



DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN ARMADO

La resistividad eléctrica como indicador de durabilidad

Autora: D^a. María del Carmen Picos Pérez

Tutores: D. Guillermo C. Alonso Carro

D. José Manuel Álvarez Ilarri





Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica

Grado en Arquitectura Técnica

Curso 2013-2014

Trabajo de fin de grado

Durabilidad en el hormigón armado

La resistividad eléctrica como indicador de durabilidad

Autora

D^a. María del Carmen Picos Pérez

Tutores del trabajo

D. Guillermo C. Alonso Carro

D. José Manuel Álvarez Ilarri

*"Las personas no eligen sus carreras,
sino que son engullidas por ellas"*

(John Dos Passos)

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar las gracias a los miembros de Control y Estudios:

A D. Gonzalo Guzmán por haberme dado la oportunidad de realizar la parte experimental de este proyecto en el laboratorio de CyE, por haber dedicado parte de su valioso tiempo a estudiar el planteamiento y desarrollo de los ensayos y por proporcionarme los materiales y medios necesarios para la realización de este estudio.

A D^a. Mar Rodríguez por su paciencia y por haberme prestado su ayuda resolviéndome todas las dudas que se me plantearon.

A D. Andrés Rodríguez, D. Andrés Fernández y D. Luis Breijo por haberme dedicado tantas horas y haber amenizado ese tiempo con tan buen humor.

En general a todo el equipo de CyE, pues han sido todos muy amables conmigo y me han ayudado en todo lo que han podido.

En segundo lugar, a D. José Millán de Galaicontrol por haberme proporcionado las primeras ideas para realizar este proyecto y por su disposición a colaborar en el desarrollo de este trabajo.

En tercer lugar, a mis tutores por su apoyo y dedicación.

Y por último, a mi familia, pareja y amigos por toda su paciencia, apoyo y cariño durante esta etapa de mi vida.

RESUMEN

La lucha contra la corrosión en las estructuras de hormigón armado hace necesaria la predicción de su vida útil y la mejora de las metodologías empleadas para dicho fin. Se ha buscado un ensayo que cuantifique todas las fases del proceso, desde la fabricación del hormigón hasta su curado y endurecimiento. La resistividad eléctrica, como inversa de la conductividad-difusividad, nos da información sobre su microestructura, su porosidad y su contenido de agua, y con ello se tiene un control completo de las etapas por las que pasa el material. Esta medida puede valorar aspectos del hormigón como: el endurecimiento en estado fresco, el grado de curado, el grado de saturación, la resistencia mecánica, la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas y la velocidad de corrosión de la armadura. Al ser un ensayo no destructivo se puede repetir las veces necesarias sin perturbar el material. Por todo ello, es muy interesante estudiar su utilización como indicador de durabilidad, ya que nos puede dar una valoración de la calidad del hormigón en todos sus aspectos.

Renata D'Andrea y Carmen Andrade (2010) estudiaron una metodología de diseño y control de calidad basada en el uso de la resistividad eléctrica del hormigón como indicador de corrosión. Esta metodología permitirá asegurar el diseño de un hormigón para una durabilidad pre-definida en proyecto mediante la utilización de parámetros de resistividad eléctrica verificando experimentalmente si la mezcla alcanzará la vida útil esperada para poder rediseñarla hasta conseguir el objetivo fijado.

En este trabajo se plantean todas las posibilidades que ofrece la resistividad eléctrica como parámetro de control de calidad del hormigón, cómo se realizan las mediciones de resistividad y las normativas referentes a ello. Se estudia cómo se ve afectada la resistividad eléctrica del hormigón en función de distintas variables, como la temperatura, la cantidad de cemento y la relación agua-cemento, y se comparan los resultados de las mediciones de resistividad con los resultados de profundidad de penetración de agua a presión y de resistencia a compresión. Para finalizar se aplica el método propuesto por *D'Andrea y Andrade (2010)*, antes descrito, para la predicción de la durabilidad y se comparan hormigones con distintas relaciones a/c para ver cómo se ve afectada la durabilidad en función de esta variable.

ABSTRACT

Fighting against corrosion in reinforced concrete structures makes necessary the prediction of its service life and the improvement of the used methods for that job. An essay has been search in order to quantify the different times in the process, since the concrete making until the curing and hardening. The electrical resistivity, as reverse process to the conductivity-diffusion, gives information about its microstructure, its porosity and its water content, with all this a full control of the different times in the process is obtain. This measure can determinate concrete´s aspects such as: the hardening, the curing grade, the saturation degree, the mechanical resistance, the resistance to aggressive substances and the reinforcement corrosion speed. As long as it is a non-destructive essay it is possible to repeat it as many times as needed without damaging the material. For all mentioned above, it is very important to study its application as a durability indicator, since it can provide an accurate valuation of the concretes quality in all its aspects.

Renata D'Andrea and Carmen Andrade (2010) studied a design methodology and a quality control based in the electrical resistivity use as an indicator of the corrosion. This methodology allows to secure the design of the concrete with a pre-stated durability in the project trough the use of electric resistivity parameters, experimentally verifying if the mixture will reach the useful life wished in order to be in the position of re-designing it until the goal is reached.

