

ESCUELA DE CUARTO NIVEL
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL MENDOZA

Evaluación de la resistividad eléctrica del hormigón
como parámetro de durabilidad frente a la corrosión
del acero.

Emilce Gisela Giolo

Reporte técnico N° 01

Fecha de envío (06 de Marzo de 2018)

NOTA

Este trabajo fue preparado para la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, como resultado de la Especialización en Patología y Control de Calidad de Estructuras Sismorresistentes, carrera de posgrado de la Escuela de cuarto nivel según Ordenanza número 1293. Ni la Escuela de cuarto nivel, la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, ni otra persona que actúe en su nombre:

- a. hace una garantía, expresa o implícita, con respecto al uso de cualquier información, aparato, método o proceso divulgado en este informe o que tal uso no infrinja los derechos de propiedad privada;
- b. asume cualquier responsabilidad de cualquier tipo con respecto al uso de la información, o el daño resultante del uso, cualquier información, aparato, método o proceso divulgado en este informe.

Las opiniones, hallazgos, conclusiones y/o recomendaciones expresados en este trabajo son propios del autor y no reflejan necesariamente las opiniones de la Escuela de cuarto nivel o de la Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional.

ESCUELA DE CUARTO NIVEL
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL MENDOZA

Especialización en Patología y Control de Calidad de Estructuras
Sismorresistentes.

**Evaluación de la resistividad eléctrica del hormigón como parámetro de
durabilidad frente a la corrosión del acero**

por

Emilce Gisela Giolo

Fecha de Presentación: 06 de Marzo de 2018

Fecha de publicación: Marzo de 2018

Reporte técnico N° 01

- 1 Ing. Civil, CeReDeTeC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

ESCUELA DE CUARTO NIVEL
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.
Rodríguez 273, Ciudad, Mendoza, Argentina.
Teléfono: (0261) 5244500 - CP (5502AJE)
E-mail: emilce.giolo@frm.utn.edu.ar ; WWW Site: <http://www.frm.utn.edu.ar>

PREFACIO

El tema aquí presentado corresponde al trabajo final de la carrera de posgrado “Especialización en Patología y Control de Calidad de Estructuras Sismorresistentes” dictada en la Escuela de cuarto nivel de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza.

El tema elegido es parte del Proyecto de investigación que lleva adelante el Dr. Ing. Marcelo Guzmán.

La metodología de trabajo se basó en la medición de potencial eléctrico mediante el empleo de dispositivo CANIN PROCEQ utilizando la sonda de Wenner para evaluar la resistividad eléctrica en probetas de hormigón. Dichas probetas fueron confeccionadas de manera normalizada y curadas mediante inmersión.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de este trabajo serán de gran utilidad para el control de calidad de estructuras de hormigón y para el diseño de hormigones durables ante mecanismos de corrosión del acero con materiales locales.

RESUMEN

Los hormigones al igual que el resto de los materiales poseen propiedades que los identifican. La resistividad eléctrica es una propiedad única para cada material y en el caso de hormigones armados, la velocidad de corrosión del acero embebido en el mismo depende de dicha propiedad. La resistividad es una medida de la mayor o menor posibilidad que un flujo eléctrico pueda conducirse. En el caso del hormigón, dependerá entre otras cosas, del grado de saturación de los poros, de la hidratación de la pasta y de la condición ambiental. El hecho de que un hormigón armado 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, la degradación del hormigón. En el presente trabajo de investigación se evalúa cómo influye en la resistividad eléctrica del hormigón: i) la variación de la relación a/c (0.5, 0.6, 0.7 y 0.8); ii) el tipo de cemento seleccionado (puzolánico y fillerizado); y iii) la incorporación de un aditivo (con y sin hidrófugo). Para la evaluación se confeccionaron probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm curadas mediante inmersión durante 27 días, midiendo sobre las mismas la resistividad eléctrica mediante el uso del dispositivo CANIN utilizando la sonda de Wenner (método de los 4 puntos). A partir de los resultados evaluados se establecen conclusiones de interés acerca del diseño más adecuado de un hormigón durable ante mecanismos de corrosión del acero, como por ejemplo, la limitación de la máxima relación a/c y la elección del tipo de cemento más conveniente, entre otras.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primer lugar a los investigadores responsables del CeReDeTeC (Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica) por permitirme efectuar en sus instalaciones la parte experimental del trabajo que aquí presento, por proporcionarme los materiales y medios necesarios para la realización de este estudio.

En segundo lugar agradecer al Dr. Ing. Marcelo Guzmán quien me guió durante todo el proceso de pruebas y resultados de esta especialización, por proporcionarme el material bibliográfico necesario y por haber dedicado parte de su valioso tiempo al seguimiento de los ensayos.

A mis colegas y amigos quienes me proporcionaron información y material fotográfico de gran utilidad.

Por último agradecer a mi esposo, a mis hijos y a mis padres por la paciencia y apoyo que me brindan en cada proyecto emprendido.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1.....	14
INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	14
1.1 INTRODUCCIÓN	14
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO	15
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	16
1.4 EL HORMIGÓN.....	17
1.5 COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL CLINKER	17
1.6 USO DE ADITIVOS EN HORMIGONES.....	20
CAPÍTULO 2.....	22
LA DURABILIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CORROSIÓN.....	22
2.1 DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN ARMADO	22
2.2 CORROSIÓN EN LAS ARMADURAS	24
2.2.1 PROCESO DE CORROSIÓN.....	25
2.2.2 INGRESO DE CLORUROS	27
2.2.3 CARBONATACIÓN EN EL HORMIGÓN ARMADO.....	29
CAPÍTULO 3.....	31
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	31
3.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	31
3.2 MEDICIÓN MEDIANTE LA Sonda DE WENNER.....	32
3.3 HORMIGONES EN ESTUDIO	33
CAPÍTULO 4.....	35
DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	35
4.1 MEDICIONES REALIZADAS	35
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS.....	36
CAPÍTULO 5.....	39
CONCLUSIONES	39
CAPÍTULO 6.....	40
REFERENCIAS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1–1: Clinker y cemento como producto final.....	19
Figura 2–1: Patologías que afectan la durabilidad del hormigón. (a) Daños por ataques físicos. (b) Daños por ataques químicos y físicos.	22
Figura 2–2: Corrosión en estructuras de hormigón armado. (a) Daños en viga de puente canal en San Martín, Mendoza. (b) corrosión en armadura de vigueta tipo SAP. (c) corrosión en columna de encuentro de muro exterior de vivienda.	25
Figura 2–3: Proceso de corrosión en las armaduras	26
Figura 2–4: Proceso de carbonatación en el hormigón.....	30
Figura 3–1: Esquema representativo para la medición de resistividad eléctrica.....	32
Figura 3–2: (a) Sonda de Wenner utilizada para la medición de resistividad eléctrica. (b) Representación esquemática de los cuatro electrodos del ensayo de resistividad (modificada de Sengul y Gjörv, 2008) ..	32
Figura 4–1: Medición de resistividad eléctrica en probetas cilíndricas.....	35
Figura 4–2: Resistividades eléctricas obtenidas para las distintas pastonadas de estudio.	37
Figura 4–3: Inferencia del límite máximo de la relación a/c para pastonadas P-0x.	37
Figura 4–4: Requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones. Parte de Tabla 2.5 extraída de CIRSOC 201 (2005).	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1: Principales componentes del cemento Portland.....	18
Tabla 1–2: Límites aproximados de composición del cemento Portland	18
Tabla 1–3: Tipos de cemento para uso general de acuerdo a la Norma IRAM 50000:2017.....	20
Tabla 2–1: Requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones, en función del tipo de exposición de la estructura (Tabla 2.5, CIRSOC 201 (2005)).	23
Tabla 2–2: contenido máximo de ión cloruro (Cl) en el hormigón endurecido (Tabla 2.6 CIRSOC 201 (2005)).	29
Tabla 3–1: Designación de las pastonadas de estudio. Proporción de materiales en peso.....	33
Tabla 3–1 (continuación): Designación de las pastonadas de estudio. Proporción de materiales en peso.	34
Tabla 4–1: Resistividad eléctrica promedio evaluada en pastonadas con 27 días de curado.	36

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

El hormigón es un material compuesto, empleado en construcción, constituido por agregados inmersos en una matriz cementicia. En algunas regiones es llamado **concreto**, término que deriva del inglés *concrete*, que a su vez deriva del latín **concrētus** «*crecer unidos*» o «*unir*» (Traversa, 2016).

El hormigón constituye una parte fundamental en la historia de la construcción. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante los efectos atmosféricos. Con el tiempo se idearon diversas soluciones, para conseguir mezclas que no se degradasen fácilmente.

En el Antiguo Egipto se utilizaron diversas pastas obtenidas con mezclas de yesos y calizas disueltas en agua para poder unir los sillares de piedra, éstos aún perduran entre los bloques del revestimiento de la Gran Pirámide de Guiza.

En la Antigua Grecia, hacia el 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer concreto de la historia, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini.

