestras alcanzaron niveles de resistencia similares, independientemente de la finura de la caliza.



Por otro lado, Escorihuela M.J. et al. (1993) investigaron como influye del porcentaje de adición de caliza al Clinker de cemento Portland (0-50%) en la resistencia. Concluyeron que la resistencia a la flexión no varía significativamente para contenidos de filler inferiores al 20%. Sin embargo, la resistencia a compresión disminuye proporcionalmente al filler incorporado. Cuando el porcentaje de adición supera el 20%, se produce una disminución abrupta de la resistencia a compresión, especialmente en etapas avanzadas del fraguado.

S. Sprung and E. Siebel. (1991) también estudiaron la influencia del porcentaje de incorporación de filler calizo (0-50%) en la resistencia a flexión y compresión de morteros con una resistencia predeterminada a los 28 días. Según sus resultados, observaron que, a igual resistencia, la relación agua-cemento y la fluidez de los morteros disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de filler incorporado. Además, encontraron que, para mantener la resistencia deseada, era necesario reducir la relación agua-cemento a aproximadamente 0,33, lo que prácticamente anulaba la fluidez del mortero.

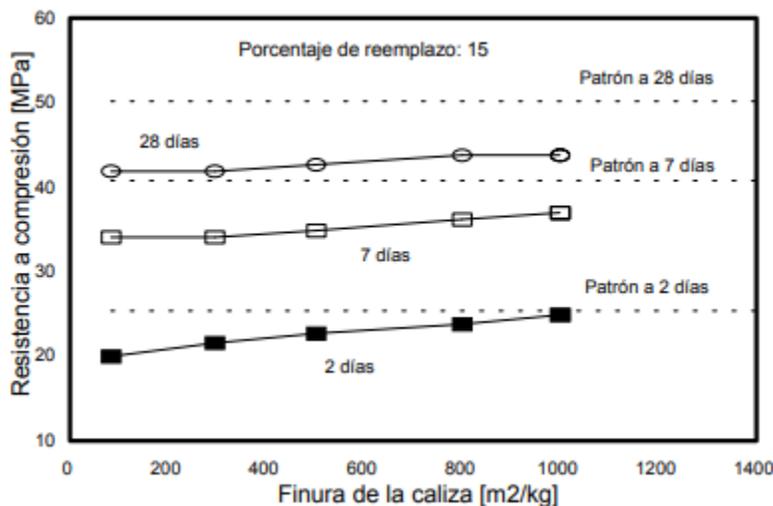


Figura 9 Resistencia a compresión vs. finura filler calcáreo.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

4.1.8. Hidrófugo utilizado

El aditivo hidrófugo es un componente químico de relevancia en el campo de la construcción y popularmente usado en la zona de Mendoza. Su principal función es mejorar la resistencia a la penetración del agua y reducir la permeabilidad en mezclas de hormigón, mortero y otros materiales cementicios. A través de modificaciones a nivel microscópico, este aditivo disminuye la porosidad del material, evitando o limitando la penetración de agua y otros líquidos.

La acción del aditivo hidrófugo se centra en los poros y capilares presentes en el cemento. Sustancias activas contenidas en el aditivo se adhieren a estas estructuras, formando una barrera protectora altamente efectiva. Esta barrera dificulta significativamente el paso del agua, lo que conlleva una mayor impermeabilidad del material. Cabe destacar que el aditivo no convierte el material en impermeable absoluto, pero sí mejora considerablemente su resistencia al agua. El valor añadido del aditivo hidrófugo radica en su capacidad para mejorar la durabilidad del material.

|4.1.9. Elaboración de probetas

Para la elaboración de los hormigones se utilizó Cemento Portland Puzolánico (CPP-40) y Cemento Portland con filler calcáreo (CPF-40) según norma IRAM 50000 (2000). Además, se utilizó la combinación con aditivo del tipo Hidrófugo, con el objetivo de poder evaluar como varia la resistividad al incorporarse un aditivo hidrófugo en la mezcla. Se utilizaron 3 relaciones agua-cemento (0,5; 0,6; 0,7) en combinación con cada tipo de cemento, para lo cual se diseñaron 6 pastonadas; a estas, se sumaron 6 pastonadas más en las que se incorporó el aditivo hidrofugo. Las distintas combinaciones entre los parámetros seleccionados para la elaboración de los hormigones de estudio, dio lugar a la realización de 12 pastonadas, obteniendo un total de 180 probetas cilíndricas de diámetro 100 mm y 200 mm de altura, confeccionadas de manera normalizada de acuerdo con NORMA IRAM 1534 (2004). Los agregados utilizados fueron cantos rodados locales (TMAG 19 mm).

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Se diseñaron 12 mezclas distintas, los cuales fueron identificados como pastonada P05, P06, P07, P05H, P06H, P07H, F05, F06, F07, F05H, F06H y F07H, donde sus características están resumidas en la Tabla 2.

El diseño de mezcla se realizó según las proporciones conocidas popularmente como 1-2-3, una parte de cemento por dos partes de agregado fino por 3 partes de agregado grueso. En la Tabla 3 se especifican las cantidades en sus respectivas unidades incorporadas a cada mezcla y el resultado del análisis de asentamiento correspondiente a cada una.

Tabla 2 Características de las pastonadas

Designación	Relación a/c	Tipo de cemento	Aditivo
P05	0,5	CPP-40	-
P06	0,6	CPP-40	-
P07	0,7	CPP-40	-
P05H	0,5	CPP-40	Hidrófugo
P06H	0,6	CPP-40	Hidrófugo
P07H	0,7	CPP-40	Hidrófugo
F05	0,5	CPF-40	-
F06	0,6	CPF-40	-
F07	0,7	CPF-40	-

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Designación	Relación a/c	Tipo de cemento	Aditivo
F05H	0,5	CPF-40	Hidrófugo
F06H	0,6	CPF-40	Hidrófugo
F07H	0,7	CPF-40	Hidrófugo

4.1.10. Organización de muestras de ensayos

Por cada pastonada se confeccionaron 15 probetas cilíndricas de tamaño 100 mm x 200 mm. Se formaron grupos de tres probetas a efectos de evaluar la incidencia de los días de curado (curado por inmersión) en las mediciones de resistividad.

Tabla 3 Dosificación de pastonadas

Densidades estimadas			
Cemento [kg/m ³]	Agua [kg/m ³]	Agregado[kg/m ³]	Aditivo[kg/m ³]
3.100	1.000	2.650	1.050

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Tabla 4 Dosificación de ensayo

Dosificación de ensayo 1:2:3 (C:AF:AG) para apróx. 60 l de hormigón								
Pastonada N°	Designación	C [kg]	Agua [l]	AF [kg]	AG [kg]	Aditivo [l]	Relación a/c	Asentamiento [mm]
1	P07	20,0	14,0	40,0	60,0	0,0	0,70	40,00
2	P06	22,0	13,2	44,0	66,0	0,0	0,60	15,00
3	P05	22,0	11,0	44,0	66,0	0,0	0,50	0,00
4	P07H	22,0	13,8	44,0	66,0	1,6	0,70	70,00
5	P06H	22,0	11,9	44,0	66,0	1,3	0,60	13,00
6	P05H	22,0	9,9	44,0	66,0	1,1	0,50	10,00
7	F07	20,0	14,0	40,0	60,0	0,0	0,70	130,00
8	F06	22,0	13,2	44,0	66,0	0,0	0,60	105,00
9	F05	22,0	11,0	44,0	66,0	0,0	0,50	45,00
10	F07H	22,0	13,8	44,0	66,0	1,6	0,70	145,00
11	F06H	22,0	11,9	44,0	66,0	1,3	0,60	116,00
12	F05H	22,0	9,9	44,0	66,0	1,1	0,50	52,00

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

En la Tabla 5 se indica la designación de cada grupo y sus correspondientes días de curado, en donde con “x” se representa de forma general la nomenclatura dada a cada pastonada según la relación a/c que le corresponda.

Tabla 5 Designación de probetas

Designación	Grupo	Días de curado
P0x	P0x-D0	0
	P0x-D1	1
	P0x-D3	3
	P0x-D6	6
	P0x-D27	27

Este capítulo presenta los hormigones de estudio elaborados con cementos puzolánicos y fillers calcáreos, destacando sus propiedades mejoradas en términos de durabilidad, resistencia y trabajabilidad. También se justifica el uso de estos tipos de cemento en el proyecto de investigación debido a su popularidad y disponibilidad en la zona.

4.2 Metodología de medición

Las mediciones de Resistividad Eléctrica fueron llevadas a cabo mediante el dispositivo CANIN, utilizando la sonda de Wenner (método de los 4 puntos). El equipo utilizado es de la marca Proceq y pertenece al laboratorio del CeReDeTeC de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza. Dichas mediciones en cada pastonada fueron realizadas sobre los distintos grupos de probetas que constituyen la misma. Cada grupo conformado por tres

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

probetas fue expuesto a distintos días de curado por inmersión, incluyendo un grupo el cual no fue expuesto a ningún tipo de curado. Las mediciones sobre cada uno de estos grupos fueron realizadas a distintas edades del hormigón, a partir de las 24 horas de haber elaborado las muestras, y hasta los 140 días posteriores a dicha elaboración, siguiendo la siguiente cronología:

- 1 día de elaboración, para 3 probetas sin curado.
- 2 días de elaboración, para las 3 probetas sin curado y 3 probetas con 1 día de curado.
- 4 días de elaboración, para las 6 anteriores y 3 probetas con 3 días de curado.
- 7 días de elaboración, para las 9 anteriores y 3 probetas con 7 días de curado.
- 28 días de elaboración, para las 15 probetas correspondientes a la pastonada.
- 56 días, para las 15 probetas correspondientes a la pastonada.
- 84 días, para las 15 probetas correspondientes a la pastonada.
- 112 días, para las 15 probetas correspondientes a la pastonada.
- 140 días, para las 15 probetas correspondientes a la pastonada.

En las Tablas A-1 a Tabla A-12 del Apéndice se presentan los resultados de resistividad obtenidos para los distintos grupos de probetas citados anteriormente.

4.3 Cronograma de ensayos

La metodología de trabajo, que involucró desde la elaboración de pastonadas hasta la obtención del último valor de resistividad, demandó un tiempo total de 12 meses consecutivos iniciando en el mes de diciembre del año 2.016 a noviembre del año 2017. Presentamos a continuación el cronograma de trabajo, indicado según Tabla 6 y Tabla 7.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Tabla 6 Cronograma de curado de probetas

Cronograma fecha de retiro de probetas en curado							
N°	Pastonada	Elaboración	0 día	1 día	3 días	6 días	27 días
1	P07	19/12/16	20/12/16	21/12/16	23/12/16	26/12/16	16/1/17
2	P06	26/12/16	27/12/16	28/12/16	30/12/16	2/1/17	23/1/17
3	P05	2/1/17	3/1/17	4/1/17	6/1/17	9/1/17	30/1/17
4	P07H	16/1/17	17/1/17	18/1/17	20/1/17	23/1/17	13/2/17
5	P06H	30/1/17	31/1/17	1/2/17	3/2/17	6/2/17	27/2/17
6	P05H	27/2/17	28/2/17	1/3/17	3/3/17	6/3/17	27/3/17
7	F07	6/3/17	7/3/17	8/3/17	10/3/17	13/3/17	3/4/17
8	F06	20/3/17	21/3/17	22/3/17	24/3/17	27/3/17	17/4/17
9	F05	3/4/17	4/4/17	5/4/17	7/4/17	10/4/17	1/5/17
10	F07H	8/5/17	9/5/17	10/5/17	12/5/17	15/5/17	5/6/17
11	F06H	31/5/17	1/6/17	2/6/17	4/6/17	7/6/17	28/6/17
12	F05H	19/6/17	20/6/17	21/6/17	23/6/17	26/6/17	17/7/17

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Tabla 7 Cronograma de mediciones de resistividad