In this Project all the possibilities that the electrical resistivity offers are exposed as a control parameter of the concrete quality, and so are the ways that the resistivity measure is made. The rules about all this are also exposed. The manner in which the concretes electrical resistivity is affected by the different variables such as the temperature, the amount of cement and the water/cement proportion, is studied and the results of the resistivity measurements are compared to: the results of the high-pressure water penetration depth and to the compressive strength. In order to conclude, the previously mentioned method to predict the durability, proposed by *D'Andrea and Andrade (2010)*, is applied, and concretes with different water/cement ratio are compared in order to study how the durability is affected in relation to this variable.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN Y ESTADO DEL ARTE.	1
2. EL HORMIGÓN. COMPOSICIÓN.	5
2.1. PROCESO DE HIDRATACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO.	5
2.2. MICROESTRUCTURA DE LA PASTA ENDURECIDA.	8
2.2.1. Fase sólida.	8
2.2.2. Porosidad.	9
2.2.3. Fase acuosa.	11
3. DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN ARMADO.	13
3.1. DISTINTAS PATOLOGÍAS QUE AFECTAN A LA DURABILIDAD EN EL HORMIGÓN ARMADO. 13	
3.1.1. Daños por acciones físicas.	13
a. Hielo-deshielo.	13
b. Daños provocados por el agua a alta velocidad.	13
c. Abrasión por sólidos.	14
3.1.2. Daños por acciones de tipo químico.	14
a. Ataque por aniones y cationes.	15
b. Ataque por ácidos.	17
c. Ataque por aguas puras.	17
d. Reacción álcali-árido.	17
3.2. CORROSIÓN DEL ACERO EN EL HORMIGÓN ARMADO.	18
3.2.1. Ingreso de los cloruros en el hormigón armado.	19
3.2.2. La carbonatación en el hormigón armado.	20
3.2.3. Combinación de carbonatación e iones cloruro.	22
3.2.4. Factores acelerantes de la corrosión. Influencia de las variables climáticas en el proceso de corrosión.	23
3.2.5. Factores retardadores de la corrosión de las armaduras.	25
3.2.6. Mecanismos de transporte del agresivo en el hormigón.	25
3.2.6.1. Determinación de la capacidad del medio para la difusión.	26
3.2.7. Medida de la velocidad de corrosión.	29
3.2.7.1. Técnicas tradicionales.	29
3.2.7.2. Técnicas electroquímicas.	30
4. TRATAMIENTO DE LA NORMATIVA SOBRE LA DURABILIDAD.	31
4.1. EHE.	31

4.2. ACI.....	33
4.3. EUROCÓDIGO.....	34

5. EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN ARMADO.

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....36

5.1. INDICADORES DE CORROSIÓN. DEFINICIÓN.	36
5.2. ENSAYOS DE INFORMACIÓN.	36
5.2.1. Resistencia a compresión.	38
5.2.2. Profundidad de penetración al agua bajo presión.	39
5.2.3. Porosidad.	39
5.2.4. Permeabilidad al O ₂	40
5.2.5. Coeficiente de absorción capilar.	40
5.2.6. Avance del fenómeno de la carbonatación.....	40
5.2.7. Avance de los iones cloruros.	41
5.3. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMO INDICADOR DE CORROSIÓN.	41
5.3.1. Definición de resistividad eléctrica de un material.	41
5.3.2. Mecanismos de conducción de la corriente eléctrica en los materiales.	42
5.3.2.1. La conducción electrónica.	42
5.3.2.2. La conducción electrolítica.	43
5.3.2.3. La conducción dieléctrica.	43
5.3.3. Mecanismos de conducción de la corriente eléctrica en el hormigón.	43
5.3.3.1. Teorías de la resistividad.	44
5.3.4. Medida de la resistividad.	46
5.3.4.1. Método directo o método de referencia. [UNE 83988-1].....	46
5.3.4.2. Método de las cuatro puntas o de Wenner. [UNE 83988-2].....	48
5.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS DEL HORMIGÓN.	50
5.4.1. Influencia de los componentes del hormigón.	50
5.4.1.1. El cemento.....	50
5.4.1.2. Los áridos.	51
5.4.1.3. La relación agua-cemento.....	52
5.4.1.4. La porosidad.	53
5.4.1.5. El grado de saturación.....	53
5.4.1.6. Los iones cloruro.	54
5.4.2. Influencia de las adiciones en el hormigón.	54
5.4.2.1. Cenizas volantes.....	54
5.4.2.2. Humo de sílice.....	54

5.4.3.	<i>Influencia de los factores externos.....</i>	55
5.4.3.1.	<i>Humedad de la superficie.</i>	55
5.4.3.2.	<i>Temperatura.</i>	55
5.4.4.	<i>Influencia del deterioro del hormigón.</i>	56
5.4.4.1.	<i>La carbonatación.</i>	56
5.4.4.2.	<i>La reacción álcali-árido.....</i>	57
5.4.4.3.	<i>La fisuración y la delaminación.....</i>	57
5.4.5.	<i>Variación de la resistividad con el tiempo.....</i>	58
5.4.6.	<i>Relación frente al mecanismo de transporte difusivo del agresivo... 58</i>	
5.4.7.	<i>Relación frente a la corrosión activa.....</i>	59
5.5.	MOTIVOS PARA LA ELECCIÓN DE LA MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA COMO INDICADOR DE CORROSIÓN.....	60
 6. PREDICCIÓN DE LA DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO.		62
6.1.	MODELO DE CÁLCULO DE DURABILIDAD PARA LOS PROCESOS DE CORROSIÓN SEGÚN EHE-08.....	62
6.1.1.	<i>Cálculo del período de iniciación.</i>	62
6.1.1.1.	<i>Modelo de carbonatación.</i>	62
6.1.1.2.	<i>Modelo de penetración de cloruros.....</i>	64
6.1.2.	<i>Cálculo del período de propagación.</i>	66
6.1.3.	<i>Estimación de vida útil debida a la corrosión de las armaduras.</i>	67
6.2.	MODELO BASADO EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	67
6.2.1.	<i>Cálculo del período de iniciación.</i>	68
6.2.2.	<i>Cálculo del período de propagación.</i>	70
6.2.3.	<i>Diseño del hormigón para alcanzar una determinada resistividad. ..</i>	71
 7. PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.		75
7.1.	VARIABLES A ESTUDIAR.....	75
7.2.	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO UTILIZADOS.....	76
7.2.1.	<i>Ensayo de asentamiento del cono de Abrams según UNE EN 12350-2:2009.</i>	76
7.2.2.	<i>Ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de las cuatro puntas o de Wenner según UNE 83988-2.....</i>	78
7.2.3.	<i>Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión según UNE EN 12390-8.</i>	80