Los antiguos romanos emplearon tierras o cenizas volcánicas, conocidas también como puzolanas, que contienen sílice y alúmina, y que al combinarse químicamente con la cal, daban como resultado el denominado cemento puzolánico (obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio). Añadiendo a su masa trozos de cerámicas u otros materiales de baja densidad obtuvieron el primer concreto aligerado. Con la caída del imperio romano, el uso del hormigón comenzó a decaer.

En el siglo XVIII, John Smeaton, al reconstruir el faro en el acantilado de Edystone, descubrió que los morteros formados por la adición de una puzolana y una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción del agua del mar y los húmedos vientos. Fue concluido en 1759 y su cimentación aún perdura.

En el siglo XIX se crea la primer patente de cemento portland, denominado así por su color gris verdoso oscuro, muy similar a la piedra de la isla de Portland. En 1824 Joshep Aspdin y James Parker calcinaron en un horno a altas temperaturas una mezcla de piedra caliza y arcilla lo que dio origen al clinker. A finales de siglo XIX comienza la industrialización del cemento con la aparición de los hornos rotativos.

En el siglo XX comienza el auge en la industria del cemento con la incorporación de nuevas técnicas y químicos que permitieron mejorar la calidad del cemento.

Actualmente el hormigón es uno de los materiales más utilizado a nivel mundial por lo que es importante un buen diseño del mismo para obtener estructuras más duraderas que resistan las acciones agresivas tanto físicas como químicas y biológicas a lo largo de su vida útil, contribuyendo de este modo a la sustentabilidad del medio ambiente.

Una de las propiedades que nos permiten evaluar la durabilidad de los hormigones es la resistividad eléctrica. Al respecto, la resistividad es una medida de la mayor o menor posibilidad que una corriente eléctrica, generada por el flujo de iones, puede conducirse, en nuestro caso por un hormigón, y dependerá del grado de saturación de los poros, de la hidratación de la pasta, del tipo de cemento, de la relación a/c, etc.

El hecho que un hormigón armado 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. Si bien el hormigón armado resulta ser un material muy durable en la mayoría de los ambientes, en aquellos contaminados con cloruros o cuando las edades exceden 50 años, se puede producir la corrosión de la armadura y con ello, la degradación del hormigón.

Al respecto y a partir de un estudio realizado en Argentina (Di Maio *et al.*, 1999) sobre un total de 177 estructuras evaluadas, se indica que el porcentaje de estructuras afectadas por procesos de corrosión de sus armaduras alcanza aproximadamente el 16%. De un análisis de 1512 casos de diagnóstico con diferentes patologías en el sur de Brasil (Dal Molin, 1988), se determinó que la incidencia de la corrosión de armaduras representa el 40% del total de los daños. Esto muestra cómo los problemas de degradación de las estructuras de hormigón armado asociados a la corrosión de la armadura resultan ser muy significativos, y frente a ello, los elevados costos que implica la reparación de estas estructuras afectadas. La resistividad eléctrica del hormigón es función de la porosidad, de la composición química de la solución de poros, y del grado de saturación de los mismos (Polder *et al.*, 2000), pero también, del tiempo disponible de curado del hormigón (Guzmán *et al.*, 2017a; 2017b). La medición de la resistividad mediante el método de las cuatro puntas (sonda de Wenner) es un ensayo no destructivo y simple de llevar a cabo. Diversas normativas contemplan la realización del ensayo de resistividad en hormigón (NBR 9204, 1985) y (UNE-83988-2, 2008), así como también, diversas organizaciones internacionales relacionadas con el estudio de materiales para la construcción (RILEM TC-154-EMC, 2000) y (DURAR, 2008).

1.2 Objetivos del trabajo

El presente trabajo se orienta hacia el estudio de la resistividad eléctrica de distintos hormigones para poder ser utilizado como parámetro de evaluación de la durabilidad de estructuras frente a problemas de corrosión. Por ello se proponen los siguientes objetivos:

- Evaluar la resistividad eléctrica en hormigones.
- Determinar la influencia de la relación a/c en la resistividad eléctrica.
- Establecer el tipo de cemento más apropiado en condiciones de posible corrosión del acero.
- Valorar el efecto del uso de un aditivo hidrófugo en la resistividad eléctrica.

1.3 Estado del Arte

La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y en consecuencia, de poder conducir las corrientes de corrosión, de ahí que la velocidad de corrosión en el acero del hormigón se ve afectada por su resistividad. Esta propiedad es única para cada material, y depende de la hidratación de la pasta cementicia, del tipo de cemento empleado, de la relación a/c y de la saturación de los poros, entre otros. Debido a lo antes dicho resulta de gran importancia el análisis de resistividad en los hormigones. Además, a través de la resistividad eléctrica del hormigón, se puede evaluar la conductividad eléctrica de los mismos, ya que una es la inversa de la otra.

Utilizando la sonda de Wenner, Morris *et al.* (1996) evaluó la resistividad eléctrica en probetas cilíndricas de hormigón de distintos diámetros. Su trabajo experimental permitió establecer el factor de forma a aplicar a fin de correlacionar la resistividad eléctrica medida en probetas, un medio de dimensiones finitas, con la resistividad eléctrica correspondiente al hormigón como material de dimensiones semi-infinitas.

Sengul y Gjørv (2008), estudiaron la resistividad eléctrica en hormigones para el control de calidad de los mismos, relacionando la resistividad eléctrica con la difusión del ion cloruro. La difusividad del cloruro puede controlarse indirectamente mediante mediciones de la resistividad eléctrica durante la construcción del hormigón. Utilizaron dos métodos de ensayo para obtener la resistividad eléctrica, el de la sonda de Wenner y el método de dos electrodos, concluyeron que la resistividad eléctrica obtenida varía de un método a otro. Para que el método Wenner sea un método de prueba confiable y conveniente, todas las mediciones se deben llevar a cabo en el mismo tipo de muestras y bajo las mismas condiciones, asegurando el aislamiento eléctrico de la muestra.

La importancia de la resistividad en el comportamiento durable de un hormigón, hizo que Andrade y D'Andrea (2011) establecieran una metodología para el diseño de cada uno de los componentes de la mezcla, a fin de conseguir un hormigón con una determinada resistividad eléctrica de diseño.

Layssi *et al.* (2015), utilizaron la resistividad eléctrica del concreto como una herramienta para el control de calidad y evaluación del rendimiento de los hormigones. Emplearon dos técnicas de evaluación, la técnica de sonda uniaxial y la técnica de la sonda de Wenner, concluyeron que ambos métodos proporcionan resultados consistentes si se utilizan los factores de geometría apropiados, y que el método de la sonda de Wenner es una mejor opción para la evaluación del hormigón en el sitio.

Otros autores (Madhavi *et al.*, 2016) estudiaron la conductividad eléctrica de ciertos hormigones para evaluar diversas características de los mismos. Midiendo la resistividad eléctrica en hormigones húmedos y secados en horno, concluyeron que el método de la sonda de Wenner es un método confiable para evaluar la resistividad en los hormigones. Presentaron los factores que afectan las mediciones de resistividad y las aplicaciones de la conductancia medida en la determinación de ciertos parámetros de hormigón.

1.4 El hormigón

El hormigón es un material poroso que confiere al acero una protección de doble naturaleza: por un lado, es una barrera física que lo separa del medio ambiente y por otro, el líquido encerrado en los poros del hormigón es un electrólito que puede formar un óxido protector (capa pasiva) de forma duradera, de ahí surge la importancia de conocer el proceso de hidratación de la pasta de cemento y las fases que componen la microestructura del hormigón una vez endurecido.

Las características y propiedades del hormigón dependen de sus materiales componentes y de las proporciones relativas de cada uno de ellos, allí aparece como propiedad principal la relación agua/cemento (*a/c*), donde la cantidad de agua adicionada en relación con el cemento pueden dar diversas características al material final obtenido, esta relación se encuentra íntimamente ligada a propiedades tales como plasticidad, trabajabilidad, durabilidad y resistencia, entre otras.

Así, por ejemplo, si adicionamos una cantidad mayor de agua a una mezcla obtendríamos hormigones de mayor fluidez, y por lo tanto de mayor trabajabilidad y plasticidad, pero si la cantidad de agua es excesiva o mayor a la adecuada, esto podría resultar en una pérdida de la resistencia final que adquiere el hormigón una vez endurecido y a una inadecuada durabilidad.

Debido a esto las reglamentaciones establecen relaciones de *a/c* máximas que se debe cumplir al diseñar hormigones. Cabe resaltar además que el curado cumple un papel fundamental en la resistencia final obtenida.

1.5 Composición mineralógica del clinker

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, cuando es amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua (UNE-EN 197-1, 2011).

El producto resultante de la molienda de calizas y arcillas calcinadas resulta en lo que se conoce como “clinker” y se convierte en cemento cuando se le agrega una pequeña cantidad de yeso, esto permite que adquiera la propiedad de fraguar al añadirle agua y endurecerse posteriormente.

Los principales compuestos del cemento y óxidos empleados para su fabricación así como sus proporciones se muestran en las tablas 1.1 y 1.2 respectivamente (Neville, 2010).