Fecha de medición de resistividad									
N°	24h	2 días	4 días	7 días	28 días	56 días	84 días	112 días	140 días
1	20/12/16	21/12/16	23/12/16	26/12/16	16/1/17	13/2/17	13/3/17	10/4/17	8/5/17
2	27/12/16	28/12/16	30/12/16	2/1/17	23/1/17	20/2/17	20/3/17	17/4/17	15/5/17
3	3/1/17	4/1/17	6/1/17	9/1/17	30/1/17	27/2/17	27/3/17	24/4/17	22/5/17
4	17/1/17	18/1/17	20/1/17	23/1/17	13/2/17	13/3/17	10/4/17	8/5/17	5/6/17
5	31/1/17	1/2/17	3/2/17	6/2/17	27/2/17	27/3/17	24/4/17	22/5/17	19/6/17
6	28/2/17	1/3/17	3/3/17	6/3/17	27/3/17	24/4/17	22/5/17	19/6/17	17/7/17
7	7/3/17	8/3/17	10/3/17	13/3/17	3/4/17	1/5/17	29/5/17	26/6/17	24/7/17
8	21/3/17	22/3/17	24/3/17	27/3/17	17/4/17	15/5/17	12/6/17	10/7/17	7/8/17
9	4/4/17	5/4/17	7/4/17	10/4/17	1/5/17	29/5/17	26/6/17	24/7/17	21/8/17
10	9/5/17	10/5/17	12/5/17	15/5/17	5/6/17	3/7/17	31/7/17	28/8/17	25/9/17
11	1/6/17	2/6/17	4/6/17	7/6/17	28/6/2017	26/7/17	23/8/17	20/9/17	18/10/17
12	20/6/17	21/6/17	23/6/17	26/6/17	17/7/17	14/8/17	11/9/17	9/10/17	6/11/17

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

4.4 Resultados de medición

Por cada muestra se obtuvieron tres mediciones de resistividad relacionadas con la Probeta 1, Probeta 2 y Probeta 3 de acuerdo con su edad de curado y tiempo de elaboración. A partir de las tres mediciones obtenidas, se calculó un valor promedio para poder ser presentado en modo de gráficos y tablas. Se agrega en el apéndice las planillas de medición para cada pastonada elaborada, donde se encuentran tabulados todos los resultados de mediciones realizadas. Como se pretende llevar a cabo una comparación relativa entre las distintas mediciones de resistividad eléctrica obtenidas en las patonas de estudio, se presentarán los resultados de resistividades de Wenner sin ser afectado por el factor de forma propuesto por Morris.

A continuación, presentamos los valores de Resistividad Promedio obtenidos para los distintos grupos de probetas, agrupados por tipo de cemento utilizado.

Cemento Portland Puzolánico:

Tabla 8 Resistividad promedio CPP

Pastonada	Muestra	Curado [días]	Edad [días]								
			1	2	4	7	28	56	84	112	140
			Resistividad [$k\Omega \cdot cm$]								
P-07	P-07-0	0	4,8	8,7	13,0	14,3	22,0	44,0	50,0	60,0	62,0
	P-07-1	1		4,5	13,0	14,7	26,3	48,0	59,0	61,0	60,0
	P-07-3	3			6,5	8,8	33,7	50,0	61,0	65,0	68,0
	P-07-6	6				7,1	37,3	52,0	62,0	86,0	75,0
	P-07-27	27					10,1	40,0	61,0	81,0	83,0
P-06	P-06-0	0	3,0	8,8	10,6	19,0	38,3	68,0	66,0	70,0	76,0
	P-06-1	1		5,6	9,8	17,0	40,7	52,7	57,0	67,0	69,0
	P-06-3	3			7,0	15,0	44,3	72,0	79,0	80,0	85,0



			Edad [días]									
			1	2	4	7	28	56	84	112	140	
Pastonada	Muestra	Curado [días]	Resistividad [kΩ.cm]									
	P-06-6	6					7,5	39,0	70,3	78,0	81,0	87,0
	P-06-27	27						12,0	48,0	59,0	69,0	83,0
P-05	P-05-0	0	5,6	11,7	16,0	22,0	40,7	61,0	69,0	73,0	79,0	
	P-05-1	1			7,2	12,3	15,0	43,7	53,3	62,0	68,0	78,0
	P-05-3	3				6,9	15,0	40,7	56,0	70,0	63,0	82,0
	P-05-6	6					7,7	38,7	50,7	58,0	62,0	77,0
	P-05-27	27						13,7	47,3	61,0	63,0	69,0
P-07-H	P-07-0-H	0	2,2	5,5	11,3	14,0	56,3	55,7	52,0	61,0	63,0	
	P-07-1-H	1			1,7	6,3	9,6	53,7	66,7	55,0	59,0	58,0
	P-07-3-H	3				3,7	10,4	65,3	72,0	56,0	65,0	59,0
	P-07-6-H	6					4,8	42,7	58,3	59,0	64,0	62,0
	P-07-27-H	27						6,5	52,3	57,0	60,0	65,0
P-06-H	P-06-0-H	0	14,3	9,1	11,3	13,7	38,7	63,3	64,0	66,0	61,0	
	P-06-1-H	1			4,2	5,8	10,2	34,3	55,7	47,0	50,0	57,0
	P-06-3-H	3				2,9	8,4	31,3	60,0	60,0	61,0	63,0
	P-06-6-H	6					4,5	29,0	46,3	57,0	50,0	57,0
	P-06-27-H	27						8,8	28,3	45,0	52,0	55,0
P-05-H	P-05-0-H	0	2,2	6,0	14,7	23,3	41,7	52,3	59,0	67,0	66,0	
	P-05-1-H	1			1,4	11,0	15,7	21,7	42,3	46,0	61,0	63,0
	P-05-3-H	3				4,6	13,0	25,0	58,3	63,0	62,0	63,0
	P-05-6-H	6					4,6	34,7	52,7	55,0	69,0	63,0

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

			Edad [días]								
			1	2	4	7	28	56	84	112	140
Pastonada	Muestra	Curado [días]	Resistividad [kΩ.cm]								
	P-05-27-H	27					9,3	42,7	44,0	59,0	63,0

Cemento Portland con Filler Calcáreo:

Tabla 9 Resistividad promedio CPF

			Edad [días]								
			1	2	4	7	28	56	84	112	140
Pastonada	Muestra	Curado [días]	Resistividad [kΩ.cm]								
F-07	F-07-0	0	1,7	29,3	21,7	17,0	45,3	55,3	60,0	71,0	73,0
	F-07-1	1		3,4	22,0	9,1	44,7	52,3	63,0	65,0	69,0
	F-07-3	3			17,7	10,7	43,0	52,7	69,0	75,0	76,0
	F-07-6	6				6,3	34,7	36,7	55,0	71,0	77,0
	F-07-27	27					7,0	18,3	48,0	51,0	66,0
F-06	F-06-0	0	1,7	5,5	7,5	18,7	25,0	48,7	71,0	72,0	73,0
	F-06-1	1		4,2	5,5	10,7	23,0	52,3	73,0	69,0	70,0
	F-06-3	3			4,2	14,0	29,0	38,0	64,0	70,0	75,0
	F-06-6	6				5,0	20,3	36,7	67,0	73,0	77,0
	F-06-27	27					4,9	16,7	31,0	61,0	68,0
F-05	F-05-0	0	2,7	6,8	8,1	15,3	24,0	40,3	62,0	67,0	71,0
	F-05-1	1		3,9	6,9	11,7	18,7	48,7	67,0	71,0	72,0
	F-05-3	3			3,5	5,8	9,0	37,7	58,0	65,0	70,0
	F-05-6	6				3,7	8,3	29,3	56,0	66,0	72,0
	F-05-27	27					4,9	19,0	41,0	58,0	67,0

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Pastonada	Muestra	Curado [días]	Edad [días]								
			1	2	4	7	28	56	84	112	140
			Resistividad [kΩ.cm]								
F-07-H	F-07-0-H	0	2,8	3,6	4,5	8,0	15,7	29,7	39,0	47,0	54,0
	F-07-1-H	1		2,5	6,4	6,8	12,0	22,7	41,0	46,0	52,0
	F-07-3-H	3			3,0	5,5	9,7	20,0	40,0	68,0	75,0
	F-07-6-H	6				2,4	8,6	18,0	37,0	63,0	68,0
	F-07-27-H	27					4,2	16,3	40,0	74,0	79,0
F-06-H	F-06-0-H	0	3,3	7,5	10,3	13,3	20,0	33,0	48,0	55,0	59,0
	F-06-1-H	1		2,7	5,7	7,1	19,3	24,3	49,0	55,0	61,0
	F-06-3-H	3			3,8	4,8	17,3	23,3	53,0	59,0	63,0
	F-06-6-H	6				3,3	13,0	15,0	59,0	57,0	63,0
	F-06-27-H	27					5,1	10,7	60,0	61,0	72,0
F-05-H	F-05-0-H	0	2,6	6,0	10,8	14,7	20,0	26,3	36,0	41,0	54,0
	F-05-1-H	1		5,3	8,1	16,3	19,7	22,3	37,0	45,0	48,0
	F-05-3-H	3			4,0	11,9	16,3	25,0	41,0	49,0	56,0
	F-05-6-H	6				3,6	11,3	15,3	29,0	36,0	56,0
	F-05-27-H	27					10,0	15,7	31,0	54,0	71,0

Se muestran, a continuación, gráficas de cada grupo de probetas perteneciente a las distintas pastonada. En el eje de ordenadas se representa los valores de Resistividad Promedio en unidades de kΩ.cm y en el eje de abscisas se representa la edad del Hormigón en días.

Gráficas Cemento Portland Puzolánico

La presentación de gráfico sigue el siguiente orden:

- ✓ Pastonada P07: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,70, Figura 10.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

- ✓ Pastonada P06: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,60, Figura 11.
- ✓ Pastonada P05: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,50, Figura 12.
- ✓ Pastonada P07H: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,70; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 14.
- ✓ Pastonada P06H: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,60; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 15.
- ✓ Pastonada P05H: Cemento Portland Puzolánico con relación a/c 0,50; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 16.

En la Figura 10, 11 y 12 se muestra la influencia del tiempo de curado y la edad del hormigón en la evolución de la resistividad eléctrica medida para cada una de las pastonadas elaboradas.

Los resultados experimentales de cada pastonada indican que la resistividad eléctrica aumenta a medida que el hormigón va madurando, desde su fecha de elaboración. Además, en la mayoría de los casos, se demostró que la resistividad también aumenta cuando el tiempo de curado del hormigón es mayor.

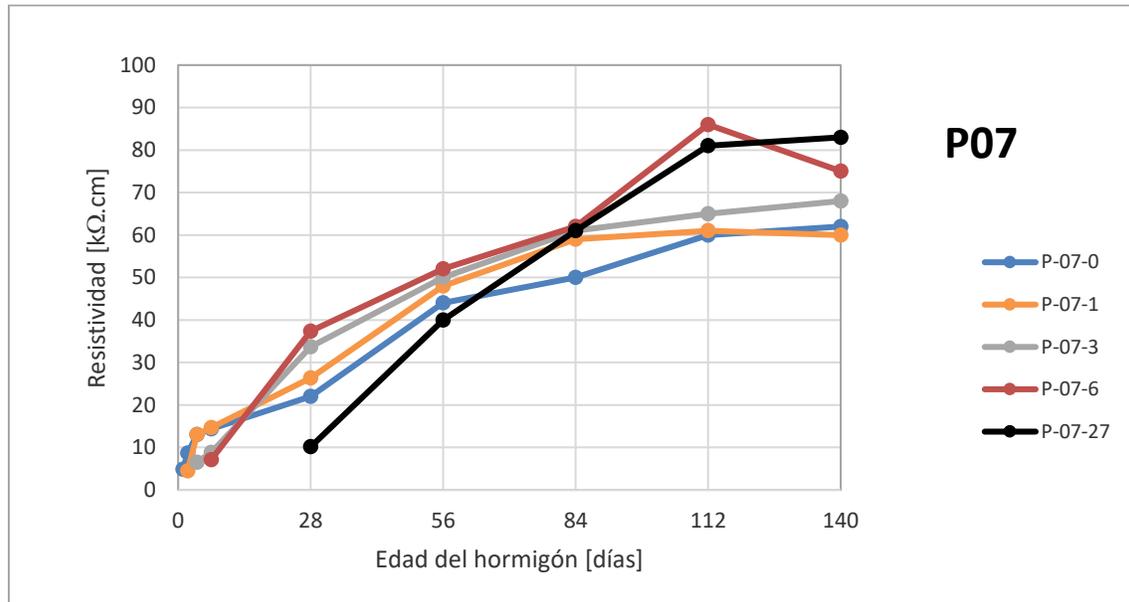


Figura 10 Resistividad en pastonada P07.