7.2.4. Ensayo de resistencia a compresión de probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.	82
7.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	83
7.3.1. Características de los materiales.	83
7.3.1.1. Áridos.	83
7.3.1.2. Cemento.	85
7.3.1.3. Agua.	85
7.3.1.4. Aditivos.	85
7.3.2. Dosificación.	85
7.3.2.1. Fase 1.	86
7.3.2.2. Fase 2.	87
7.3.3. Fabricación y curado de las probetas.	88
8. RESULTADOS.	89
8.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN.	89
8.1.1. Ensayos de hormigón fresco. Asentamiento del cono de Abrams según UNE EN 12350-2.	89
8.1.1.1. Fase 1.	89
8.1.1.2. Fase 2.	89
8.1.2. Ensayos de hormigón endurecido. Resistencia a compresión de probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.	89
8.1.2.1. Fase 1.	89
8.1.2.2. Fase 2.	90
8.2. ENSAYO DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA MEDIANTE EL MÉTODO DE WENNER SEGÚN UNE 83988-2.	90
8.2.1. Fase 1.	90
8.2.2. Fase 2.	91
8.3. ENSAYO DE PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN SEGÚN UNE EN 12390-8.	93
9. ANÁLISIS DE DATOS.	94
9.1. INFLUENCIA DE LA CANTIDAD DE CEMENTO EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	94
9.2. INFLUENCIA DE LA RELACIÓN AGUA-CEMENTO EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	95
9.3. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	96
9.4. RELACIÓN ENTRE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA. .	97
9.5. RELACIÓN ENTRE LA PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN Y LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.	98

9.6. APLICACIÓN DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE DURABILIDAD BASADO EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	99
9.6.1. <i>Diseño de un hormigón para la obtención de una determinada resistividad.....</i>	99
9.6.2. <i>Cálculo del período de iniciación de la corrosión t_i con el método de durabilidad basado en la resistividad eléctrica.</i>	101
10. CONCLUSIONES.....	103
11. BIBLIOGRAFÍA.	107
11.1. LIBROS.	107
11.2. ARTÍCULOS.....	107
11.3. TESIS DOCTORALES Y TRABAJOS ACADÉMICOS.	108
11.4. PÁGINAS WEB.	109
11.5. NORMATIVA.....	109
12. ÍNDICE DE TABLAS.....	111
13. ÍNDICE DE ECUACIONES.....	113
14. ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.	115

1. Introducción y estado del arte.

En la época del Paleolítico y del Neolítico no se utilizaba ningún tipo de conglomerante, se construía con la técnica de "mampostería en seco" colocando hileras de piedras unas encima de otras procurando que su unión fuese lo más homogénea posible. Como no se utilizaba conglomerante se producían gran cantidad de tensiones que llevaban a la rotura de las piedras; por ello surge la necesidad de utilizar alguna metodología que facilite la repartición de las cargas y evite así la rotura de las piedras. Fue entonces cuando se comenzó a rellenar los huecos entre las piedras con un mortero a base de arcilla apisonada con canto rodado. Puede decirse que este fue el primer conglomerante y precursor de lo que hoy en día es el hormigón.

En la Edad Antigua se descubren nuevos materiales para utilizar como conglomerantes, en Mesopotamia se utilizaban las breas del petróleo hasta que los egipcios descubrieron la cal.

Fueron los romanos los que obtuvieron un mortero que poseía unas propiedades físicas y mecánicas casi idénticas a las del hormigón actual. Cerca de Roma, en Pozzuoli (de ahí el nombre de "cemento de puzolana"), podían conseguir con facilidad arenas volcánicas con propiedades cementíceas que mezclaban con piedras naturales (cal y guijarros) para preparar dicho mortero. Después de la caída del Imperio Romano el uso del hormigón decayó.

El hormigón pasó por un milenio de estancamiento en su evolución hasta el s. XVIII que John Smeaton, al reconstruir el faro de Eddystone, descubrió que los morteros formados por la adicción de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción del agua del mar, y que la presencia de arcillas en las cales hacía que éstas fraguasen bajo el agua y una vez endurecidas fuesen insolubles en ella.

En 1817, Vicat propone un sistema de fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas convenientemente y molidas conjuntamente. Este método de vía húmeda marcó el inicio del actual proceso de fabricación del cemento.

En 1824, Joshep Aspdin calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la molió y la pulverizó y consiguió así la primera patente de cemento Pórtland.

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando descubrió que la temperatura de calcinación debía elevarse al máximo para así formar el Clinker.