Tabla 1–1: Principales componentes del cemento Portland

Nombre del componente	Composición de Óxido	Nomenclatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_3$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Hierroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Tabla 1–2: Límites aproximados de composición del cemento Portland

Óxido	Porcentaje %
CaO	60 - 67
SiO ₂	17 - 25
Al ₂ O ₃	3 - 8
Fe ₂ O ₃	0,50 – 6,0
MgO	0,10 – 4,0
Alcalis	0,20 – 1,30
SO ₃	1,00 – 3,00

Tanto la composición final como la mineralógica del clinker están dadas no solo por la composición química y la granulométrica de la materia prima, sino también, por la temperatura de los hornos, el tiempo de permanencia en los mismos y la fase de enfriamiento.

El proceso de *clinkerización* se desarrolla en hornos cilíndricos rotativos de acero previa molienda de la materia prima (arcilla y caliza). En el interior del horno los gases calientes, producto de la combustión, van calentando la materia prima (harina cruda) hasta llegar a los 1450°C; en el horno se producen las principales reacciones que transforman a los minerales en *clinker*.

Las principales reacciones que ocurren dentro del horno son:

- 1.- Formación de C_2S , aluminatos y ferritas, entre 700 °C – 1250 °C
- 2.- Formación de la fase líquida, a más de 1250 °C
- 3.- Formación de C_3S , entre 1330 °C - 1450 °C.

La primera reacción que ocurre es la pérdida de agua de composición en la arcilla, entre los 500 y 600°C. La segunda transformación durante el calentamiento comienza a los 700°C y se completa a los 900 °C y corresponde a la descarbonatación de la piedra caliza; de esta reacción se obtiene CaO y se libera C_2O a la

atmosfera. El CaO formado es muy reactivo y comienza a combinarse con el Al_2O_3 , Fe_2O_3 y SiO_2 presentes en la harina cruda (Clariá *et al.*, 2016).

A 1300 °C los productos resultantes comienzan a fundirse formando una fase líquida que se completa aproximadamente a los 1400 °C. Por encima de los 1425 °C sólo se encuentra una pequeña cantidad de CaO (cal) no combinada con el clinker, a este exceso se le denomina “cal libre”.

Una vez que el clinker alcanza la temperatura de clinkerización, es necesario reducir la temperatura para fijar el C_3S y C_2S en sus formas más activas. Inmediatamente después del quemador, la temperatura baja a casi 1350 °C el grado de enfriamiento es muy importante en las estructuras finales del clinker, que a su vez impactan en las propiedades del cemento (Clariá *et al.*, 2016).

El clinker sale del horno a casi 1300 °C y se lo enfría rápidamente bajando su temperatura a casi 200 °C, esto se logra por medio de una corriente de aire que pasa a través del clinker en los enfriadores. Una vez enfriado es transportado para el acopio en silos u otros medios de contención.

La obtención del cemento se logra a partir de la molienda del clinker, yeso y adiciones; la materia prima se reduce a menos de 75 μm en molinos especiales.



Figura 1–1: Clinker y cemento como producto final.

Por otra parte es conocido el hecho que la industria de la construcción requiere un consumo elevado de materiales y energía, lo que genera grandes emisiones de gases, líquidos y sólidos contaminantes al medio ambiente.

La producción de cemento contribuye a la emisión de CO_2 a través de la combustión de combustibles fósiles, así como a través de la descarbonatación de la piedra caliza. El consumo de energía en la industria del cemento se estima en alrededor del 2% del consumo mundial de energía primaria, o casi el 5% del consumo total de energía industrial mundial (Worrell *et al.*, 2001).

Por ello, la contribución a la sustentabilidad del medio ambiente se logra a partir de una menor producción de clinker. Esto último se consigue reemplazando en los cementos cierta parte del clinker por adiciones ya sea de origen natural como artificial, lo que da lugar a los cementos adicionados.

Las adiciones más frecuentes que se agregan en reemplazo de cierta parte de clinker son escorias de alto horno, cenizas volantes, puzolanas naturales y filler calcáreo.

De acuerdo a estas adiciones los cementos reciben distintos nombres, como por ejemplo el de cemento pórtland fillerizado (CPF), o el de cemento portland puzolánico (CPP). Así mismo la Norma IRAM 50000 (2017) establece los requerimientos de composición, las características físicas, químicas y mecánicas, y las condiciones de control y recepción que deben cumplir los distintos tipos de cementos. En la Tabla 1-3 se presentan los cementos de uso general según Norma IRAM 50000 (2017).

Tabla 1-3: Tipos de cemento para uso general de acuerdo a la Norma IRAM 50000:2017.

Tipo de cemento	Nomenclatura
Cemento pórtland normal	CPN
Cemento portland con “filler” calcáreo	CPF
Cemento portland con escoria	CPE
Cemento portland compuesto	CPC
Cemento portland puzolánico	CPP
Cemento de alto horno	CAH

1.6 Uso de aditivos en hormigones

Con el objetivo de mejorar el comportamiento y las propiedades de los hormigones, sobre todo en lo que se refiere a resistencia y durabilidad, cada vez es más común el uso de componentes especiales de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, que se incorporan a los hormigones, como son los aditivos.

Existen fundamentalmente tres razones que justifican la utilización de uno o más aditivos: razones técnicas, económicas y especificaciones de obra (Balzamo *et al.*, 2016).

Actualmente hay diversos tipos de aditivos a emplear en la elaboración de hormigones y morteros, los mismos pueden estar en estado líquido o pulverulento, y tienen la función de modificar una o varias propiedades de la pasta fresca o endurecida. Los aditivos deben cumplir con los requisitos establecidos en la norma IRAM 1663 (2002), dicha norma define a los aditivos químicos como un material que, aparte del cemento, los agregados y el agua empleados normalmente en la preparación del hormigón, puede incorporarse durante o después de la preparación del pastón con el objeto de modificar alguna o varias de sus propiedades en la forma deseada.

La Norma IRAM 1663 clasifica a los aditivos como:

- a) Incorporador de aire
- b) Retardador de fraguado

- c) Acelerador de fraguado
- d) Acelerante de resistencia inicial
- e) Fluidificante
- f) Fluidificante e incorporador de aire
- g) Fluidificante y retardador de fraguado
- h) Fluidificante y acelerador de fraguado
- i) Superfluidificante
- j) Superfluidificante y retardador de fraguado

El reglamento CIRSOC 201 (2005), en su capítulo 3, artículo 3.4, hace mención de los requisitos generales que deben cumplir los aditivos para hormigones y morteros. Allí se hace referencia a cómo deben agregarse los aditivos a las mezclas.

Particularmente los aditivos hidrófugos se incorporan al agua de amasado de morteros para disminuir la absorción del agua en los hormigones endurecidos, eliminando los problemas de absorción capilar y permeabilidad, impidiendo además la aparición de eflorescencias superficiales.

CAPÍTULO 2

LA DURABILIDAD Y SU RELACIÓN CON LA CORROSIÓN

2.1 Durabilidad en el hormigón armado

La durabilidad en el hormigón puede definirse como la capacidad que tienen para resistir la acción del ambiente, los ataques físicos, químicos y/o biológicos, o cualquier otro proceso que tienda a deteriorarlos. El principal inconveniente es que no existe un método o normativa para medir en forma directa la durabilidad del hormigón.

Hay diversas patologías que pueden afectar la durabilidad del hormigón, como ser las acciones físicas, que pueden generar desde un desgaste superficial en los hormigones hasta la disgregación de los mismos (Figura 2-1, a); las acciones químicas, donde los agentes químicos externos atacan al hormigón generando daños desde el exterior hacia el interior de los mismos (Figura 2-1, b).

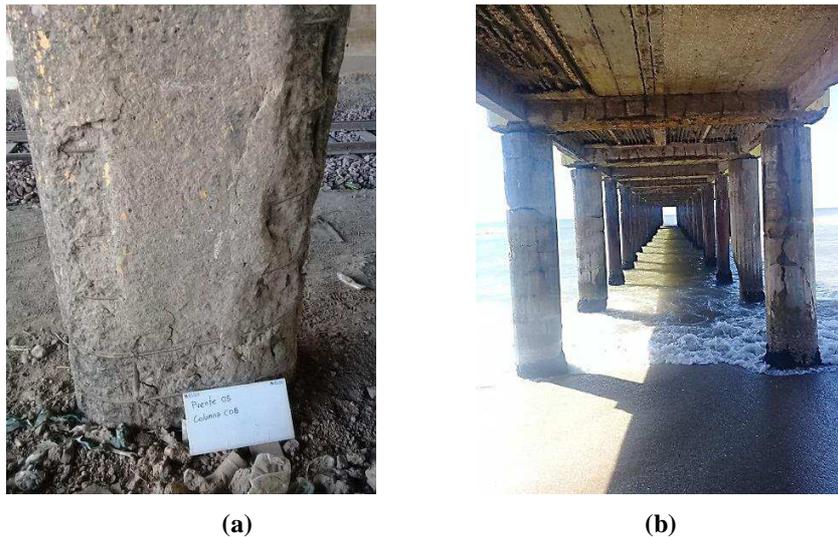


Figura 2–1: Patologías que afectan la durabilidad del hormigón. (a) Daños por ataques físicos. (b) Daños por ataques químicos y físicos.