Al comparar los valores máximos de resistividad entre las pastonadas, se establece que estos difieren para una edad del hormigón de 28 días. Sin embargo, para edades mayores, como 56, 112 Y 140 días, estos valores tienden a ser del mismo orden, incluso cuando las relaciones agua/cemento son distintas.

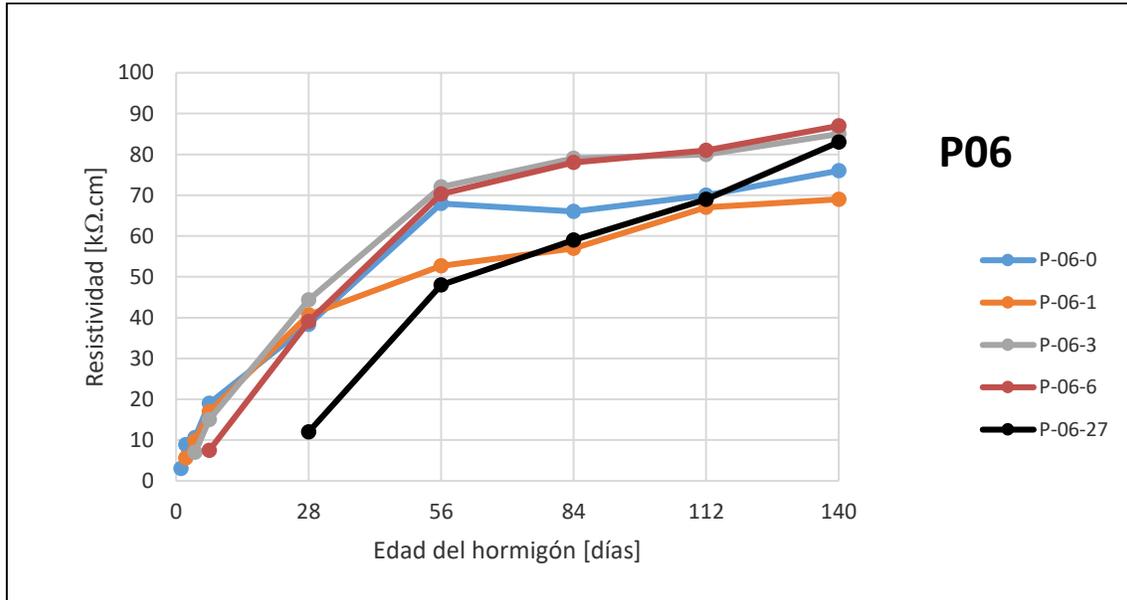


Figura 11 Resistividad en pastonada P06.

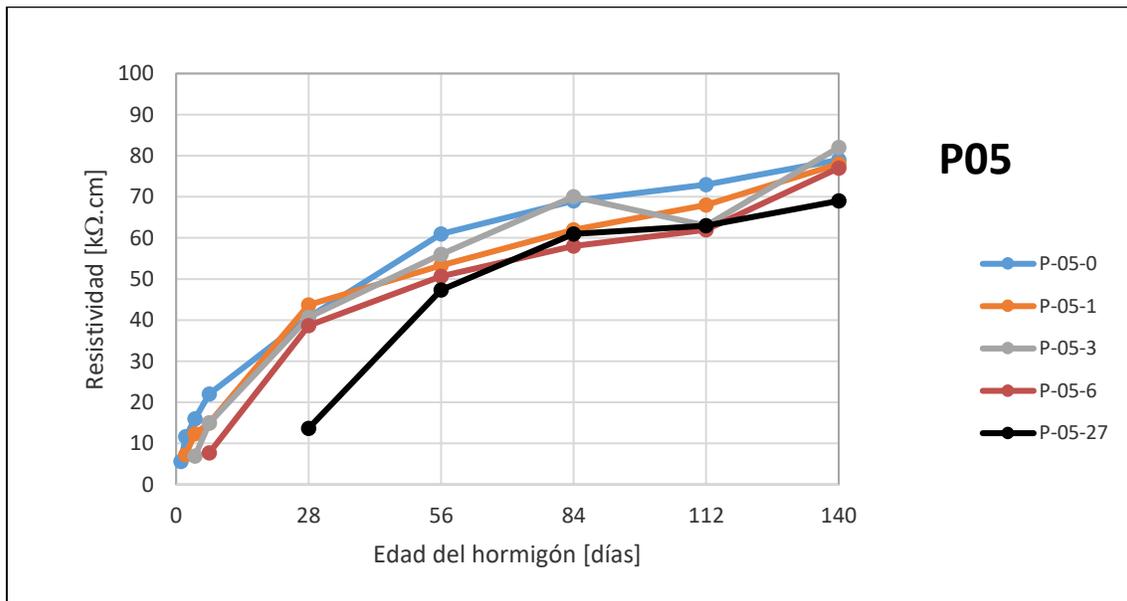


Figura 12 Resistividad en pastonada P05.

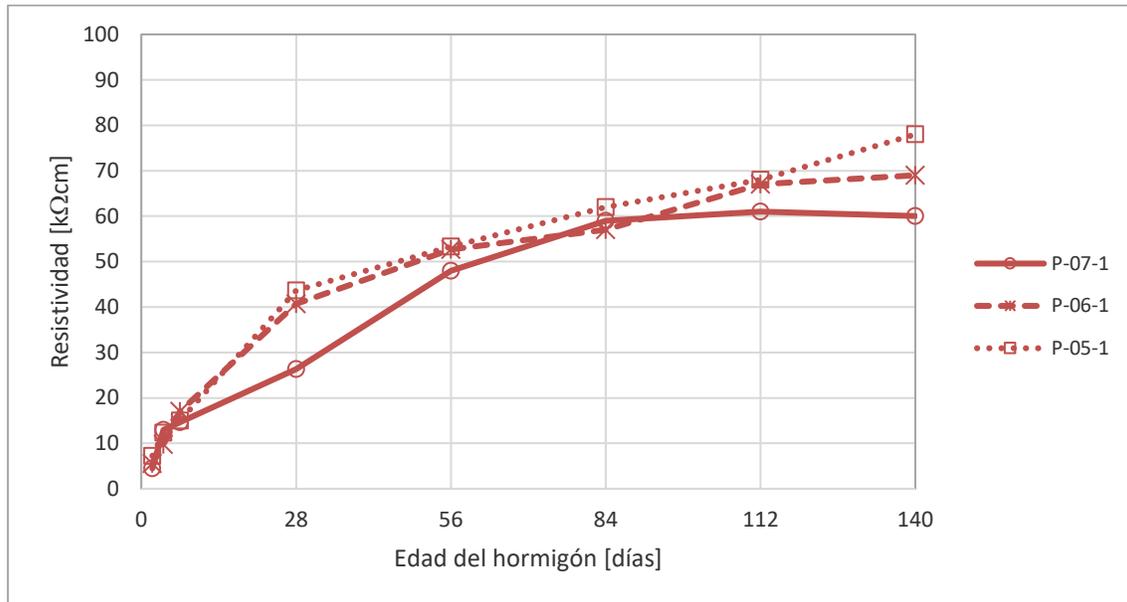


Figura 13 Resistividad entre pastonadas para tiempo de curado 1 día.

En la Figura 13 se puede destacar que las pastonadas elaboradas con una relación agua/cemento más baja, como por ejemplo 0,50, desarrollan valores de resistividad más alto que aquellas pastonadas que fueron elaboradas con relaciones a/c más altas. Esta característica está relacionada con que un mayor porcentaje de agua produce en el hormigón endurecido una mayor cantidad de poros, los cuales al saturarse en contacto con el agua favorecen a la conductividad eléctrica y producen disminución de la resistividad en el hormigón.

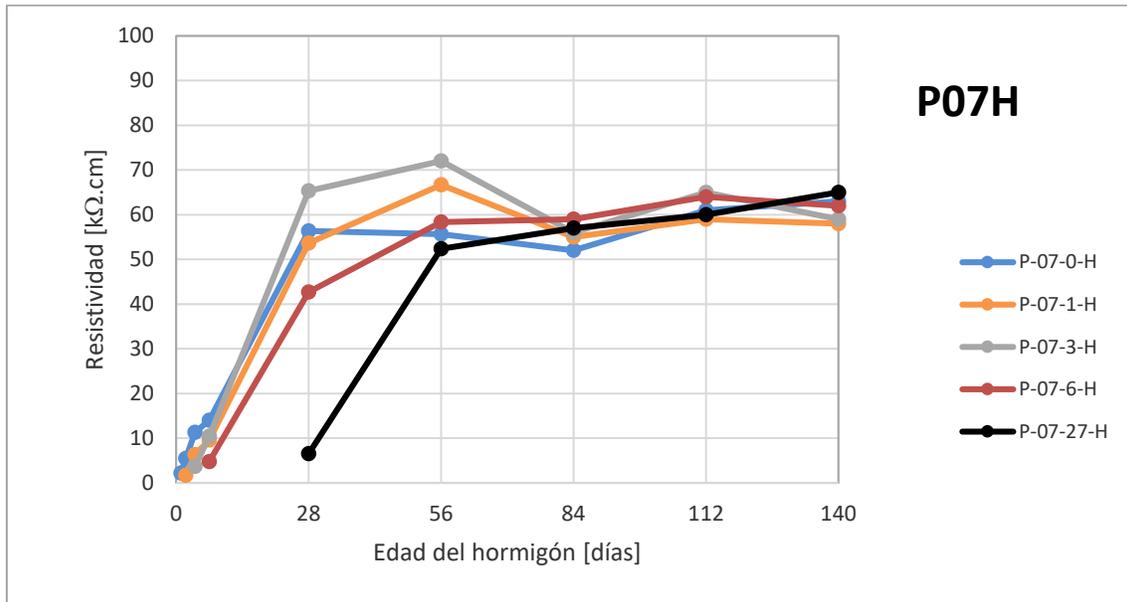


Figura 14 Resistividad en pastonada P07H.

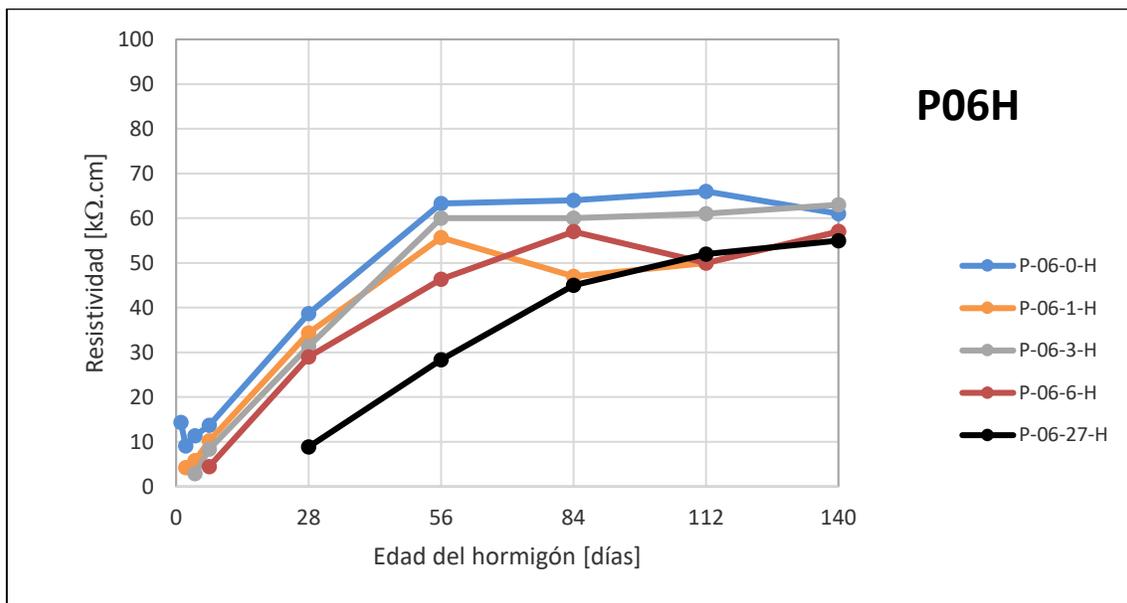


Figura 15 Resistividad en pastonada P06H.