A partir de 1900 se produce un crecimiento en la industria del cemento gracias a las invenciones de los hornos rotatorios para la calcinación y a la invención del molino tubular para la molienda.

La unión de hormigón y acero se da a partir de la década de los 50 del s. XIX aunque se tiene constancia de que en la época romana y en el Renacimiento se utilizaban grapas de hierro o bronce para reforzar la albañilería cuando la tracción era excesiva.

En este período del s. XIX nace la inquietud de aumentar la resistencia a flexión del hormigón que fue estudiada simultáneamente por varias personas en Europa.

Joseph Monier, considerado como uno de los precursores en el uso del hormigón armado, obtiene en 1867 una patente basada en sus jardineras de hormigón reforzadas con armadura que se aplicará a elementos constructivos como vigas, bóvedas o tubos. François Coignet consigue la primera patente de techos de hormigón reforzados con barras de hierro cruzado. François Hennebique obtiene tres patentes, la primera en 1892 por una viga en T, la segunda en 1894 por una losa de forjado aligerada, y la tercera en 1898 sobre pilotes prefabricados.

En España se utilizaron mayormente las patentes de Hennebique cuyos principales representantes fueron José Eugenio de Ribera y su discípulo Eduardo Torroja.

Los trabajos realizados en hormigón armado no estaban normalizados y dependían de la práctica del constructor y su cálculo de la comparación con otros materiales. A partir de la última década del s. XIX aparecen los primeros estudios racionales en los que se fijaron coeficientes de elasticidad longitudinal e introdujeron los conceptos de cuantías metálicas y relación de las deformaciones conjuntas.

Hasta los inicios del s. XX no aparecen normativas en materia de hormigón, las primeras aparecen en Suiza (1903), Prusia (1904), Francia (1906), Reino Unido (1907) y Estados Unidos (1910).

La primera Instrucción de Hormigón en España no se produce hasta el año 1939 y es publicada por el Ministerio de Obras Públicas. Basada en la Norma DIN 1045, presenta singularidades con respecto a ésta como la adopción de la probeta cilíndrica.

En 1940 se publica una Norma de la Dirección General de Arquitectura muy similar a la de 1939 pero específica para edificios arquitectónicos.

Tiene gran importancia la Instrucción ha-61 que fue publicada en dos tomos, el primero salió a la luz en 1958 al que se denominó ha-58 y el segundo en 1961. Esta instrucción causa un gran impacto ya que introduce los conceptos de cálculo probabilístico y semiprobabilístico. Fue editada por el Instituto de la Construcción y del Cemento y no tenía carácter obligatorio pero tuvo gran influencia.

En 1968 se publica la primera EH llamada Instrucción EH-68 publicada por el Ministerio de Obras Públicas. La EH-68 inicia el ciclo de las EH consecutivas, pero fue la EH-73 la primera en tener gran transcendencia tanto a nivel nacional como internacional puesto que introducía una gran novedad que era la de relacionar los coeficientes de seguridad con los distintos niveles de control.

El hormigón pretensado fue normalizado por las Instrucciones EP-77, EP-80 y EP-93.

Después de la EH-73 se suceden una serie de actualizaciones de ésta en los años 82, 88 y 91.

En 1999 se publica la Instrucción EHE (posteriormente llamada EHE-98) que unifica los conceptos de hormigón en masa, armado y pretensado, siguiendo así la tendencia internacional, como también se hace en la norma actual la EHE-08.

En cuanto a la durabilidad, en general, tanto en las normas europeas como en el Eurocódigo no existe un capítulo dedicado a ella sino que se hacen referencias en distintos apartados.

El desarrollo de modelos de cálculo de la vida útil de la armadura y de métodos de ensayo comenzó en los años 70. Uno de los pioneros en este ámbito fue Tuutti (1982) y a él le siguieron otros investigadores como Castro-Borges, Andrade, Sagües, Maage o Baroguel-Bouny. Aunque estos métodos permanecen todavía a nivel experimental, algunas normativas incorporan recomendaciones para el cálculo de la vida útil como es el caso de la EHE-08 que incluye el *Anejo 9 "Consideraciones adicionales sobre durabilidad"*, aunque en él no se consideran todos los aspectos necesarios (Andrade, 2013).

2. El hormigón. Composición.

El hormigón es un material poroso constituido por la pasta de cemento, los áridos, la interfaz pasta-árido y los poros de aire.

Para la predicción de la durabilidad del hormigón es importante conocer el proceso de hidratación de la pasta de cemento y las fases que componen la microestructura de éste una vez endurecido.

2.1. Proceso de hidratación de la pasta de cemento.

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).

Se forma por la pulverización del producto resultante de la cocción de una mezcla de materiales calizos y arcillosos (Clinker) y la adición ocasional de materiales que faciliten la dosificación de los crudos deseados en cada caso.

El Clinker de cemento Portland está formado por una mezcla de silicato tricálcico y silicato dicálcico, al menos en dos tercios de su masa, el resto está constituido por fases del Clinker que contienen aluminato tricálcico, hierroaluminato tetracálcico y otros compuestos.

COMPUESTO	COMPOSICIÓN	NOMENCLATURA	PROPORCIÓN (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	40-60
Silicato dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_3$	C_2S	20-30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	7-14
Hierroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	5-12

Tabla 2.1. Componentes del cemento Portland y sus proporciones (Alcaraz Marín, 2012; D'Andrea, 2010)

La variación del porcentaje de estos componentes principales dará lugar a los diferentes tipos de cementos.