Los reglamentos argentinos han regulado los contenidos de sustancias agresivas, razones de agua/cemento máximas, ancho de fisuras, tipos de cementos, entre las principales consideraciones en relación a la durabilidad, pero no siempre han asegurado resultados económicamente aceptables (Maldonado, 2016).

El reglamento Argentino CIRSOC 201 (2005), parte 2, capítulo 2, expresa los requisitos que deben cumplir los hormigones a utilizar en proyectos estructurales, siendo la durabilidad uno de ellos. En el artículo 2.2.1 expresa: “*se entiende por acciones del medio ambiente a aquellas de naturaleza química, física y/o físico-química que pueden provocar la degradación de la estructura por efectos diferentes a los*

de las cargas consideradas en el Proyecto o Diseño Estructural. Según sea la magnitud de dicha degradación y la velocidad con que se produce, la estructura puede perder, parcial o totalmente, la aptitud para cumplir la función para la cual fue construida”. Además hace referencia a que el diseño de las estructuras, la especificación del hormigón y sus materiales componentes deben tener en cuenta las acciones del medio ambiente, los procesos de degradación de los materiales a utilizar y la vida útil en servicio.

En este sentido es importante identificar el medio ambiente al que estará expuesta la estructura, el tipo de hormigón debe respetar los mínimos establecidos para la exposición correspondiente del elemento, de acuerdo con la tabla 2-1 (Tabla 2.5 del Reglamento CIRSOC 201:2005).

Tabla 2–1: Requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones, en función del tipo de exposición de la estructura (Tabla 2.5, CIRSOC 201:2005).

Requisitos	Tipos de exposición de las estructuras, de acuerdo con la clasificación de las Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4.									
	A 1	A 2	A 3 y M 1	C L y M 2	M 3	C 1 ⁽²⁾	C 2 ⁽²⁾	Q 1	Q 2	Q 3 ⁽³⁾
a) Razón a/c máxima ⁽¹⁾										
Hormigón simple	----	----	----	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
b) $f'_{c\ min}$ (MPa)										
Hormigón simple	----	----	----	30	35	30	35	30	35	40
Hormigón armado	20	25	30	35	40	30	35	30	35	40
Hormigón pretensado	25	30	35	40	45	30	35	35	40	45
Penetración de agua o succión capilar según 2.2.11.	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si
<p>(1) Cuando se use cemento pòrtland más una o varias adiciones minerales activas incorporadas directamente en planta elaboradora, se podrá reemplazar la razón agua/cemento (a/c), por la razón agua/ material cementicio [a/(c+x)], que tenga en cuenta la suma del cemento pòrtland (c) y la cantidad de la adición mineral (x), cuando se trate de puzolanas según norma IRAM 1668:1968 o de escorias según norma IRAM 1667:1990.</p> <p>(2) Debe incorporarse intencionalmente aire, en la cantidad requerida en la Tabla 5.3..</p> <p>(3) Cuando corresponda se debe proteger a la estructura según 2.2.5.2.c3 ó 2.2.10.3.</p>										

El reglamento CIRSOC 201 (2005) clasifica a los ambientes de exposición generales que produce corrosión en las armaduras, con las siguientes designaciones:

- A1: no agresiva;
- A2: ambiente normal;
- A3: clima cálido y húmedo;
- CL: húmedo o sumergido, con cloruros de origen diferente del medio marino;
- M1: marino, al aire;
- M2: marino, al aire y sumergidos;

- M3: marino, sumergidos;

También aparecen definidas otras clases específicas de exposición que pueden producir degradación en el hormigón pero distinta de la corrosión de armaduras.

Dentro de los mecanismos de degradación de las estructuras de hormigón armado, la corrosión de las armaduras resulta ser el problema más frecuente, de allí la importancia de contar con un método que nos permita, de un modo sencillo, determinar qué tan susceptible es una armadura de corroerse ante la acción de distintos agentes agresivos.

La necesidad de calcular la durabilidad del hormigón ha llevado a buscar un ensayo que fuera capaz de cuantificar todas las fases del proceso desde la fabricación del hormigón hasta su curado y endurecimiento. La resistividad eléctrica como inversa de la conductividad-difusividad es una propiedad del hormigón que permite su control de forma no destructiva. La resistividad es un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del hormigón y por ello del grado de curado y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el hormigón. Tiene una relación directa con la velocidad de corrosión al indicar el grado de humedad del hormigón. Por todo ello es un parámetro que permite relacionar al microestructura con el comportamiento durable del hormigón (Andrade *et al.*, 2011).

2.2 Corrosión en las armaduras

La corrosión de las armaduras embebidas en hormigón consiste en la oxidación destructiva del acero; la misma ocurre como resultado de la formación de una celda electroquímica en la cual el concreto húmedo es el electrolito en donde se genera una corriente eléctrica debido al flujo de iones en un medio acuoso.

La corrosión de armaduras es un problema frecuente en las estructuras de hormigón armado, éste fenómeno afecta la vida útil de las mismas, causando el deterioro de las estructuras y/o de sus partes componentes (figura 2-2), y como consecuencia fallas inesperadas en las mismas.

Las principales causas que inician una corrosión activa en las barras de acero embebidas en hormigón son la carbonatación y el ingreso de iones cloruro. De hecho las reglamentaciones actuales abordan los problemas de corrosión tratando de mitigar estas causas ya que tienen consecuencias económicas y sociales muy importantes, no sólo por la necesidad de destinar fondos para la reparación sino también que en muchas ocasiones se deben cerrar las instalaciones para los trabajos de reparación y rehabilitación, esto tiene mayor impacto en costosas estructuras de hormigón.

El hormigón actúa como un protector físico de las armaduras, pero si la calidad del mismo y la ejecución de las estructuras de hormigón armado no son los adecuados, esa protección se pierde rápidamente. En el caso de los recubrimientos, si no se ejecutan con los espesores adecuados, dejan al descubierto las

armaduras facilitando así el ataque del medio que las rodea. Respecto a los recubrimientos de las armaduras, el reglamento argentino CIRSOC 201 (2005), en su capítulo 7, artículo 7.7 se refiere a que el recubrimiento de hormigón para protección de la armadura frente a la acción del clima y otras acciones, se debe medir desde la superficie del hormigón hasta la superficie exterior de la armadura a la que se aplica el recubrimiento. Además se expresan los recubrimientos mínimos en mm para hormigones colocados en obra, no pretensados y pretensados y para hormigones prefabricados, todos ellos para clase de exposición ambiental A1 y A2 (tablas 7.7.1, 7.7.2 y 7.7.3 del CIRSOC 201-2005). Para las clases de exposición A3, Q1 y C1 los valores de recubrimientos mínimos dados en las mencionadas tablas se deben incrementar en un 30 % y para las clases CL, M1, M2, M3, C2, Q2 y Q3 en un 50 %.

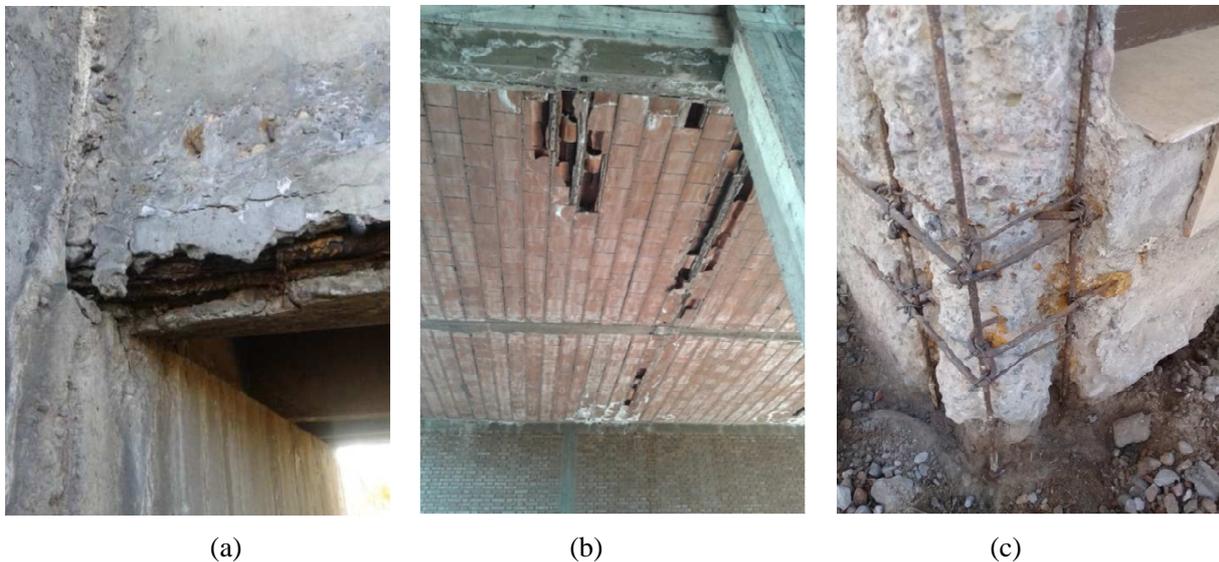


Figura 2–2: Corrosión en estructuras de hormigón armado. (a) Daños en viga de puente canal en San Martín, Mendoza. (b) corrosión en armadura de vigueta tipo SAP. (c) corrosión en columna de encuentro de muro exterior de vivienda.