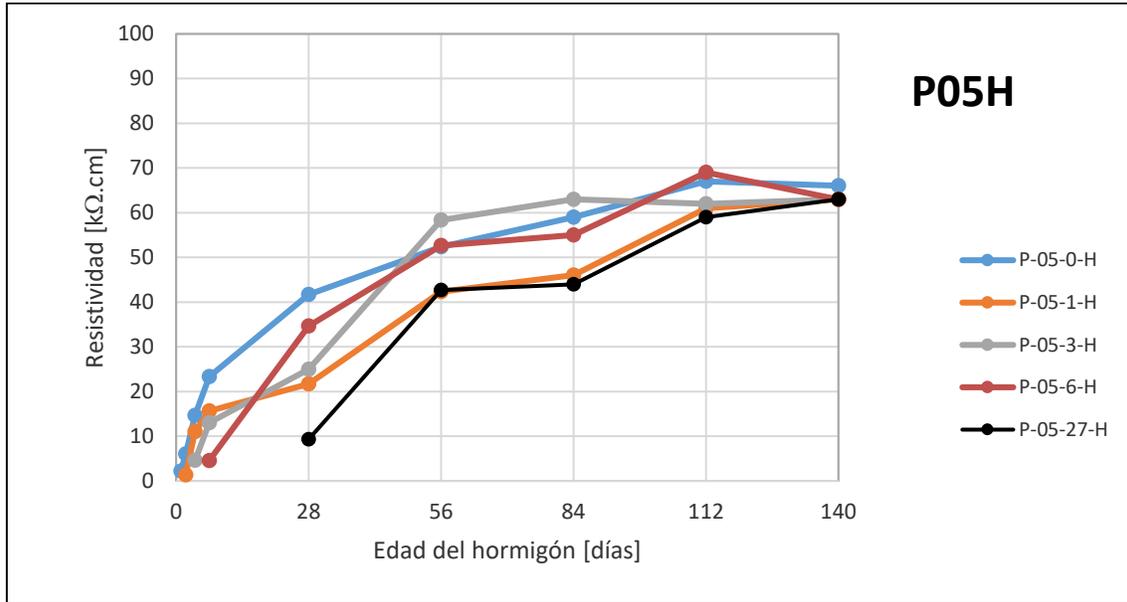


Figura 16 Resistividad en pastonada P05H.

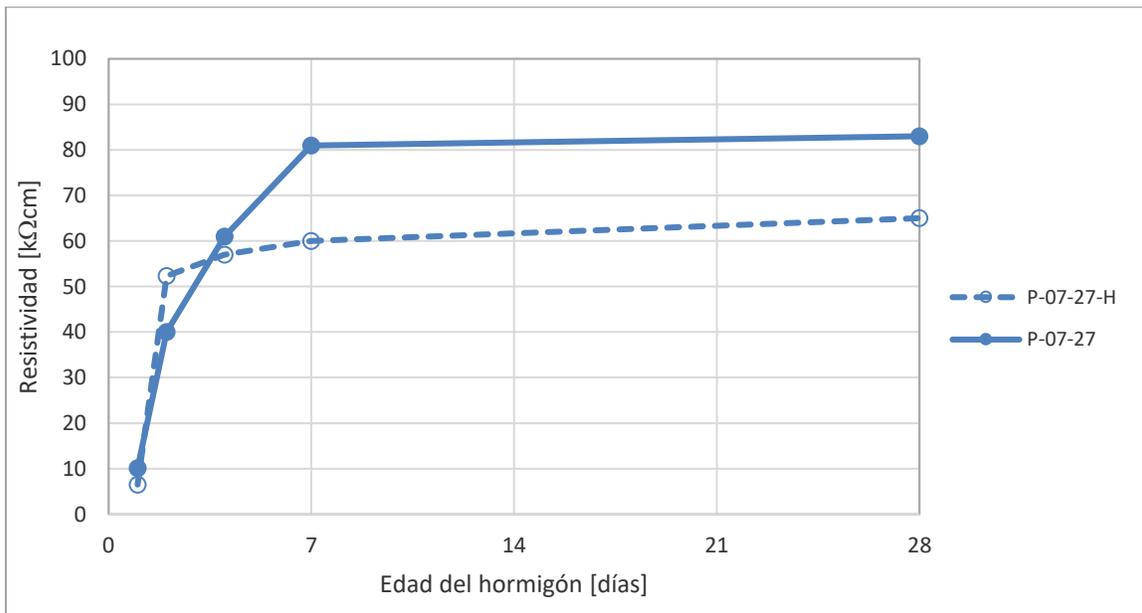


Figura 17 Resistividad en pastonadas con y sin aditivo hidrófugo.



En cuanto al uso del aditivo hidrófugo, las muestras nos indican que la incorporación de éste en hormigones con cemento puzolánicos no fue favorable ya que las pastonadas elaboradas sin aditivo hidrófugo alcanzaron valores de resistividad significativamente más alto que aquellas en la cuales se incorporó el aditivo. Esta característica se observó en todas las pastonadas, independientemente de la relación agua cemento, con probetas que cumplieron con un curado por inmersión de 27 días. En la Figura 17 se muestran los resultados obtenidos con cemento portland puzolánico, relación a/c 0,70, curado durante 27 días, con y sin aditivo hidrófugo.

Gráficas Cemento Portland con Filler Calcáreo

La presentación de gráfico sigue el siguiente orden:

- ✓ Pastonada F07: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,70, Figura 18.
- ✓ Pastonada F06: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,60, Figura 19.
- ✓ Pastonada F05: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,50, Figura 20.
- ✓ Pastonada F07H: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,70; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 21.
- ✓ Pastonada F06H: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,60; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 22.
- ✓ Pastonada F06H: Cemento Portland con Filler Calcáreo con relación a/c 0,60; incorporación de aditivo hidrófugo, Figura 23.

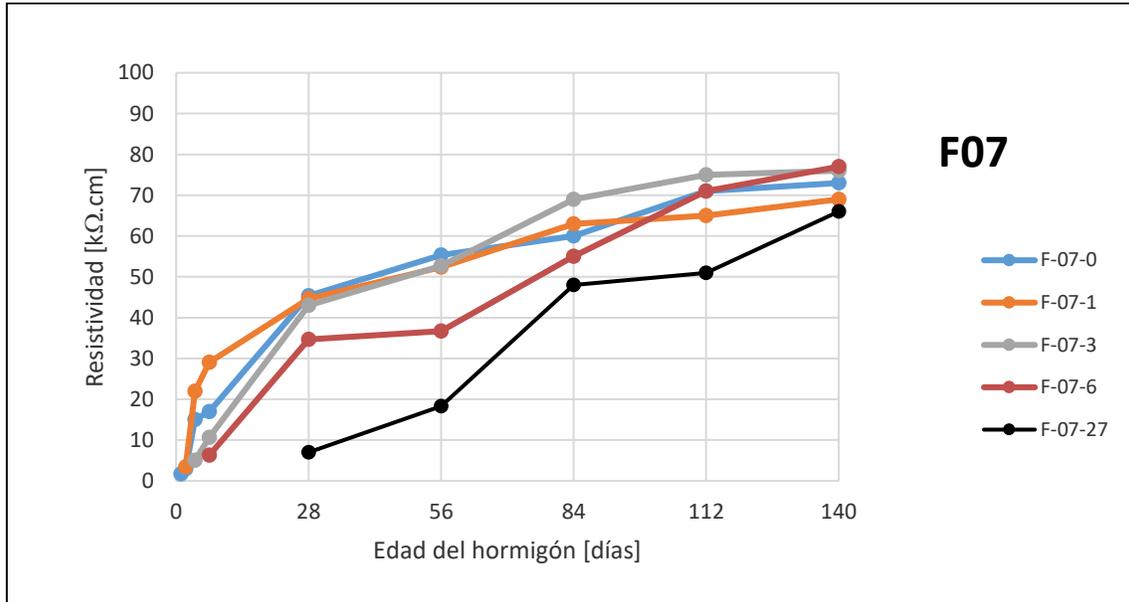


Figura 18 Resistividad en pastonada F07.

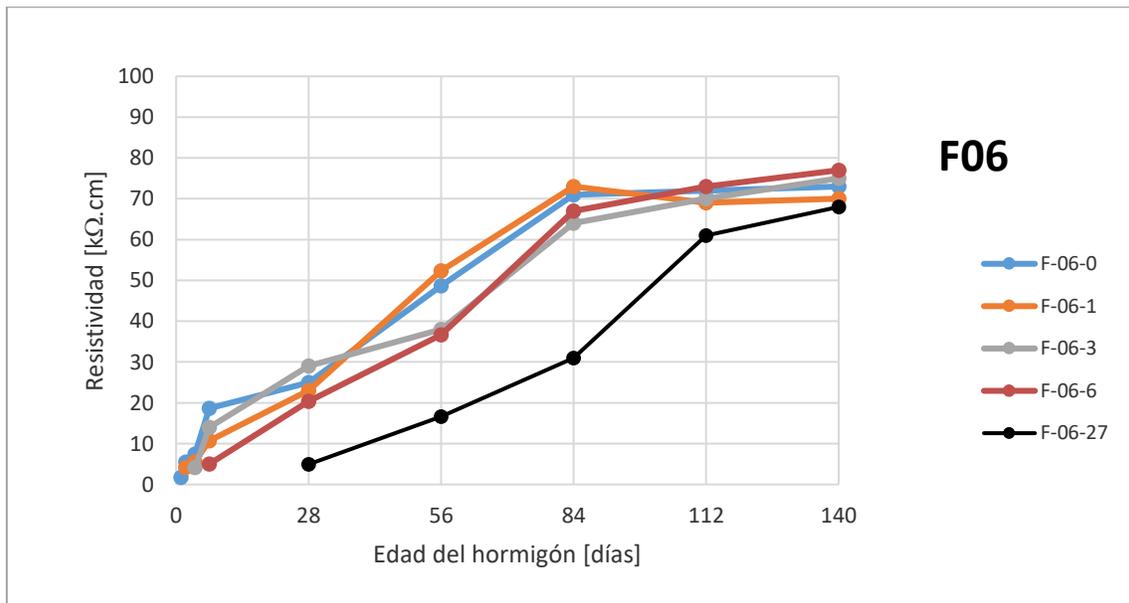


Figura 19 Resistividad en pastonada F06.

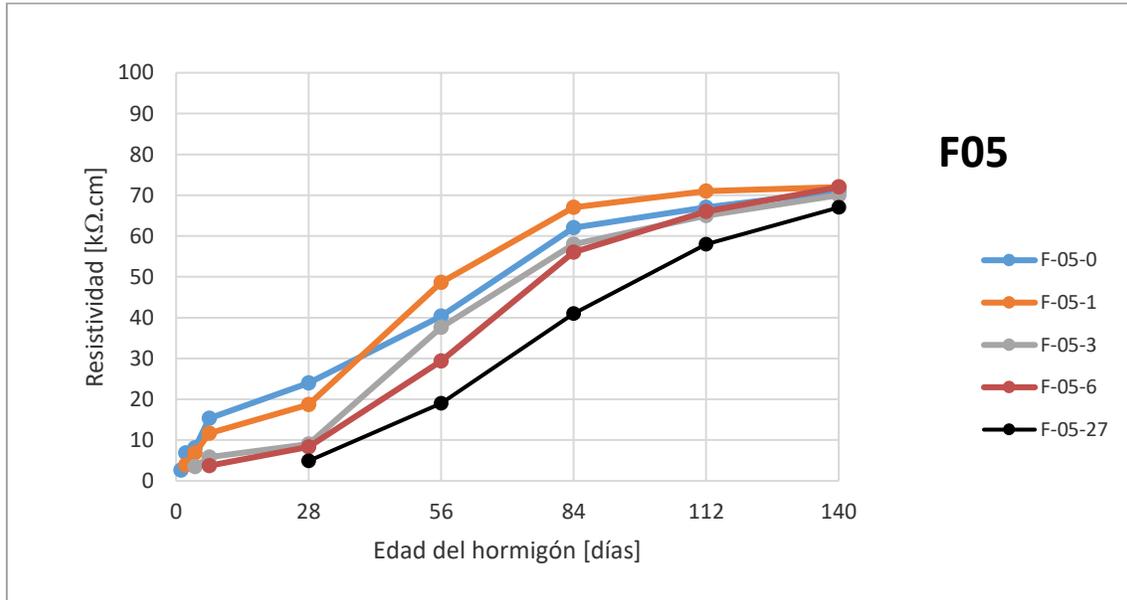


Figura 20 Resistividad en pastonada F05.