Durabilidad en el hormigón armado

Para la fabricación del cemento portland se pueden emplear tanto materiales de origen natural como de origen industrial. Los óxidos empleados para la fabricación se pueden dividir en dos tipos:

Los óxidos principales de carácter básico como la cal (CaO) y de carácter ácido como la sílice (SiO₂), la alúmina (Al₂O₃) y la hematites (Fe₂O₃). Estos componentes ácidos son los responsables de la hidráulidad del cemento al reaccionar con la cal constituyendo compuestos.

Los óxidos secundarios como la magnesia (óxido magnésico MgO y el anhídrico sulfúrico SO₃), cal libre (CaO), álcalis (óxido sódico Na₂O y potásico K₂O). Estos están limitados por la norma ya que pueden ser nocivos.

Óxido	Porcentaje (%)
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-0.6
MgO	0.4-0.5
Na ₂ O	0.3-1.2
SO ₃	2.0-3.5

Tabla 2.2. Límites usuales de composición del cemento Portland [Neville, 1997]

El proceso de hidratación de la pasta se inicia a partir del contacto entre el cemento y el agua, el inicio de fraguado del cemento se alcanza en menos de una hora, y posteriormente se transformará en un sólido endurecido. El proceso responde a la siguiente fórmula:



[Ecuación 2.1] Proceso de hidratación de la pasta de cemento.

El Clinker constituido por los C₂S, C₃S, C₃A y C₄AF reacciona con el agua dando una serie de compuestos: C-S-H o silicatos, C-A-H o aluminatos, Ca(OH)₂ o "portlandita" y la ettringita producto de la hidratación del aluminato tricálcico.

En el proceso de hidratación debemos diferenciar dos fases: la hidratación de los silicatos y la hidratación de los aluminatos.

La hidratación de los silicatos genera un producto que varía su composición según las condiciones de curado pero que generalmente será $C_3S_2H_3$ que se simplifica como CSH. Los silicatos, dada su gran cantidad de poros, al hidratarse crean un gel rígido y poroso que recibe el nombre de "tobermorita" que es la responsable de la estructura interna de la pasta de cemento, de la adherencia de esta pasta con los áridos y de la resistencia mecánica.

Al hidratarse los silicatos también se genera otro producto, el hidróxido de calcio o "portlandita", que gracias a su alta alcalinidad (pH 12,5) es el responsable de la protección frente a la corrosión y ayuda también a la adherencia pasta-árido.

La hidratación de los aluminatos se produce al reaccionar el C_3S con el agua dando lugar a C_3AH_6 . Dependiendo de la concentración de iones hidróxido y de sodio se formará también o trisulfato de aluminato cálcico o monosulfato de aluminato cálcico. En el caso de soluciones muy saturadas de iones de hidróxido de calcio se producirá la ettringita, también llamada sal de Candlot o bacilo de portland.

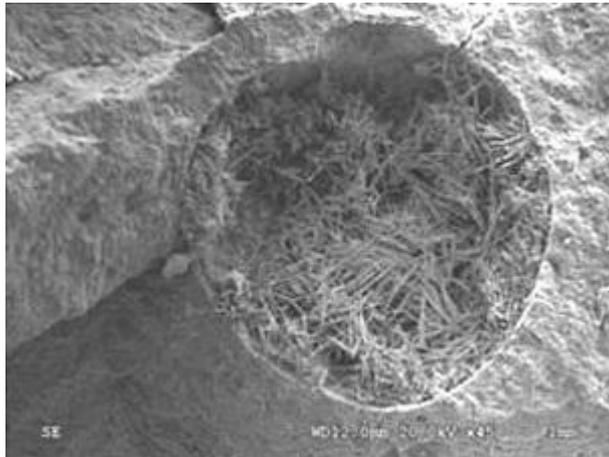


Ilustración 2.1. Ettringita relleno un poro.

Durante el fraguado, los componentes más solubles del cemento se disuelven más fácil y rápidamente, así la pasta de cemento pierde su docilidad y trabajabilidad además de emitir calor, hasta que al final la pasta queda endurecida por completo. En el proceso de hidratación debemos distinguir dos procesos diferenciados: el fraguado y el endurecimiento. El fraguado responde a la reacción en el tiempo por la cual la pasta hidratada pierde su plasticidad con ganancia de resistencias iniciales y el endurecimiento es el proceso en el que se conforman las resistencias del cemento hasta quedar totalmente endurecido.

El tiempo de fraguado se puede controlar mediante la adición de aceleradores de fraguado (como los cloruros, los hidróxidos, los carbonatos o los silicatos) o retardantes del fraguado (como el yeso).

El endurecimiento tiene lugar al final del proceso de fraguado se prolonga durante mucho más tiempo que éste, en él continúan los procesos de hidratación y consolidación aunque disminuye su velocidad puesto que el agua cada vez tiene más dificultad para penetrar al interior del grano). Progresivamente va aumentando la rigidez, dureza y resistencias mecánicas de la pasta. Se puede decir que el C_3A es el responsable de las resistencias mecánicas iniciales, el C_3S de las primeras resistencias mecánicas importantes y el C_2S el responsable de las resistencias a largo plazo.

2.2. Microestructura de la pasta endurecida.

En la microestructura de la pasta endurecida podemos distinguir los siguientes componentes: pasta de cemento, áridos, interfase árido-pasta e interfase acero-pasta si es armado. La pasta de cemento endurecida se divide en tres partes: sólido, porosidad y fase acuosa.