2.2.1 Proceso de corrosión

El fenómeno de corrosión es un proceso electroquímico producido por el entorno donde se libera el hierro (Fe) del acero corroído el cual se disuelve en la solución circundante, apareciendo luego como ion ferroso (Fe^+). Para el acero embebido en hormigón, la disolución tiene lugar en el agua que se encuentra presente en los poros del hormigón que rodea al acero. Los iones ferrosos disueltos en las soluciones de poros del hormigón generalmente reaccionan con iones de hidróxido (OH^-) y moléculas de oxígeno disuelto (O_2) para formar una combinación de varios tipos de óxido, que es un subproducto sólido de la reacción de corrosión (Zhao, 2016).

En condiciones normales, el acero de refuerzo está protegido de la corrosión por una delgada película pasiva de óxido de hierro hidratado. Esta película pasiva se descompone debido a la reacción del hormigón con el dióxido de carbono atmosférico (CO₂, carbonatación) o por la penetración de sustancias agresivas al acero.

En la figura 2-3 se muestra el proceso de corrosión en una barra de acero, allí se forma una zona anódica y otra catódica. En el ánodo los iones ferrosos (Fe⁺⁺) se disuelven y los electrones se liberan (ver ecuación 2.1). Estos electrones se desplazan hacia el cátodo a través de la barra de acero donde forman hidróxido (OH⁻) con el agua que se encuentra en los poros del hormigón y el oxígeno disponible (ecuación 2.2), esto genera una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, la cual puede ser medida en la superficie del hormigón con los equipos adecuados.

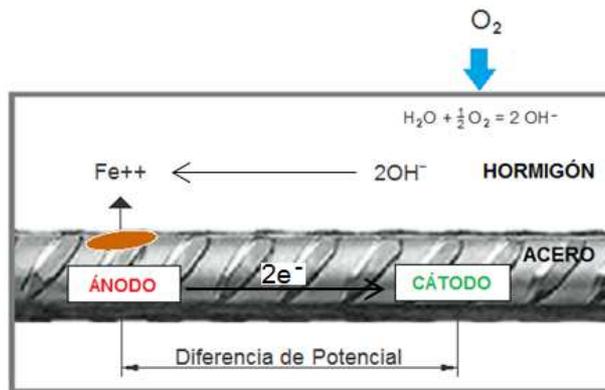
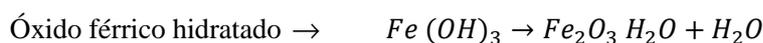
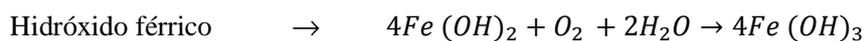


Figura 2-3: Proceso de corrosión en las armaduras



La ecuación 2.1 y 2.2 muestran la reacción anódica y catódica respectivamente, y sólo son el primer paso en el proceso de producción de la corrosión. Se originan varias etapas más para que se forme "óxido", y su aparición puede expresarse de varias maneras. Una forma típica es cuando el hidróxido ferroso se convierte en el hidróxido férrico y luego se convierte en el óxido férrico hidratado u óxido (Zhao, 2016).

A continuación se muestran estas reacciones:



Sin la presencia simultánea en el hormigón de oxígeno y humedad la corrosión no sería termodinámicamente posible.

Según el mecanismo de corrosión presente, puede tratarse de una corrosión generalizada del acero o de una corrosión localizada.

La corrosión generalizada se debe a la pérdida de la capa pasivadora o capa protectora de la barra de acero como consecuencia del fenómeno de carbonatación o lixiviación, o también debido a una excesiva presencia de ion cloruro.

El líquido encerrado en los poros del hormigón da lugar a la formación de un óxido protector (capa pasivadora) en la barra de acero que impide el ingreso de humedad y oxígeno a la misma evitando así la corrosión. Es importante remarcar que la modificación del pH es lo que afecta la capa pasivadora, es decir que la misma perdurará en tanto el pH del hormigón se mantenga elevado. En cuanto este pH baje, ya sea por carbonatación, lixiviación o elevada presencia de ion cloruro, la capa pasivadora se destruirá, avanzando así el proceso de corrosión generalizado el cual involucra una superficie extendida de la barra de acero.

La corrosión localizada, se debe a la disolución localizada de la capa pasivadora, generada por el ingreso de iones de cloruro al hormigón, provenientes del medio exterior, o incorporados a la masa de hormigón en su proceso de elaboración. En esa pequeña área, donde se concentra la presencia del ion cloruro, se produce ácido dando lugar a la destrucción de la capa pasivadora y conformándose así el ánodo. En este caso la zona anódica es más pequeña que la zona catódica, pero la velocidad de penetración de la corrosión en el área anódica es muy alta. En este sector se produce la disgregación del acero, profundizando así la zona de picadura y motivando una marcada pérdida de sección de la barra de acero.

Cuando la corrosión se sucede, los productos de la oxidación incrementan el volumen con respecto a la barra de acero en su condición inicial no oxidada, dando lugar a esfuerzos internos de tracción dentro del hormigón que no son capaces de ser resistidos, ocasionando así la fisuración del mismo.

2.2.2 Ingreso de Cloruros

Los cloruros pueden estar presentes desde el inicio en la mezcla del hormigón fresco ya sean disueltos en los agregados, en los aditivos o en el agua.

El ataque por cloruros al hormigón puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del hormigón (p.e., áridos contaminados, agua de mar o agua contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, la exposición a los ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, entre otros. (Aguirre *et al.*, 2013).

Los iones cloruros penetran el hormigón a través de la solución en la red de poros, y se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente

al reaccionar con el aluminato tricálcico (C_3A) presente en la pasta formando así cloroaluminatos cálcicos, mediante esta combinación los cloruros quedan fijados y resultan ser una amenaza para el proceso de corrosión del acero. Por tal motivo es recomendable la utilización de cementos con alto contenido de C_3A para hormigones expuestos a cloruros.

Los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo, donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo; el cloruro libre resulta perjudicial respecto a la durabilidad de las armaduras de acero dispuestas en el interior del hormigón. La matriz cementicia posee la capacidad de inmovilizar cierta proporción del cloruro que ingresa. La capacidad de inmovilización o retención de cloruro presenta una dependencia no lineal de la concentración total, influenciada principalmente por el grado de hidratación del cemento (Tang y Nilsson, 1993).

La movilidad de los iones cloruro dentro del hormigón está relacionada con su permeabilidad, por ello algunos factores importantes a tener en cuenta son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. La presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando igualmente la resistencia a la penetración de los cloruros en el hormigón (Aguirre *et al.*, 2013).

Otro de los factores que influyen en el contenido crítico de cloruros es la calidad de la interface hormigón/acero y el potencial electroquímico del acero de refuerzo, el cual está relacionado con la cantidad de oxígeno que puede alcanzar la superficie del acero.

Las normativas mundiales tratan el tema de corrosión inducida por el ataque de cloruros provenientes de distintos orígenes, así en la Norma Europea EN 206 se definen tres clases de exposición para corrosión inducida por cloruros de origen distinto al marino (XD1, XD2, XD3), y para la corrosión inducida por cloruros procedentes del agua de mar (XS1, XS2, XS3). El máximo contenido de cloruros de acuerdo con la norma UNE-EN 206 va de 0,2 a 0,4% de iones cloruros en relación a la masa de cemento para estructuras con acero reforzado y 0,1 al 0,2% para estructuras de hormigón pretensado. La norma ASTM C1202 permite evaluar la susceptibilidad del hormigón a los iones cloruros mediante un ensayo rápido de permeabilidad, aunque esta técnica es controvertida y se han desarrollado otros métodos continúa siendo utilizado con fines comparativos (Aguirre *et al.*, 2013).

En Argentina, el reglamento CIRSOC 201 (2005), en su capítulo 2, artículo 2.2.7, se refiere a los contenidos máximos de cloruros en el hormigón. Los cloruros solubles en agua en el hormigón endurecido, aportados por todos los materiales componentes, incluyendo los aditivos y eventualmente adiciones minerales, deben ser iguales o menores que los límites fijados en la Tabla 2.2 (tabla 2.6 del reglamento CIRSOC 201 (2005)).

Tabla 2–2: contenido máximo de ión cloruro (Cl⁻) en el hormigón endurecido (Tabla 2.6 CIRSOC 201 (2005)).

Hormigón	Condición de exposición en servicio	Contenidos máximos de ión cloruro (Cl ⁻) en el hormigón endurecido (IRAM 1857)
		% en masa del cemento
Sin armar	Cualquier condición	1,20
Armado, con curado normal	Medio ambiente con cloruros	0,15
	Medio ambiente sin cloruros	0,30
Armado, con curado a vapor	Cualquier condición	0,10
Pretensado	Cualquier condición	0,06

2.2.3 Carbonatación en el hormigón armado

Como ya se mencionó anteriormente, la pasividad del acero embebido en hormigón puede perderse por reacciones químicas que bajan el pH del medio que lo contiene, tal es el caso de la carbonatación. La carbonatación es un proceso químico donde la alcalinidad de un hormigón se ve afectada por los efectos de las reacciones causadas por atmósferas contaminadas con anhídrido carbónico (CO₂). Se trata de un caso especial de ataque ácido. Al ser el hormigón un material de naturaleza alcalina, los ácidos reaccionan con los hidróxidos (cálcico, sódico y potásico) para formar sales y agua. Cabe destacar la acción de los gases de carácter ácido como el CO₂, presente en ambientes urbanos e industriales. En este caso se pueden dar fenómenos de disolución y precipitación debido a la solubilidad de los bicarbonatos.