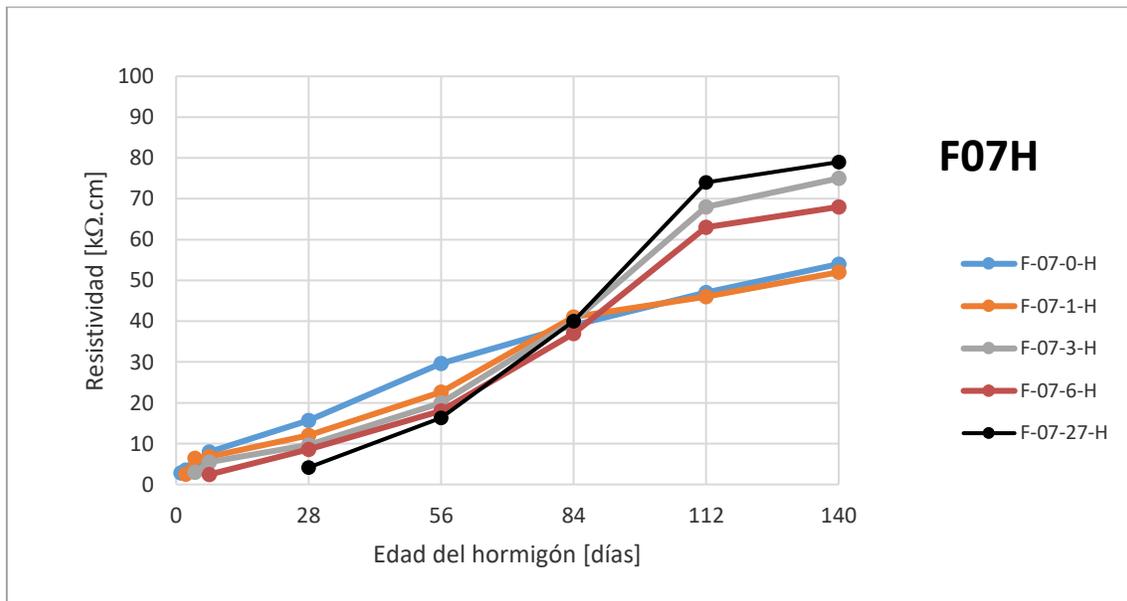


Figura 21 Resistividad en pastonada F07H.

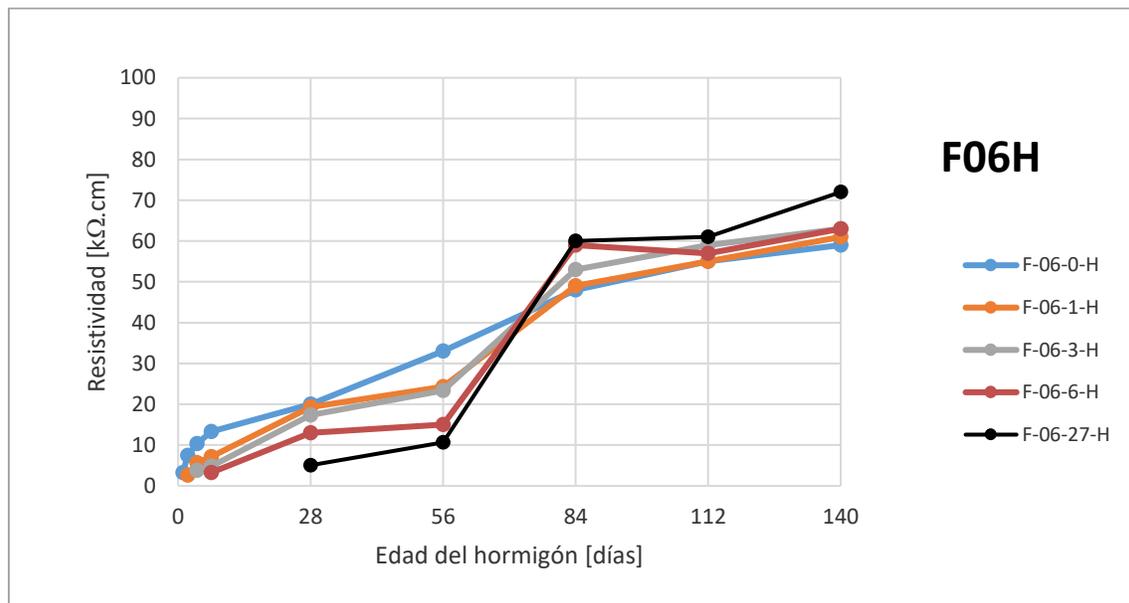


Figura 22 Resistividad en pastonada F06H.

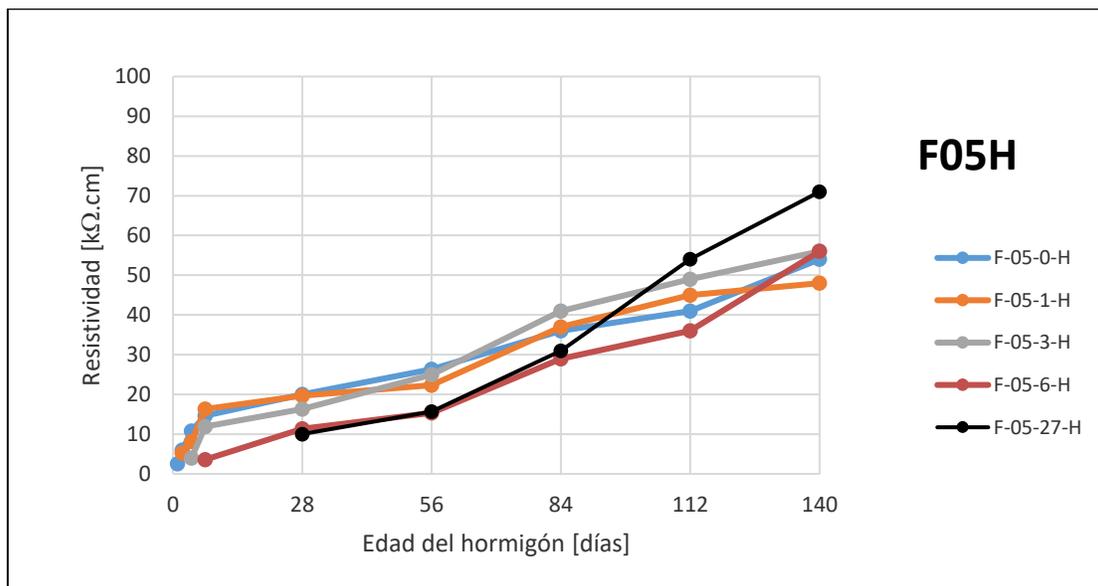


Figura 23 Resistividad en pastonada F05H.

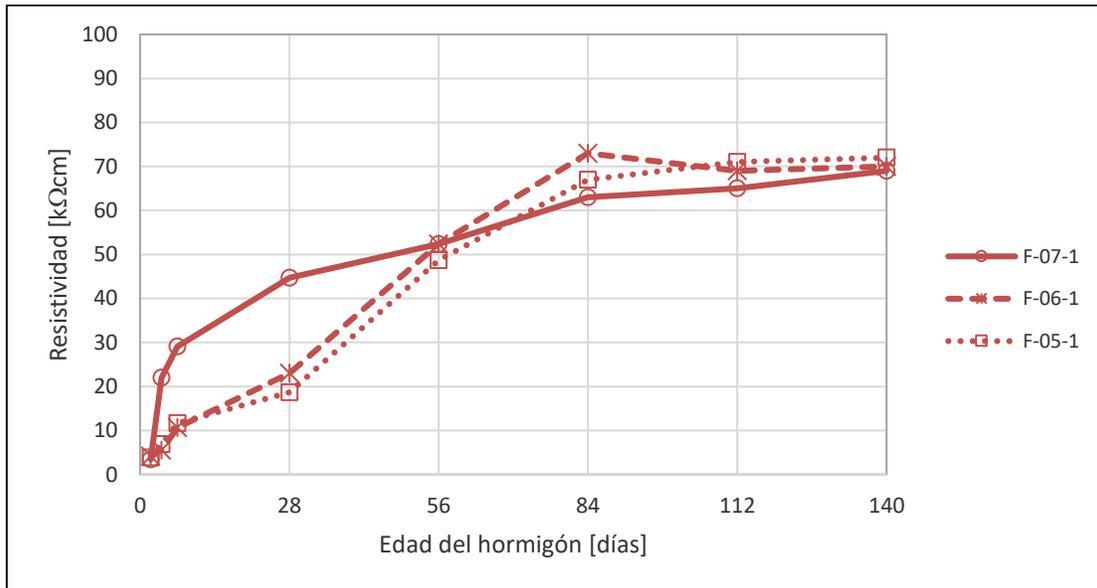


Figura 24 Resistividad para diferentes relaciones a/c.

De acuerdo con lo observado en la Figura 24, en el caso de cementos portland con filler calcáreo y al igual que en cementos puzolánicos, un hormigón elaborado con una relación agua/cemento más baja desarrolla una resistividad con un crecimiento gradual presentando a la edad de 140 días valores sensiblemente más altos que aquellos hormigones que fueron elaborados con relaciones agua/cemento más elevadas.

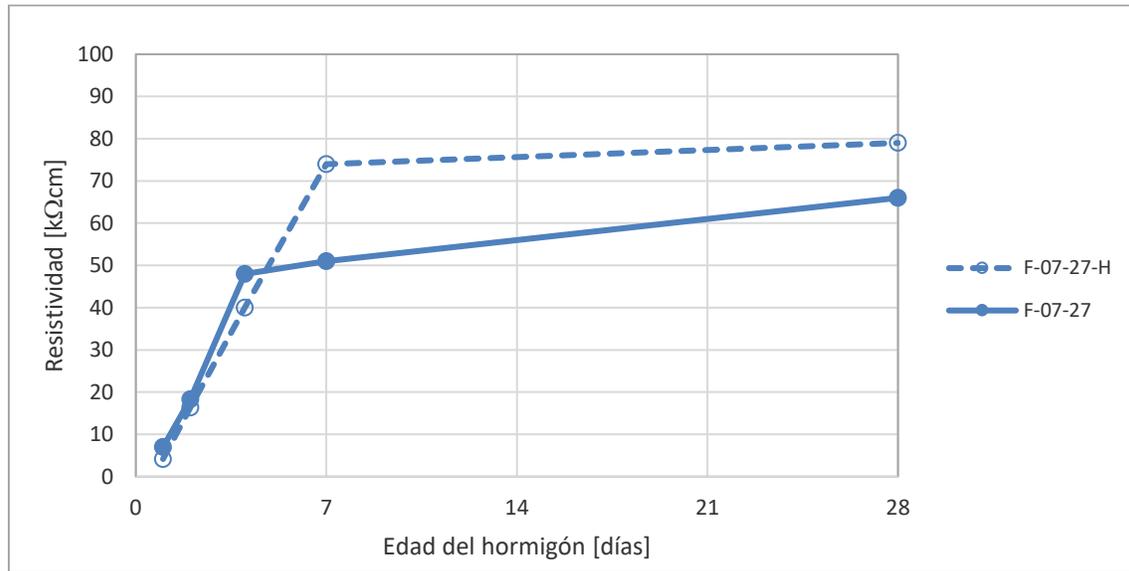


Figura 25 Resistividad entre pastonadas con y sin aditivo hidrófugo.