2.2.1. Fase sólida.

En la fase sólida podemos distinguir los siguientes componentes: el cemento anhidro, el gel CSH o tobermorita, el hidróxido de calcio o portlandita y el sulfoaluminato cálcico hidratado. El gel CSH es el componente mayoritario (50-60% del volumen de sólidos) que es quién aporta al material endurecido su resistencia, seguido de los cristales de portlandita (20-25% del volumen de sólidos) que son los que aportan la elevada alcalinidad a la pasta y los sulfoaluminatos (15-20% del volumen total de sólidos).



Ilustración 2.2. Pasta de cemento hidratada: Ca(OH)_2 y C-S-H

- **Interfase árido-pasta.**

Esta capa de interfase se forma por la exudación superficial en los áridos, tiene un espesor aproximado de 50 μm y es de gran importancia en cuanto a la durabilidad y resistencia del hormigón. Presenta una microestructura característica: tiene una relación agua-cemento superior a la del resto de la masa, mayor porosidad y mayor concentración de portlandita.

2.2.2. Porosidad.

Se define la porosidad como la capacidad que tiene un material para tener poros, entendiendo poro como cualquier espacio del material que no esté ocupado por un sólido. Podemos distinguir tres tipos de porosidad distinta: la porosidad total, la porosidad abierta y la porosidad cerrada.

La porosidad total es el volumen total de poros vacíos por unidad de volumen total de materia. En ella se contabilizan tanto los poros abiertos como los cerrados. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$n = \left(\frac{p_s + p_d}{p_s} \right) \cdot 100$$

[Ecuación 2.2] Porosidad total.

Siendo p_s la densidad del material, p_d la densidad del material seco y n la porosidad total. No se puede obtener su valor experimentalmente ya que se incluyen los poros cerrados no comunicados con el exterior.

La porosidad abierta es el volumen de poros abiertos o poros comunicados con el exterior y entre sí. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$n_a = \frac{V_a}{V_t} \cdot 100$$

[Ecuación 2.3] Porosidad abierta.

Siendo V_a el volumen de poros abiertos y V_t el volumen de poros totales. El volumen de poros totales se determina mediante métodos experimentales de intrusión de líquidos y cuantificación por pesada hidrostática.

La porosidad cerrada es aquella en la que los poros que aun estando comunicados entre sí no tienen comunicación con el exterior. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_c = V_t - V_a$$

[Ecuación 2.4] Porosidad cerrada.

La porosidad de la pasta de cemento disminuye con el tiempo debido a los procesos de hidratación pero sigue existiendo un volumen de vacíos en su interior, la distribución de tamaño y la conectividad entre ellos van a influir en la transferencia de materia en el medio poroso.

Generalmente los poros se clasifican dependiendo de su tamaño pero no existe una clasificación única ya que son muchos los autores que han dado su propia clasificación.

Powers [1960] clasifica los poros de la pasta endurecida en dos grupos distintos que se distinguen por el tamaño: poros de gel y poros capilares. Existen también los poros de aire y los macroporos debidos a defectos de compactación.

Los poros de gel CSH constituyen una porosidad intrínseca del gel con un diámetro ínfimo (15Å) por lo que se desprecia su contribución a la capacidad de transporte de fluidos en el material.

Los poros capilares se corresponden con la fracción del espacio total (volumen de cemento y agua) no ocupado por la suma de volumen de los productos de hidratación y del volumen de cemento que permanezca en estado anhidro. Por esto el volumen de los poros capilares depende de la relación agua-cemento y

del grado de hidratación del cemento. Se puede calcular el índice de poros capilares mediante la siguiente ecuación dada por el modelo de Powers:

$$n_p (\%) = \frac{\frac{a}{c} - 0.3623 \alpha}{\frac{a}{c} + \frac{1}{\gamma_c}} \approx \frac{\frac{a}{c} - 0.36 \alpha}{\frac{a}{c} + 0.32} \cdot 100$$

[Ecuación 2.5] Fórmula de Powers.

Donde,

- n_p Índice de poros capilares.
- α Grado de hidratación del cemento.
- $\frac{a}{c}$ Relación agua-cemento.
- γ_c Densidad del cemento.

Los poros capilares son los más importantes en cuanto a la durabilidad ya que son los que controlan el transporte de materia en el interior del hormigón, debido a las fuerzas capilares y a la tensión superficial de estos huecos, y porque a través de ellos es por donde penetran y se difunden los agresivos externos. Por ello las normativas limitan el valor máximo de la relación agua-cemento en función de la agresividad ambiental.

Si el grado de hidratación del cemento es bueno se pueden dar dos situaciones en función de la relación agua-cemento:

- Si la relación agua-cemento es baja, los poros capilares que se formen tendrán un diámetro que variará en n rango de valores de 10 a 50 nanómetros.
- Si la relación agua-cemento es alta, a edades tempranas el diámetro de los poros variará de 3 a 5 μm . [Metha y Monterio, 2001]

2.2.3. Fase acuosa.

El agua perteneciente a la matriz de la pasta de cemento endurecida contiene disueltos tanto los iones que provienen del cemento como los que penetran desde el exterior (Cl^-).

El agua de la pasta de cemento se puede encontrar en diversas formas, que normalmente se clasifican según el grado de energía necesario para ser eliminada. Powers [1961] la clasifica en dos grupos: agua no evaporable y agua evaporable.