Las armaduras embebidas en hormigón recién puesto en obra están protegidas frente a riesgos de oxidación por el recubrimiento y por la presencia del hidróxido de calcio (CH) que precipita al hidratar los silicatos cálcicos del cemento (CSH) y de los álcalis propios del cemento. Para que la carbonatación tenga lugar es necesario que el dióxido de carbono entre en contacto con el agua y los componentes alcalinos presentes en los poros del hormigón. Al penetrar el CO₂ se produce entonces la reacción por la cual el hidróxido cálcico se transforma en carbonato disminuyendo la alcalinidad desde un pH de 12 ó 13 a un pH de valor 9 ó menor marcando dos zonas con pH muy diferentes. De esta manera, la alcalinidad ya no es suficiente para proteger la armadura comenzando la oxidación. El mecanismo de reacción es relativamente complejo e intervienen en él la cantidad de sodio y potasio presentes en el cemento (álcalis). La capacidad de fijación del CO₂ depende directamente de la cantidad de estos álcalis presentes en el hormigón.

La velocidad del proceso de carbonatación depende a su vez de la facilidad con que el CO_2 ingresa en el interior de los poros del hormigón. El avance de la carbonatación está en función de la humedad relativa del aire, de la proporción de CO_2 en el ambiente, y de la porosidad del hormigón.

El proceso de difusión del CO_2 no se producirá en hormigones que están totalmente saturados de agua y el CO_2 en hormigones totalmente secos no reacciona, es por ello que la humedad relativa ideal para propiciar el fenómeno está entre el 50 y el 70% (Aguirre *et al.*, 2013). Así, en el proceso de difusión, la humedad relativa del aire de los poros juega un papel importante. El coeficiente de difusión del CO_2 es 10.000 veces superior en el aire que en el agua, por tanto, si los poros están saturados de agua la penetración del gas es muy débil y la reacción es inexistente. Hormigones más permeables sufren una carbonatación más rápida.

La velocidad de avance de la carbonatación es un proceso lento, que se atenúa con el tiempo. Es fácilmente detectable a partir del ensayo con fenolftaleína.

Este método es el más utilizado para medir la carbonatación en el hormigón, en su relación con la prevención de la corrosión, consiste en el empleo de un indicador de pH obtenido a partir de una disolución al 1% de fenolftaleína en alcohol etílico. Al pulverizar la disolución sobre el hormigón, según el color que adquiera, se puede identificar si el pH en esa zona está por encima de 9, es decir, manteniendo la pasividad del acero o si, por el contrario, el pH se encuentra por debajo de 8 poniendo en riesgo al acero. Mediante este método se puede medir la profundidad de la zona de pH inferior a 8 denominada habitualmente “profundidad de carbonatación” (Galán García, 2011). Esta profundidad de carbonatación así como el proceso se esquematiza en la figura 2-4.

A los efectos de evitar estos procesos, es importante conseguir hormigones resistentes, compactos, poco permeables, manteniendo los recubrimientos mínimos adecuados para las armaduras.

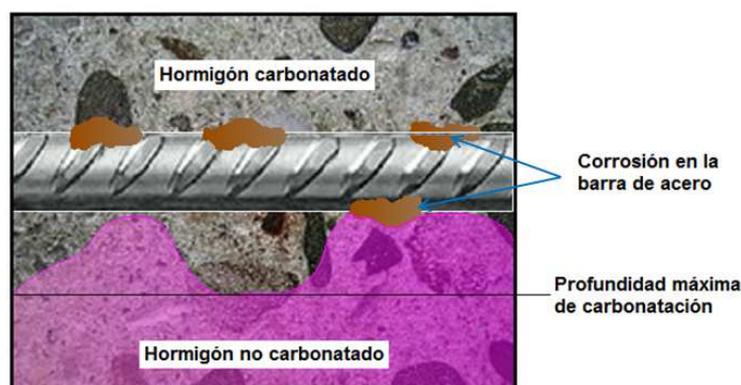


Figura 2-4: Proceso de carbonatación en el hormigón

CAPÍTULO 3

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

3.1 Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica del hormigón de una estructura se relaciona con la durabilidad de la misma respecto a la corrosión de las armaduras. Cuando el acero se encuentra despasivado, las zonas del recubrimiento con menor resistividad eléctrica resultan ser las zonas susceptibles de corroerse con mayor velocidad, es decir que, una vez que se destruye la pasividad del acero, ya sea por carbonatación, lixiviación de compuestos cálcicos o bien por penetración del ion cloruro, la velocidad a la cual se desarrolla el proceso de corrosión es controlada por la resistividad eléctrica del hormigón (la cual es función directa del contenido de humedad) y de la disponibilidad de oxígeno. La resistividad es una medida de la capacidad del hormigón de actuar como electrolito y en consecuencia, de poder conducir las corrientes de corrosión. La resistividad en el hormigón adquiere importancia al momento de implementar un sistema electroquímico de protección de las armaduras, o de reparar una estructura afectada por corrosión

La resistividad eléctrica es una propiedad que presenta un material para oponerse a la conducción de la corriente eléctrica a través del mismo. La Ley de Ohm establece que la intensidad I de la corriente eléctrica que circula por un conductor eléctrico es directamente proporcional a la diferencia de potencial V aplicada e inversamente proporcional a la resistencia R del mismo, la que puede expresarse según la siguiente ecuación:

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.1)$$

donde I es la intensidad de corriente medida en amper [A], V la diferencia de potencial medida en volt [V], y R la resistencia eléctrica medida en ohm [Ω .m].

Se llama resistividad al 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 es. 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:

$$\rho = R * \frac{A}{L} \quad (3.2)$$

siendo ρ la resistividad eléctrica medida en [Ω .m], A es el área de la sección transversal del material [m^2] y L la longitud del material [m]. En la Figura 3-1 se presenta un esquema representativo de la medición de la resistividad.

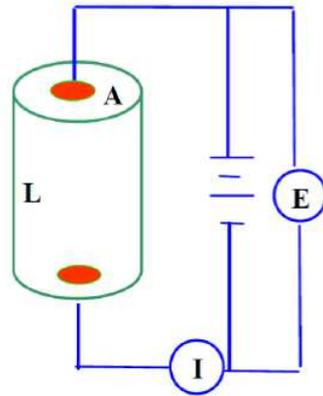


Figura 3-1: Esquema representativo para la medición de resistividad eléctrica.

3.2 Medición mediante la sonda de Wenner

Para medir la resistividad de estructuras existentes, así como en probetas de laboratorio, es común emplear como técnica la sonda de cuatro puntas de Wenner (Polder *et al.*, 2000). Esta técnica ha adquirido gran popularidad en el mundo ya que permite evaluar el índice de corrosión en las armaduras de un modo práctico. En la Figura 3-2 (a) se muestra la sonda utilizada en el ensayo.

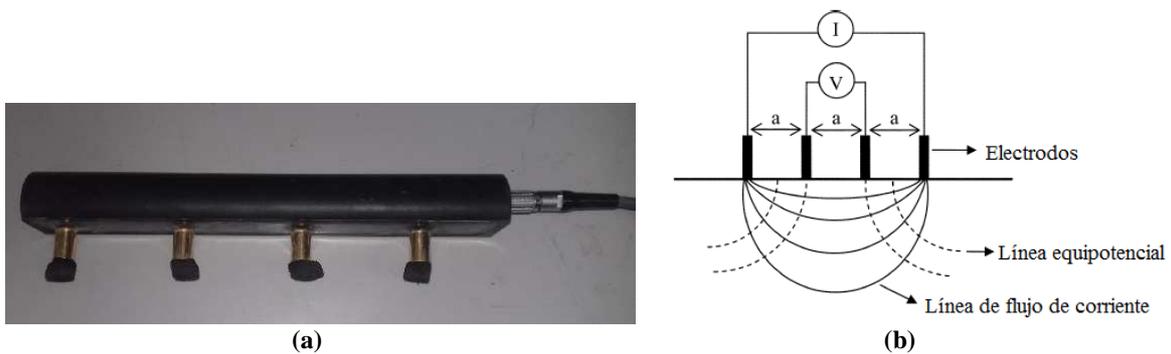


Figura 3-2: (a) Sonda de Wenner utilizada para la medición de resistividad eléctrica. (b) Representación esquemática de los cuatro electrodos del ensayo de resistividad (modificada de Sengul y Gjörv, 2008)

Sobre la superficie a medir se colocan los electrodos en línea separados una distancia “a” entre sí (50 mm en este caso), se aplica una corriente alterna a través de los electrodos extremos y la caída de potencial resultante se mide con los electrodos internos. En la Figura 3-2 (b) se presenta el esquema de medición mediante la sonda de Wenner, donde la resistividad de Wenner medida resulta:

$$\rho_w = 2 * \pi * a * \frac{V}{I} \quad (3.3)$$

Si bien con esta ecuación se obtiene la resistividad de Wenner, se debe tener en cuenta que por ser la probeta un medio finito, debe considerarse un factor de forma (Ff) (Morris *et al.*, 1996), el cual tiene en cuenta las dimensiones de la probeta, y de ese modo poder determinar la resistividad eléctrica de la probeta (ρ_p), al respecto se habla con más detalle en el capítulo 4, punto 4.1.