En el caso de las pastonadas elaboradas con cementos con filler calcáreo pudo observarse que la incorporación de un aditivo hidrófugo permitió que las probetas desarrollaran valores de resistividad más altos, que aquellas probetas elaboradas sin aditivo hidrofugo. Esta característica evidencia que el aditivo permitió disminuir la permeabilidad en la masa del hormigón, alcanzando una mayor resistividad en probetas curadas por inmersión durante 27 días, independientemente de la relación agua/cemento. En la Figura 25 se muestran los resultados obtenidos con cemento portland con filler calcáreo, relación a/c 0,70, curado durante 27 días, con y sin aditivo hidrófugo.

Gráficas comparativas para distintos cementos

Como se ha descrito anteriormente, en este trabajo de investigación se utilizaron dos tipos de cemento, cemento portland puzolánico y cemento portland con filler calcáreo. La finalidad fue realizar una comparativa de la evolución de la resistividad en pastonadas elaboradas con ambos



cementos y concluir de qué manera la resistividad en el hormigón endurecido se ve influenciada por la composición química de cada uno de estos.

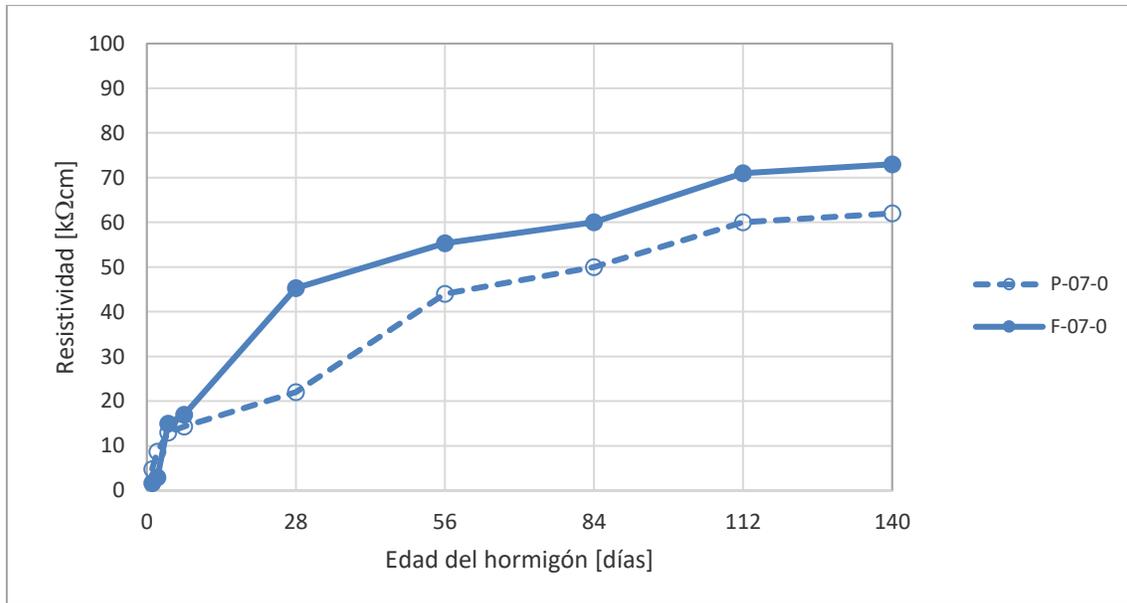


Figura 26 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,70.

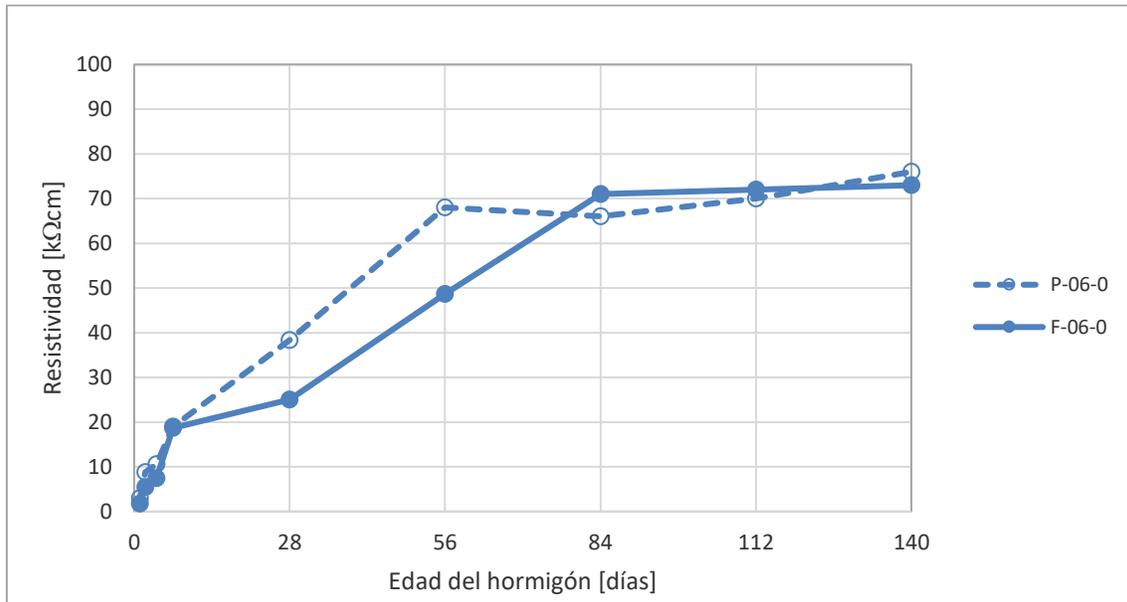


Figura 27 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,60.

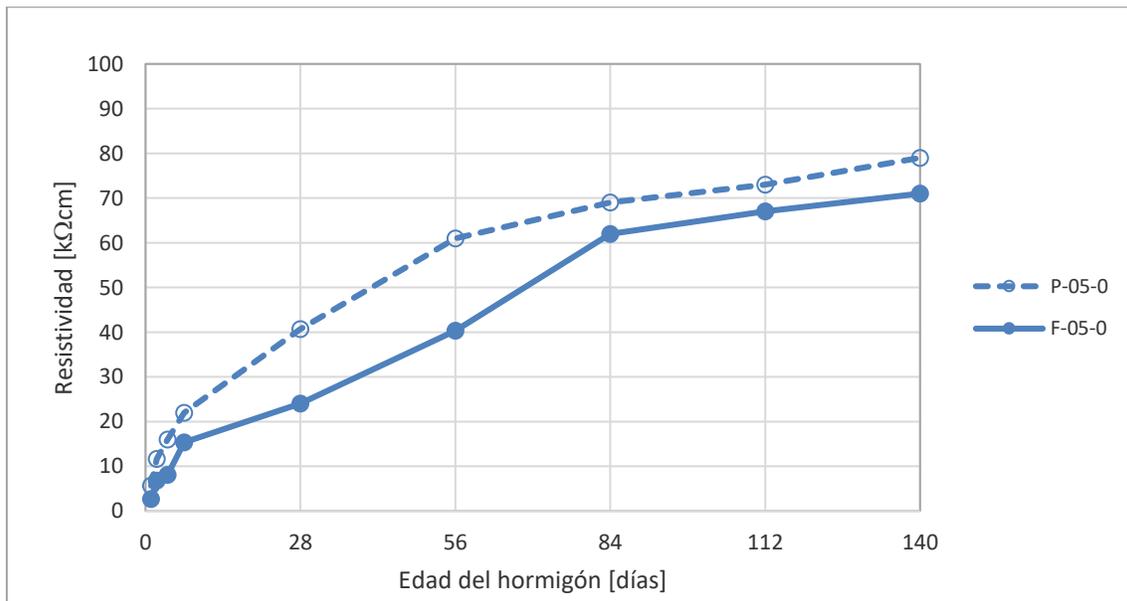


Figura 28 Comparativa de resistividad con distintos cementos, a/c 0,50.



Como puede observarse en la figura anterior para relaciones agua/cemento altas, como el caso de a/c 0,70, las probetas elaboradas con cemento portland con filler calcáreo alcanzaron mayores valores de resistividad. Por otra parte, para las demás relaciones más bajas como a/c 0,6 y 0,5, los mayores valores de resistividad los desarrollaron las probetas que habían sido elaboradas con cemento portland puzolánico. En cuanto disminuye la relación a/c , la diferencia de resistividad alcanzada a la edad de 140 días resulta significativamente mayor por el uso de cemento puzolánico. Las figuras 26, 27 y 28 muestran la comparativa realizada a partir de los datos obtenidos.

Como breve resumen del trabajo desarrollado, se realizaron mediciones en laboratorio de la resistividad eléctrica en probetas de hormigón que fueron llevadas a cabo a efectos evaluar la influencia en las mismas de distintas relaciones a/c consideradas (0,5; 0,6; 0,7), así como también, de los distintos tiempos de curado por inmersión adoptados (sin curado, 1, 3, 6 y 27 días de curado) y de la edad del hormigón desde el momento de su elaboración, para una región de clima con precipitaciones menores a 200 mm anuales. A partir del análisis de los resultados obtenidos en la presente investigación, se pueden establecer las siguientes conclusiones de carácter particular:

- Una mayor disponibilidad de tiempo de curado por inmersión del hormigón hace que la resistividad eléctrica vaya en aumento. Ello se debe a que un curado eficiente favorece a que el volumen de poros capilares se vaya reduciendo a medida que avanza la hidratación del cemento, logrando así una baja porosidad del hormigón.
- Mientras mayor sea la edad del hormigón a partir del momento de su elaboración, también será mayor su resistividad eléctrica. El paso del tiempo contribuye a un mayor desarrollo de los cristales de hidratación, y con ello, a una menor permeabilidad.
- Para las relaciones a/c utilizadas, se pudo establecer que las mismas tuvieron incidencia en los valores máximos de resistividad determinados para las primeras

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

edades del hormigón (< 28 días), pero para edades mayores (56, 112 y 140 días) no hubo diferencias significativas entre los valores medidos.

- Con respecto a los tipos de cementos utilizados, se observó que el comportamiento y las propiedades de estos fueron susceptibles a la relación a/c. Las probetas elaboradas con cemento puzolánico alcanzaron valores más elevados de resistividad con relaciones a/c 0,6 y 0,5, mientras que para la relación a/c 0,70 los valores de resistividad fueron menores a los alcanzados con cemento fillerizado.
- En cuanto al uso de aditivo hidrófugo, hubo una notable diferencia en relación con cada tipo de cemento. Los resultados indican que el hidrófugo no mejoró en forma sustancial la resistividad del hormigón elaborado con cemento portland puzolánico, por el contrario, las probetas alcanzaron valores de resistividad inferiores.
- Por otro lado, los resultados indican que la utilización del aditivo hidrófugo en hormigones elaborados utilizando cemento portland con filler calcáreo permitió alcanzar valores de resistividad mayores, comparado a los valores alcanzados sin incorporación del aditivo.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	----------------	---------------------

Capítulo 5

Conclusiones.

Es posible extraer conclusiones significativas que aportan conocimientos valiosos para la industria de la construcción y la ingeniería civil. La resistividad eléctrica del hormigón se ha revelado como una propiedad de gran relevancia, estrechamente vinculada con su durabilidad y capacidad para resistir procesos de degradación, como la corrosión de las armaduras embebidas. En este trabajo, se evaluaron diversos factores que afectan la resistividad eléctrica del hormigón, siendo estos la relación agua/cemento, el tipo de cemento, la incorporación de aditivos hidrófugos, diferentes tiempos de curado por inmersión y la edad del hormigón desde su elaboración.

La revisión de la literatura demostró que la resistividad eléctrica es un indicador clave para entender la vida útil del hormigón y prever su comportamiento frente a los mecanismos de degradación. La capacidad de medir la resistividad de forma no destructiva, utilizando métodos como la sonda de Wenner, se presenta como una herramienta valiosa para evaluar la calidad del hormigón, su porosidad y saturación. Esto resulta fundamental tanto para el diseño de nuevas estructuras como para el mantenimiento y control de las existentes.