Con respecto a la durabilidad es el agua evaporable la que influye en los procesos de deterioro relacionados con la corrosión y su volumen depende de la temperatura y de la humedad relativa interior.

La condensación de vapor de agua en los poros viene dada por el cambio de presión entre la interface líquido-vapor y depende del radio del poro.

Otra forma de clasificarla puede ser en función del grado de enlace con las superficies de los poros. Según Feldman y Sereda [1968] podemos encontrar el agua en tres formas: agua combinada químicamente, agua de gel o interlaminar y agua capilar.

El agua combinada químicamente o adsorbida es aquella que forma parte de la estructura de los productos hidratados y no se pierde por secado. La eliminación de este tipo de agua provoca la descomposición de los productos.

El agua interlaminar (agua de gel) es aquella que está asociada a la estructura laminar del gel CSH y por ello es agua estructural. Forma una monocapa de agua fuertemente enlazada a las láminas del gel mediante enlaces de puentes de hidrógeno. Su pérdida puede producirse en condiciones de humedad relativa muy bajas o a temperaturas mayores de 100 °C y provoca consecuencias irreversibles en la estabilidad del material.

El agua capilar es aquella que está presente en los poros capilares. Podemos dividirla en dos categorías:

- Agua sujeta a tensión capilar: que se encuentra en los poros capilares pequeños. Su evaporación puede alterar la estabilidad volumétrica de la masa.
- Agua libre: que se encuentra en los poros grandes. Su evaporación no produce alteraciones volumétricas en la masa.

3. Durabilidad en el hormigón armado.

3.1. Distintas patologías que afectan a la durabilidad en el hormigón armado.

3.1.1. Daños por acciones físicas.

Las acciones de tipo físico son aquellas que pueden producir en el hormigón un desgaste superficial, la pérdida de integridad o la disgregación.

a. Hielo-deshielo.

Las patologías debidas al hielo-deshielo son frecuentes en lugares donde las temperaturas descienden por debajo de los cero grados y consiste en ciclos de congelación-descongelación del agua situada en los poros abiertos del hormigón cuando éstos están saturados. Ésta al helarse experimenta un aumento de volumen del 9% que produce tensiones que pueden dañarlo.

Los efectos de estos ciclos de hielo-deshielo son más importantes cuanto mayor sea su frecuencia y cuanto mayor sea la porosidad del hormigón produciendo disgregaciones superficiales (*Cánovas, 1994*).

b. Daños provocados por el agua a alta velocidad.

Existen dos tipos de daño provocados por el agua a alta velocidad: la abrasión y la cavitación.

La abrasión se produce cuando este agua a alta velocidad lleva partículas de arena en suspensión y choca contra el hormigón; el efecto que produce es la erosión de la pasta de cemento, haciendo saltar primero el árido fino y luego el árido grueso formando al final grandes huecos en el hormigón. Los efectos de la abrasión dependen de la resistencia a compresión del hormigón, del tipo de árido empleado, de la velocidad del agua, de su cantidad y de la naturaleza de las partículas que lleve.



Ilustración 3.1. Daños de abrasión-cavitación.

La cavitación es la consecuencia de la implosión de las burbujas que se forman en el agua en rápido movimiento cuando chocan con las irregularidades del hormigón que hacen que cambie su geometría superficial. Se produce un arrancamiento progresivo del hormigón debido al rápido cambio de impactos y succiones producido por la implosión de estas burbujas.

c. Abrasión por sólidos.

Se trata de la abrasión producida por elementos que rozan la superficie del hormigón produciendo un desgaste de la misma incluso llegando a la destrucción del hormigón.

La resistencia al desgaste del hormigón está relacionada con su resistencia a compresión. Cuando la abrasión se produce por rozamiento es más importante la resistencia al desgaste de los áridos y cuando la abrasión es por pequeños impactos continuados cobra mayor importancia la adherencia pasta-árido.

3.1.2. Daños por acciones de tipo químico.

Las agresiones de tipo químico que sufre el hormigón suelen proceder de agentes químicos situados en el exterior de éste y que le atacan de fuera a dentro. En la mayor parte de los casos los agresivos atacan al cemento y, en las menos, el ataque se produce sobre los áridos. En la mayoría de estos procesos es fundamental la presencia de agua como diluyente de los agresivos y como vehículo para el ingreso de éstos en el hormigón.

En otros casos la reacción agresiva puede producirse entre los componentes del hormigón como pueden ser los álcalis del cemento con cierto tipo de áridos.

a. Ataque por aniones y cationes.

Los ataques más agresivos por aniones en el hormigón son los producidos por los sulfatos. Los iones sulfato reaccionan con el aluminato tricálcico del cemento y con el agua dando lugar a sulfoaluminato tricálcico, esta reacción produce un aumento de volumen considerable dando lugar a una fuerte expansión y a la desagregación del hormigón al destruirse el conglomerante y quedar suelto el árido.



Ilustración 3.2. Delaminación superficial producida por la corrosión de la armadura.

Dicha desagregación se inicia con un cambio de color en la superficie del hormigón, a esto le sigue la aparición de fisuras entrecruzadas que van aumentando su espesor hasta producir una delaminación superficial como consecuencia de las tensiones que produce la expansión del sulfoaluminato.



Ilustración 3.3. Fisuración producida por la corrosión de la armadura

Esta expansión depende de diversos factores como la exposición a los agresivos, el tipo de cemento empleado, la permeabilidad del hormigón, la cantidad de agua disponible y la temperatura.