3.3 Hormigones en estudio

En el presente estudio se propusieron dieciséis tipos de hormigones a evaluar, los cuales fueron identificados como pastonadas P-05, P-06, P-07, P-08, P-05-H, P-06-H, P-07-H, P-08-H, F-05, F-06, F-07, F-08, F-05-H, F-06-H, F-07-H y F-08-H. La primer sigla identifica el tipo de cemento utilizado, los números siguientes la relación a/c, y la última sigla de corresponder, la presencia de aditivo hidrófugo.

Estos hormigones fueron dosificados en peso, siendo la relación entre los distintos componentes de una parte de cemento, dos partes de agregado fino, y tres partes de agregado grueso (1C:2AF:3AG).

Se confeccionaron tres probetas cilíndricas normalizadas de 100 mm x 200 mm por cada una de las pastonadas propuestas. Dichas probetas fueron curadas mediante inmersión durante 27 días corridos, luego de ser desmoldadas pasadas 24 hs desde su elaboración.

El cemento utilizado fue portland puzolánico (P) CPP-40 (IRAM 1534, 2004) para las pastonadas P-0x, y portland fillerizado (F) CPF-40 (IRAM 1534, 2004) para las pastonadas F-0x. Además se realizaron pastonadas con los mismos tipos de cementos pero adicionando aditivo hidrófugo (H), el mismo se incorporó al agua de amasado en una proporción de una parte de aditivo en nueve partes de agua, estas pastonadas fueron designadas como P-0x-H y F-0x-H.

En tanto que se utilizaron agregados rodados locales de origen natural con un tamaño máximo de 19 mm.

En la Tabla 3.1 se indican algunas características de dichas pastonadas.

Tabla 3–1: Designación de las pastonadas de estudio. Proporción de materiales en peso.

Designación	Relación a/c	Tipo de cemento	Tipo de aditivo	Cemento [C]	Agua [a]	Arena [AF]	Ripio [AG]	Aditivo [H]
P-05	0.5	CPP-40	-	1	0.50	2	3	-
P-06	0.6				0.60			-
P-07	0.7				0.70			-
P-08	0.8				0.80			-
P-05-H	0.5		hidrófugo		0.45			0.05
P-06-H	0.6				0.54			0.06
P-07-H	0.7				0.63			0.07

Tabla 3–2 (continuación): Designación de las pastonadas de estudio. Proporción de materiales en peso.

Designación	Relación a/c	Tipo de cemento	Tipo de aditivo	Cemento [C]	Agua [a]	Arena [AF]	Ripio [AG]	Aditivo [H]
P-08-H	0.8	CPP-40	hidrófugo	1	0.72	2	3	0.08
F-05	0.5	CPF-40 fillerizado	-		0.50			-
F-06	0.6				0.60			-
F-07	0.7				0.70			-
F-08	0.8				0.80			-
F-05-H	0.5		hidrófugo		0.45			0.05
F-06-H	0.6				0.54			0.06
F-07-H	0.7				0.63			0.07
F-08-H	0.8				0.72			0.08

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Mediciones realizadas

La medición de la resistividad eléctrica del hormigón resulta sensible frente al contenido de humedad del hormigón. A fin de garantizar una adecuada medición y al mismo tiempo iguales condiciones iniciales para cada pastonada en estudio, se procedió previo a la medición, a dejar durante 72 horas a las probetas sumergidas en agua, logrando de ese modo la saturación de las mismas. Luego las probetas fueron retiradas procediendo inmediatamente a la medición.

Las mediciones de resistividad eléctrica (Figura 4-1) fueron llevadas a cabo sobre cada grupo constituido por tres probetas y correspondiente a cada una de las pastonadas confeccionadas. El valor de resistividad para cada pastonada corresponde al promedio de las mediciones obtenidas en cada grupo.

A partir de la medición directa con el equipo CANIN (Canin+, 2012), se obtiene la resistividad eléctrica de Wenner (ρ_w), pero por tratarse la probeta de un medio finito, debe considerarse un factor de forma (Ff) el cual se obtiene de la Norma UNE (UNE-83988-2, 2008), el que a su vez fue adoptado del trabajo de Morris *et al.* (1996).

Este factor tiene en cuenta las dimensiones de la probeta, y de ese modo se puede determinar la resistividad eléctrica de la probeta (ρ_p) de acuerdo a la ecuación 4.1. Para las dimensiones de probetas utilizadas, el factor de forma resultó ser de 0,377.

$$\rho_p = \rho_w * Ff \quad (4.1)$$



Figura 4-1: Medición de resistividad eléctrica en probetas cilíndricas.

En la Tabla 4-1 se presentan los promedios de resistividad obtenidos de la medición en cada una de las tres probetas correspondientes a cada pastonada evaluada, dichos valores han sido graficados en la Figura 4-2.

Tabla 4-1: Resistividad eléctrica promedio evaluada en pastonadas con 27 días de curado.

Designación	Resistividad eléctrica de Wenner ρ_w [k Ω .cm]	Resistividad eléctrica de probeta ρ_p [k Ω .cm]
P-05	27.3	10.3
P-06	22.0	8.3
P-07	17.3	6.5
P-08	14.8	5.6
P-05-H	22.5	8.5
P-06-H	18.2	6.8
P-07-H	16.8	6.3
P-08-H	13.3	5.0
F-05	19.2	7.2
F-06	14.7	5.5
F-07	12.2	4.6
F-08	10.7	4.0
F-05-H	19.2	7.2
F-06-H	16.2	6.1
F-07-H	11.8	4.5
F-08-H	8.8	3.3

4.2 Resultados obtenidos

De los resultados experimentales obtenidos se observó la dependencia de la resistividad eléctrica con la relación a/c, el tipo de cemento, y con la incorporación del aditivo hidrófugo (Figura 4-2).

Al respecto, la resistividad eléctrica aumentó al disminuir la relación a/c, pero también la resistividad tuvo un mejor desempeño al utilizar cemento puzolánico en lugar de fillerizado. En tanto que el uso del aditivo hidrófugo tuvo un efecto contraproducente en la resistividad, obteniendo menores resultados que cuando no se utilizó el aditivo.

Las pruebas empíricas han producido los siguientes valores de umbral (Canin+, 2012) para la resistividad eléctrica. Estos valores son utilizados para determinar la probabilidad de corrosión de las armaduras: i) Si

$\rho_p \geq 12 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ no es probable que exista corrosión; ii) Si $8 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} < \rho_p < 12 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ es posible que exista corrosión; y iii) Si $\rho_p \leq 8 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ es muy probable que exista corrosión. En ninguno de los casos de estudio se logró alcanzar el umbral donde no es probable que exista el desarrollo de un proceso corrosivo. Las pastonadas más adecuadas en cuanto a los valores de resistividad eléctrica obtenidos, resultaron ser la confeccionadas con cemento puzolánico y sin aditivo hidrófugo (P-0x).

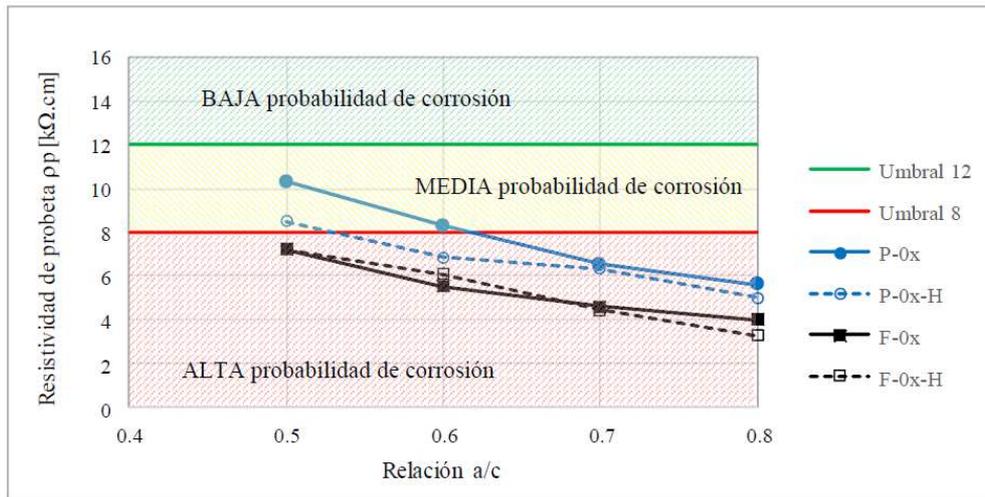


Figura 4-2: Resistividades eléctricas obtenidas para las distintas pastonadas de estudio.