Las conclusiones específicas derivadas de las mediciones en laboratorio resultaron de gran interés para comprender la importancia que representa la resistividad eléctrica. Se observó que un curado adecuado y prolongado conlleva a una reducción de la porosidad y a un aumento de la resistividad eléctrica del hormigón, lo que contribuye significativamente a su durabilidad frente a la corrosión del acero. A medida que el hormigón madura, su resistividad también aumenta debido al desarrollo de cristales de hidratación y a una menor permeabilidad.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

La resistividad eléctrica del hormigón tiende a aumentar con el paso del tiempo, y este fenómeno está directamente relacionado con la edad del material. A medida que el hormigón madura, sus propiedades eléctricas cambiarán gradualmente debido a la interacción de sus componentes internos y a la formación de estructuras más estables.

Este incremento en la resistividad eléctrica con la edad del hormigón puede deberse a diversos factores. Por ejemplo, la hidratación continua del cemento, que es un proceso químico clave en la formación del hormigón, conlleva la creación de productos de hidratación y la formación de estructuras cristalinas. Estos procesos contribuyen a una reducción de la porosidad y a una mayor compactación de la matriz del hormigón, lo que a su vez disminuye la movilidad de los portadores de carga eléctrica a través del material.

Además, a medida que el hormigón madura, puede experimentar una lenta consolidación y endurecimiento, lo que resulta en una disminución de la permeabilidad y una menor cantidad de poros interconectados. Esta disminución de la porosidad y la mejora en la estructura interna del hormigón impactan directamente en su capacidad para conducir la electricidad, lo que se traduce en un aumento de la resistividad eléctrica.

Por lo tanto, es crucial considerar la edad del hormigón cuando se analiza su resistividad eléctrica, ya que esta propiedad evoluciona con el tiempo debido a las transformaciones internas del material a lo largo de su vida útil. Esta información es relevante en numerosas aplicaciones de ingeniería, como la evaluación de la estructura en elementos de hormigón, la detección de daños o la monitorización de construcciones a largo plazo.

Diseñar un hormigón que pretenda ser durable frente a un mecanismo de degradación que involucre la corrosión del acero, implica garantizar un adecuado tiempo de curado del hormigón al menos no menor a siete días, en coincidencia con lo requerido por el Reglamento CIRSOC 201-2005. Ello permite que la matriz cementicia resulte menos permeable a la solución de poros y en



consecuencia, a una mayor dificultad al desplazamiento de los electrones en la microestructura del hormigón.

Se observó que la relación agua/cemento tiene una incidencia en los valores máximos de resistividad en las primeras edades del hormigón, aunque esta influencia se reduce para edades más avanzadas.

Además, se observó una importante diferencia en el comportamiento de los distintos tipos de cemento en donde se destaca el uso del cemento portland puzolánico que alcanzó valores de resistividad mayores con diferencias significativas a medida que las relaciones agua/cemento son más bajas, esto se relaciona íntimamente con las propiedades características de las puzolanas sobre los hormigones entre los que se destaca la reducción en la intercomunicación entre las cavidades capilares. El uso de un aditivo hidrófugo permitió que los hormigones elaborados con cemento portland con filler calcáreo alcancen valores de resistividad más altos, siendo una característica particular que no se replicó en las muestras que contenían cemento portland puzolánico.

En términos generales, estas conclusiones subrayan la importancia de un adecuado diseño y control de la mezcla de hormigón, asegurando un tiempo de curado óptimo para lograr una matriz cementicia con menor porosidad y mayor resistividad. De esta manera, se garantiza la integridad y durabilidad de las estructuras de hormigón, minimizando los riesgos de degradación y asegurando su funcionamiento a lo largo del tiempo.

Este trabajo aporta una comprensión más profunda de la resistividad eléctrica del hormigón y su relación con la durabilidad, lo que será de gran valor para profesionales y académicos que trabajan en la industria de la construcción y el desarrollo de infraestructuras sostenibles y seguras. Las conclusiones aquí presentadas contribuyen a ampliar el conocimiento en el campo de la ingeniería civil y pueden ser la base para futuras investigaciones y mejoras en el diseño y mantenimiento de estructuras de hormigón.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Por último, es relevante destacar que el desarrollo de este proyecto nos brindó valiosos conocimientos que resultaron útiles para el desarrollo y posterior aceptación de un artículo científico en el congreso brasileño de hormigón IBRACON 2017, titulado “Estudio de la resistividad eléctrica del hormigón y su dependencia con la relación a/c y el tiempo de curado en clima semiárido”.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Lista de referencias

- Abel Castañeda, Manuel Rodríguez (2014). “Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado”.
- Andrade C. y D’Andréa R. (2011), “La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad”. Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción.
- Araújo C., Meira G. (2020), “Correlation between concrete strength properties and surface electrical resistivity”, IBRACON Structures and Materials Journal.
- ASTM C1202 (2012) Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration.
- Bermúdez Miguel A. (2011) Tesis Doctoral, “Corrosión de las armaduras del hormigón armado”, Universidad politécnica de Madrid.
- D’Andréa R. (2010), “Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica”, Instituto de ciencias de la construcción.
- Dal Molin D. (1988), “Fissuras en estructuras de concreto armado: Análisis das manifestacoes típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul”, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.
- Di Maio, Sota, Traversa (1995). Patología de estructuras de hormigón: Análisis de algunos de los casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años. III Congreso Iberoamericano de patologías de la construcción y V Congreso Iberoamericano de control de calidad, La Habana, Cuba.
- Escorihuela M.J. Escorihuela, Y. Menéndez y F. Triviño. (1993), “Influencia del Filler Calizo en Morteros de Cemento Portland”. Materiales de Construcción. Vol. 43. N° 229. pp 17 - 24.
- González Sersen (2011), “Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro”. Facultad de ciencias físicas y matemáticas, Universidad de Chile.
- Guzmán M., Maldonado G., Giolo E. (2018), “Evaluación de la resistividad eléctrica del hormigón como parámetro de durabilidad frente a la corrosión del acero”.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

- Guzmán G., Maldonado G., Lanzilotta J., Patane E., Cardone M., Furlán L. (2.017), “Estudio de la resistividad eléctrica del hormigón y su dependencia con la relación a/c y el tiempo de curado en clima semiárido”, ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2017 – 59CBC2017.
- Hornbostel Karla, Larsen Claus K., Geiker Mette R. (2.013), Relationship between concrete resistivity and corrosion rate, *Cement & Concrete Composites* 39, 60–72.
- IRAM 1534. (2004) Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. Buenos Aires, Argentina, IRAM.
- IRAM 50000. (2000), Cemento para uso general. Buenos Aires, Argentina, IRAM.
- K. R. Gowers, S. G. Millard (1999), “Measurement of Concrete Resistivity for Assessment of Corrosion Severity of Steel Using Wenner Technique”, *ACI Materials Journal*.
- López, M. & Castro, J. T. (2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros de hormigón con el tiempo. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 25, N° 3, pág. 419 – 431. Santiago de Chile, 2010.
- Montes de Oca, J. J. et al, (2009) Efecto de la adición mineral cal – zeolita sobre la resistencia a la compresión y durabilidad de un hormigón. *Revista de ingeniería de construcción* Vol. 24, N° 2, pág. 181 - 194. Santiago de Chile.
- Morris W., E. I. Moreno, and A. A. Sagués (1996), "Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders a Wenner array probe," *Cement Concr. Res.*, vol. 26, pp. 1779–1787.
- Orellana V. M. y Estrella J. P. (2010), “Determinación de la resistencia y resistividad eléctrica de probetas de varios diseños de hormigón sometidas a ataques de contaminantes”.
- Parrot, L.J. (1987), "A Review of Carbonation in Reinforced Concrete", *Cement and Concrete Association, Building Research Establishment*, julio de 1987.
- PROCEQ CANIN (2009), “Operating Instructions, Corrosion Analyzing Instrument”.
- Silva P., Ferreira R., Figueiras H. (2011), “Electrical Resistivity as a Means of Quality Control of Concrete – Influence of Test Procedure”.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

RILEM TC 154-EMC, (2000), International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures, "ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES FOR MEASURING METALLIC CORROSION" 33, 603-611.

Roberts, M.H. (1981), "Carbonation of Concrete Made with Dense Natural Aggregates", BRE Information Paper.

Sánchez, M. I., Fías, M. & Rivera, J. (2000). Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

Sprung S. and Siebel E.. (1991), Assessment of the Suitability of Limestone for Producing Portland Limestone Cement (PKZ)". ZementKalk-Gips. Vol. 44, N°1, pp 1 - 11.

UNE 83988-1 (2014), Durabilidad del Hormigón, Método de Ensayo: Determinación de la Resistividad Eléctrica – Parte I: Método Directo.

UNE 83988-2 (2014), Durabilidad del Hormigón, Método de Ensayo: Determinación de la Resistividad Eléctrica – Parte I: Método de las Cuatro Puntas o de Wenner.

 F. R. M. U. T. N.	PROYECTO FINAL	AÑO ACADÉMICO 2.023
--	-----------------------	----------------------------

Apéndice



U.T.N.
F.R.M.

PROYECTO FINAL

AÑO ACADÉMICO 2.023

TABLA A-1 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días
P07	P07D0	1	0	4,9	7,7	13,0	15,0	20,0	44	50	60	62
		2		4,8	8,6	13,0	14,0	22,0				
		3		4,8	9,8	13,0	14,0	24,0				
		media		4,8	8,7	13,0	14,3	22,0				
	P07D1	1	1		4,4	12,0	14,0	32,0	48	59	61	60
		2			4,3	13,0	16,0	19,0				
		3			4,8	14,0	14,0	28,0				
		media			4,5	13,0	14,7	26,3				
	P07D3	1	3			6,0	9,1	33,0	50	61	65	68
		2			6,8	8,8	30,0					
		3			6,8	8,5	38,0					
		media			6,5	8,8	33,7	50,0				
	P07D6	1	6				6,6	36,0	52	62	86	75
		2			7,8	41,0						
		3			7,0	35,0						
		media			7,1	37,3	52,0	62,0				
P07D27	1	27					9,5	40	61	81	83	
	2					11,0						
	3					9,9						
	media					10,1	40,0					61,0

TABLA A-2 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días
P06	P06D0	1	0	2,5	8,2	10,00	19,00	38,0	66	66	70	76
		2		2,9	7,3	13,00	18,00	41,0	76			
		3		3,6	11,0	8,70	20,00	36,0	62			
		media		3,0	8,8	10,6	19,0	38,3	68,0			
	P06D1	1	1		5,5	7,80	18,00	44,0	52	57	67	69
		2			5,6	12,00	16,00	40,0	60			
		3			5,6	9,50	17,00	38,0	46			
		media			5,6	9,8	17,0	40,7	52,7			
	P06D3	1	3			7,40	13,00	45,0	64	79	80	85
		2			6,20	12,00	43,0	76				
		3			7,40	20,00	45,0	76				
		media			7,0	15,0	44,3	72,0	79,0			
	P06D6	1	6			7,40	42,0	77	78	81	87	
		2			7,40	38,0	67					
		3			7,60	37,0	67					
		media			7,5	39,0	70,3	78,0				81,0
P06D27	1	27				13,0	49	59	69	83		
	2					13,0	49					
	3					10,0	46					
	media					12,0	48,0				59,0	69,0



U.T.N.
F.R.M.

PROYECTO FINAL

AÑO ACADÉMICO 2.023

TABLA A-3 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
P05	P05D0	1	0	6,7	12,0	17,0	26,0	38,0	52				
		2		5,5	11,0	15,0	19,0	41,0	65				
		3		4,7	12,0	16,0	21,0	43,0	66	69	73	79	
		media		5,6	11,7	16,0	22,0	40,7	61,0	69,0	73,0	79,0	
	P05D1	1	1		6,6	12,0	14,0	47,0	54				
		2		8,0	13,0	13,0	40,0	55					
		3		7,1	12,0	18,0	44,0	51	62	68	78		
		media		7,2	12,3	15,0	43,7	53,3	62,0	68,0	78,0		
	P05D3	1	3		6,9	15,0	45,0	55					
		2		7,1	14,0	36,0	56						
		3		6,8	16,0	41,0	57	70	63	82			
		media		6,9	15,0	40,7	56,0	70,0	63,0	82,0			
	P05D6	1	6		7,1	44,0	51						
		2		6,1	33,0	49							
		3		9,8	39,0	52	58	62	77				
media		7,7		38,7	50,7	58,0	62,0	77,0					
P05D27	1	27					15,0	49					
	2					11,0	45						
	3					15,0	48	61	63	69			
	media					13,7	47,3	61,0	63,0	69,0			

TABLA A-4 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
F07	F07D0	1	0	2,1	2,9	16	18,00	43,0	62				
		2		1,2	2,5	17	15,00	47,0	49				
		3		1,8	3,4	12	18,00	46,0	55	60	71	73	
		media		1,7	2,9	15,0	17,0	45,3	55,3	60,0	71,0	73,0	
	F07D1	1	1		2,7	23	29,90	45,0	52				
		2		3,5	20	29,10	43,0	48					
		3		4,1	23	28,20	46,0	57	63	65	69		
		media		3,4	22,0	29,1	44,7	52,3	63,0	65,0	69,0		
	F07D3	1	3		5,00	10,00	41,0	47					
		2		7,00	11,00	45,0	53						
		3		3,10	11,00	43,0	58	69	75	76			
		media		5,0	10,7	43,0	52,7	69,0	75,0	76,0			
	F07D6	1	6		6,10	35,0	42						
		2		6,70	34,0	35							
		3		6,00	35,0	33	55	71	77				
media		6,3		34,7	36,7	55,0	71,0	77,0					
F07D27	1	27					7,2	14					
	2					7,0	17						
	3					6,8	24	48	51	66			
	media					7,0	18,3	48,0	51,0	66,0			



U.T.N.
F.R.M.

PROYECTO FINAL

AÑO ACADÉMICO 2.023

TABLA A-5 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
F06	F06D0	1	0	2,2	4,9	6,6	19,00	23,0	42				
		2		1,2	5,1	9	18,00	27,0	49				
		3		1,8	6,4	6,8	19,00	25,0	55	71	72	73	
		media		1,7	5,5	7,5	18,7	25,0	48,7	71,0	72,0	73,0	
	F06D1	1	1		3,7	5,6	13,00	24,0	51				
		2		4,5	5	7,00	22,0	47					
		3		4,3	6	12,00	23,0	59	73	69	70		
	media	4,2	5,5	10,7	23,0	52,3	73,0	69,0	70,0				
	F06D3	1	3			5,40	13,00	28,0	41				
		2		3,70	14,00	31,0	38						
		3		3,40	15,00	28,0	35	64	70	75			
		media		4,2	14,0	29,0	38,0	64,0	70,0	75,0			
	F06D6	1	6				5,20	20,0	33				
		2		4,70	19,0	35							
		3		5,10	22,0	42	67	73	77				
media		5,0		20,3	36,7	67,0	73,0	77,0					
F06D27	1	27					4,8	24					
	2		5,2	14									
	3		4,8	12	31	61	68						
	media		4,9	16,7	31,0	61,0	68,0						

TABLA A-6 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kQcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
F05	F05D0	1	0	2,4	6,9	8,2	15,00	18,0	37				
		2		2,2	6,5	8,4	14,00	23,0	41				
		3		3,4	7,1	7,7	17,00	31,0	43	62	67	71	
		media		2,7	6,8	8,1	15,3	24,0	40,3	62,0	67,0	71,0	
	F05D1	1	1		3,8	7	11,00	16,0	49				
		2		4,2	6,9	11,00	21,0	45					
		3		3,6	6,7	13,00	19,0	52	67	71	72		
	media	3,9	6,9	11,7	18,7	48,7	67,0	71,0	72,0				
	F05D3	1	3			2,90	5,40	11,0	38				
		2		3,50	6,20	7,0	40						
		3		4,00	5,90	9,0	35	58	65	70			
		media		3,5	5,8	9,0	37,7	58,0	65,0	70,0			
	F05D6	1	6				3,50	9,0	27				
		2		4,00	7,0	32							
		3		3,70	9,0	29	56	66	72				
media		3,7		8,3	29,3	56,0	66,0	72,0					
F05D27	1	27					5,4	21					
	2		6,2	19									
	3		3,1	17	41	58	67						
	media		4,9	19,0	41,0	58,0	67,0						

TABLA A-7 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
P07H	P07HD0	1	0	1,9	6,1	13,0	17,0	44,0	54				
		2		2,6	5,0	11,0	15,0	61,0	67				
		3		2,0	5,3	10,0	10,0	64,0	46	52	61	63	
		media		2,2	5,5	11,3	14,0	56,3	55,7	52,0	61,0	63,0	
	P07HD1	1	1		2,0	7,6	9,9	67,0	78				
		2		1,1	6,3	9,7	41,0	70					
		3		2,0	5,1	9,2	53,0	52	55	59	58		
	media	1,7	6,3	9,6	53,7	66,7	55,0	59,0	58,0				
	P07HD3	1	3			3,5	9,3	57,0	78				
		2		3,8	11,0	63,0	78						
		3		3,7	11,0	76,0	60	56	65	59			
		media		3,7	10,4	65,3	72,0	56,0	65,0	59,0			
	P07HD6	1	6				2,6	27,0	47				
		2		4,8	62,0	78							
		3		6,9	39,0	50	59	64	62				
media		4,8		42,7	58,3	59,0	64,0	62,0					
P07HD27	1	27					6,2	53					
	2		7,7	52									
	3		5,6	52	57	60	65						
	media		6,5	52,3	57,0	60,0	65,0						

TABLA A-8 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
P06H	P06HD0	1	0	13,0	8,9	11,00	13,00	39,0	64				
		2		15,0	9,3	11,00	15,00	40,0	67				
		3		15,0	9	12,00	13,00	37,0	59	64	66	61	
		media		14,3	9,1	11,3	13,7	38,7	63,3	64,0	66,0	61,0	
	P06HD1	1	1		4,5	6,30	11,00	39,0	60				
		2		3,9	5,20	9,60	31,0	55					
		3		4,3	5,80	10,00	33,0	52	47	50	57		
	media	4,2	5,8	10,2	34,3	55,7	47,0	50,0	57,0				
	P06HD3	1	3			2,50	9,30	35,0	62				
		2		3,20	8,20	29,0	57						
		3		2,90	7,60	30,0	61	60	61	55			
		media		2,9	8,4	31,3	60,0	60,0	61,0	63,0			
	P06HD6	1	6				4,00	27,0	53				
		2		4,40	29,0	46							
		3		5,00	31,0	40	57	50	57				
media		4,5		29,0	46,3	57,0	50,0	57,0					
P06HD27	1	27					8,2	31					
	2		9,2	25									
	3		9,1	29	45	52	55						
	media		8,8	28,3	45,0	52,0	55,0						

TABLA A-9 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días
P05H	P05HD0	1	0	3,2	6,8	15,00	25,00	42,0	52			
		2		1,9	5,7	16,00	23,00	40,0	52			
		3		1,5	5,5	13,00	22,00	43,0	53	59	67	66
		media		2,2	6,0	14,7	23,3	41,7	52,3	59,0	67,0	66,0
	P05HD1	1	1	2,0	11,00	19,00	20,0	42				
		2		0,8	12,00	13,00	23,0	40				
		3		1,3	10,00	15,00	22,0	45	46	61	63	
	media	1,4	11,0	15,7	21,7	42,3	46,0	61,0	63,0			
	P05HD3	1	3	3,40	14,00	23,0	56					
		2		5,30	12,00	24,0	58					
		3		5,10	13,00	28,0	61	63	62	65		
		media		4,6	13,0	25,0	58,3	63,0	62,0	63,0		
	P05HD6	1	6	4,90	38,0	53						
		2		4,20	35,0	53						
		3		4,60	31,0	52	55	69	73			
media		4,6		34,7	52,7	55,0	69,0	63,0				
P05HD27	1	27	9,3	41								
	2		8,7	42								
	3		9,9	45	44	59	60					
	media		9,3	42,7	44,0	59,0	63,0					

TABLA A-10 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días
F07H	F07HD0	1	0	3,0	3,6	4,1	7,80	19,0	31			
		2		3,5	3,9	4,5	9,00	16,0	32			
		3		2,0	3,2	4,9	7,20	12,0	26	39	47	54
		media		2,8	3,6	4,5	8,0	15,7	29,7	39,0	47,0	54,0
	F07HD1	1	1	2,5	5,9	6,70	9,0	22				
		2		2,2	6,5	6,70	14,0	19				
		3		2,9	6,9	6,90	13,0	27	41	46	52	
	media	2,5	6,4	6,8	12,0	22,7	41,0	46,0	52,0			
	F07HD3	1	3	3,00	5,90	8,0	18					
		2		2,60	5,50	10,0	20					
		3		3,40	5,10	11,0	22	40	68	75		
		media		3,0	5,5	9,7	20,0	40,0	68,0	75,0		
	F07HD6	1	6	2,20	7,7	15						
		2		2,20	8,2	21						
		3		2,90	10,0	18	37	63	68			
media		2,4		8,6	18,0	37,0	63,0	68,0				
F07HD27	1	27	5,2	17								
	2		3,3	13								
	3		4,0	19	40	74	79					
	media		4,2	16,3	40,0	74,0	79,0					

TABLA A-11 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
F06H	F06HD0	1	0	3,0	7,6	11	12,00	21,0	33,0				
		2		3,5	7,3	13	13,00	19,0	31,0				
		3		3,3	7,6	7	15,00	20,0	35,0	48	55	59	
		media		3,3	7,5	10,3	13,3	20,0	33,0	48,0	55,0	59,0	
	F06HD1	1	1	2,2	2,2	4,5	7,00	17,0	22				
		2		3,9	6	8,20	19,0	24					
		3		1,9	6,5	6,20	22,0	27	49	55	61		
		media		2,7	5,7	7,1	19,3	24,3	49,0	55,0	61,0		
	F06HD3	1	3			4,20	5,30	15,0	23				
		2		3,20	4,10	17,0	24						
		3		4,00	5,10	20,0	23	53	59	63			
		media		3,8	4,8	17,3	23,3	53,0	59,0	63,0			
	F06HD6	1	6				2,30	9,0	16				
		2		3,90	16,0	12							
		3		3,60	14,0	17	59	57	63				
media		3,3		13,0	15,0	59,0	57,0	63,0					
F06HD27	1	27					5,2	10					
	2		4,9	10									
	3		5,1	12	60	61	72						
	media		5,1	10,7	60,0	61,0	72,0						

TABLA A-12 RESULTADOS DE ENSAYOS DE RESISTIVIDAD A DISTINTAS EDADES [kΩcm]

Pastonada	Identificación	Probetas	Curado [días]	a 24 hs	a 2 días	a 4 días	a 7 días	a 28 días	a 56 días	a 84 días	a 112 días	a 140 días	
F05H	F05HD0	1	0	2,9	6,3	9,5	13,00	20,0	27,0				
		2		3,3	5,5	12	14,00	21,0	29,0				
		3		1,5	6,1	11	17,00	19,0	23,0	36,0	41,0	54,0	
		media		2,6	6,0	10,8	14,7	20,0	26,3	36,0	41,0	54,0	
	F05HD1	1	1		5,3	8,3	15,00	18,0	22,0				
		2		5	7	18,00	20,0	23,0					
		3		5,6	9,1	16,00	21,0	22,0	37,0	45,0	48,0		
		media		5,3	8,1	16,3	19,7	22,3	37,0	45,0	48,0		
	F05HD3	1	3			4,20	12,00	14,0	27,0				
		2		4,50	14,00	16,0	27,0						
		3		3,20	9,80	19,0	21,0	41,0	49,0	56,0			
		media		4,0	11,9	16,3	25,0	41,0	49,0	56,0			
	F05HD6	1	6				3,50	10,0	15,0				
		2		3,00	12,0	13,0							
		3		4,30	12,0	18,0	29,0	36,0	56,0				
media		3,6		11,3	15,3	29,0	36,0	56,0					
F05HD27	1	27					10,0	16,0					
	2		9,6	16,0									
	3		10,5	15,0	31,0	54,0	71,0						
	media		10,0	15,7	31,0	54,0	71,0						