Por otra parte, se procedió a una extrapolación hacia atrás a partir de los resultados disponibles para las pastonadas P-0x (Figura 4-3), lo cual permitió inferir el límite máximo para la relación a/c por debajo del cual se lograrían hormigones con resistividades eléctricas conducentes a una baja probabilidad de ocurrencia de corrosión. Este límite máximo inferido resultó ser de aproximadamente 0,45.

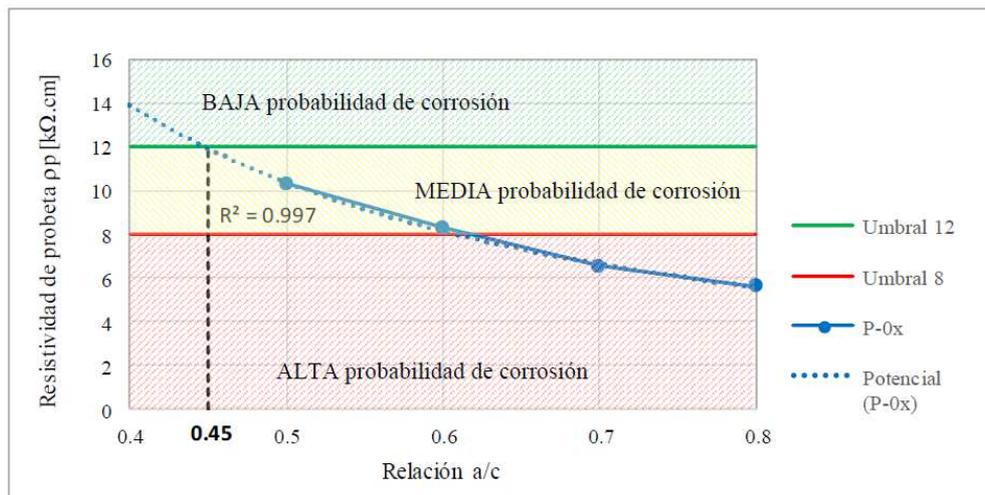


Figura 4-3: Inferencia del límite máximo de la relación a/c para pastonadas P-0x.

Este último límite inferido, se encuentra en el orden de los valores máximos indicados por los reglamentos (CIRSOC 201, 2005) para hormigón armado y pretensado, como uno de los requisitos de durabilidad a ser tenidos en cuenta para las condiciones de exposición más severas y altamente propicias para el desarrollo de corrosión en las armaduras (Figura 4-4).

Requisitos	Tipos de exposición de las estructuras, de acuerdo con la clasificación de las Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4.									
	A 1	A 2	A 3 y M 1	C L y M 2	M 3	C 1 ⁽²⁾	C 2 ⁽²⁾	Q 1	Q 2	Q 3 ⁽³⁾
a) Razón a/c máxima ⁽¹⁾										
Hormigón simple	----	----	----	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40

Figura 4-4: Requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones. Parte de Tabla 2.5 extraída de CIRSOC 201 (2005).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

Para las relaciones a/c utilizadas, se pudo establecer que las mismas incidieron en los valores medidos de las resistividades eléctricas. Una mayor relación a/c resulta en una menor resistividad eléctrica del hormigón.

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

La limitación a la máxima relación a/c inferida para resistir el fenómeno de corrosión fundamentada está 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, se observó que las pastonadas elaboradas con cemento puzolánico tuvieron un mejor desempeño que las elaboradas con cemento fillerizado. Esto puede deberse a que las puzolanas, a diferencia del filler, dan lugar a la formación de gel de cemento y con ello a una matriz menos permeable. Por ello, en condiciones ambientales propicias para el desarrollo del fenómeno de corrosión, resultaría recomendable la utilización de cementos puzolánicos.

La utilización del aditivo hidrófugo en general tuvo un efecto contraproducente en los valores de resistividad, en la mayoría de los casos evaluados, la incorporación de aditivo dio lugar a una menor resistividad eléctrica con respecto a las pastonadas efectuadas sin hidrófugo.

Por último, la evaluación de la resistividad eléctrica resulta ser una metodología de ensayo simple y expeditivo, permitiendo la valoración de una propiedad de suma importancia para la interpretación de la durabilidad del hormigón armado y/o pretensado.

CAPÍTULO 6

REFERENCIAS

- Aguirre A. M., Mejía de Gutiérrez R. (2013). “*Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas*”. Materiales de Construcción. Vol. 63, 309, 7-38.
- Andrade C., D’Andrea 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 (ALCONPAT). Vol 1, Número 2, Pp. 93 – 101.
- ASTM-C1202 (2010). “*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration*”. ASTM Standards.
- Balzamo, H, Checmarew, R. L. (2016). “*Aditivos químicos. Cap. 6 de Ese Material llamado Hormigón*”. Maldonado, N.G., Carrasco M.F. (Eds.). Pp. 167-169.
- Canin+ (2012). “*Operating Instructions, Corrosion Analyzing Instrument*”. PROCEQ, Switzerland, Suiza.
- CIRSOC 201 (2005). “*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*”, Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, INTI, Buenos Aires, Argentina.
- Clariá, M.A., Irassar, E.F., López, R., Bonavetti, V. (2016). “*Cementos. Cap. 2 de Ese Material llamado Hormigón*”. Maldonado, N.G., Carrasco M.F. (Eds.). Pp. 32-36.
- D’Andréa, R. (2010). “*Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica*”. Tesis Doctoral – Universidad Politecnica de Madrid.
- Dal Molin, D. (1988). “*Fisuras 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, A., Sota, J., Traversa, L. (1999). “*Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años*”. Proc. III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad. La Habana, Cuba.
- DURAR (2008). “*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado*”. CYTED. Córdoba, Argentina.
- Galán García, I. (2011). “*Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*”. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas. Tesis Doctoral. Pp 5.
- Guzmán M., Maldonado G., Giolo E., (2017a). “*Efecto de la relación agua/cemento y del tipo de cemento en la resistividad eléctrica de hormigones*”. Noveno Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería EnIDI 2017, Ciudad, Mendoza, Argentina.

Guzmán, M., Maldonado, N., Lanzilotta, J., Patane, E., Cardone, M., Furlan, L. (2017b). “*Estudio de la resistividad eléctrica del hormigón y su dependencia con la relación a/c y el tiempo de maduración en clima semiárido*”. Anais do 59º Congresso Brasileiro do Concreto CBC2017.

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 1663:2002. Hormigones de cemento. Aditivos químicos.

IRAM 50000:2017. Cemento para uso general. Buenos Aires, Argentina, IRAM.

Layssi H, Ghods P., Alizadeh A.R, and Salehi M. (2015). “*Electrical Resistivity of Concrete*”. *Ci Concrete International*. V. 37, pp. 41-46.

Madhavi, T.Ch. and Annamalai, S. (2016). “*Electrical conductivity of concrete*”. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. Asian Research Publishing Network (ARPN).Vol. 11 – Nº 9.

Maldonado, N. G. (2016). “*Diseño y dosificación del hormigón. Cap. 7 de Ese Material llamado Hormigón*”. Maldonado, N.G., Carrasco M.F. (Eds.). Pp. 197-198.

Morris W., Moreno E., Sagüés A., (1996). “*Practical evaluation of resistivity of concrete in test cylinders using a Wenner array probe*”. *Cement and Concrete Research*, 26, 1179-1787.

Neville, A.M., Brooks, J.J. (2010) “*Concrete Technology*”. 2nd ed. Pearson Education Limited. Pp. 10-12.

NBR 9204 (1985). “*Concreto Endurecido - Determinacao Da Resistividade Eletrica*”-Volumetrica. Rio de Janeiro, Brazil.

Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, O., Gulikers, J., Weidert, R., Raupach, M. (2000). “*Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete*”. RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials and Structure*, Vol 33, pp. 603-611.

RILEM TC-154-EMC, (2000). “*Electrochemical Techniques for Measuring Corrosion in Concrete. Materials and Structures*”. Vol. 33, 603-611.

Sengul, O. and GjØrv, Odd E. (2008). “*Electrical Resistivity Measurements for Quality Control During Concrete Construction*”. *ACI Materials Journal*. Technical Paper. Title nº 105-M61.

Tang L., Nilsson L. O., (1993). “*Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars*”. *Cement and Concrete Research*, Vol. 23, pp 247-253.

Traversa, L. P. (2016). “*Introducción. Cap. 1 de Ese Material llamado Hormigón*”. Maldonado, N.G., Carrasco M.F. (Eds.). Pp. 1-3.

UNE-83988-2 (2008). “*Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica*”. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Madrid, España.

UNE-EN 206-1:2000. “*Hormigón - Parte 1: Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad*”. Norma Europea CEN.

UNE-EN 197-1:2011. “*Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes*”. Norma Europea.

Worrell E. , Price L., Martin N., Hendriks C., Ozawa Meida L. (2001). “*Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry*”. Annual Review of Energy and the Environment. Vol. 26, Pp. 303-329.

Zhao, Y., Jin W. (2016). “*Steel Corrosion in Concrete*”. Cap.2 de “*Steel Corrosion-Induced Concrete Cracking*”.Book Aid International and Elsevier (Eds.). Pp 19-20.

<https://es.wikipedia.org/wiki/Concreto>.