El agua de mar posee (además de cloruros) sulfatos de calcio, magnesio y sodio, que reaccionan con el aluminato tricálcico y contribuyen a solubilizar la cal. Su ataque es menos intenso que el del agua dulce ya que los cloruros atenúan la acción de los sulfatos al crear cloroaluminato (también llamado Sal de Fridell) no expansivo. La disolución de los hidróxidos de calcio y magnesio en presencia de cloruros es mucho mayor que la del agua dulce pero su agresividad es menor ya que el hidróxido magnésico forma una película protectora que hace que ésta disminuya.

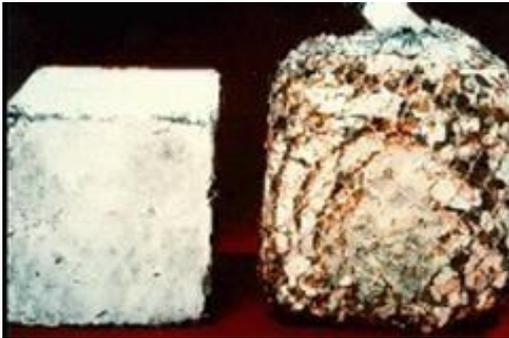


Ilustración 3.4. Cubo de hormigón sometido a sulfatos.



Ilustración 3.5. Ataque por sulfatos.

La acción de los cloruros también es peligrosa puesto que dan lugar a la formación de compuestos solubles aunque su presencia sea en pequeñas cantidades.

Los nitratos, que son solubles en agua, reaccionan con los componentes del cemento dando lugar a sales de fácil lixiviación.

Los principales cationes que dan lugar a acciones corrosivas sobre el hormigón son el magnesio y el amonio.

El catión de magnesio favorece la corrosión pues actúa fácilmente en las reacciones de intercambio. En grandes cantidades puede reemplazar al calcio produciendo daños importantes.

Las sales que contienen catión amonio son muy solubles. Los nitratos, cloruros, sulfuros y sulfatos de amonio son muy perjudiciales para el hormigón.

b. Ataque por ácidos.

El ataque por ácidos al hormigón da como resultado la transformación de sus componentes cálcicos (hidróxido cálcico, silicato y aluminato cálcico hidratado) en sales cálcicas, que son solubles y por tanto se eliminan del hormigón produciendo un gran número de huecos (hormigón más poroso) y facilitando la exposición de éste al ataque de otros agentes.

No todos los ácidos producen la misma intensidad de ataque, ésta viene definida por el pH de la disolución del ácido, así un pH entre 6,5 y 5,5 se considera débilmente agresivo, un pH entre 5,5 y 4,5 se considera fuertemente agresivo y si el pH es menor de 4,5 se considera altamente agresivo (*Cánovas, 1994*).

c. Ataque por aguas puras.

Las aguas puras o las blandas atacan al hormigón disolviendo el hidróxido cálcico que contiene, haciéndolo cada vez más poroso y permeable.

Su ataque se debe a su gran poder de disolución, a su bajo contenido en cal, en sales disueltas y su baja alcalinidad. Además pueden tener un carácter corrosivo si contienen anhídrido carbónico o sulfuroso.

d. Reacción álcali-árido.

La reacción álcali-árido se produce por la reacción entre los álcalis del cemento portland (hidróxidos alcalinos) y la sílice de algunos áridos. El gel que se forma en la reacción embebe agua produciendo una fuerte expansión que genera fuertes tensiones que fisuran el hormigón.

La intensidad del daño depende del contenido de álcalis del cemento, de la dosificación de cemento, de los áridos, de la porosidad del hormigón y la presencia de agua.

Los hormigones dañados presentan pequeñas fisuras de forma irregular que se expanden progresivamente en las direcciones de menor resistencia y en la dirección de los esfuerzos de compresión, pudiendo llegar a la desintegración.

3.2. Corrosión del acero en el hormigón armado.

Es muy frecuente en estructuras de hormigón armado próximas al mar, situadas en atmósferas industriales salinas, en contacto con terrenos con abundancia de cloruros, en ambientes húmedos con atmósferas agresivas, etc., que se produzcan fisuras y posteriores desprendimientos del hormigón, junto con una progresiva pérdida de sección de las barras de acero, debilitando así la estructura.

El hormigón debido a su alcalinidad es un gran medio de protección para las armaduras pero esta protección puede perderse fácilmente cuando el hormigón no posee la calidad suficiente o los recubrimientos de las barras no son los adecuados.

El recubrimiento representa una barrera física que separa el metal del contacto directo con la atmósfera. El espesor del recubrimiento y su permeabilidad son los factores que controlan la eficacia de esta barrera.



Ilustración 3.6. Armadura corroída.

En la interfase acero-hormigón se forma una capa pasivante debida a un proceso de naturaleza esencialmente electroquímica, basado en la elevada alcalinidad del hormigón (normalmente entre 12,5 y 13,5) y en la existencia de un potencial electroquímico apropiado. El acero permanece pasivo hasta que se produzca una disminución del pH que destruya este estado (*Cobo Escamilla, 2001*).

La mayor parte de las patologías por pérdida de pasividad de las armaduras se deben a los siguientes factores: a la carbonatación y a los iones despasivantes.

- La carbonatación del hormigón es la reacción del dióxido de carbono de la atmósfera con las sustancias alcalinas de la solución de los poros y con los componentes hidratados del hormigón, que produce un descenso del pH del hormigón por debajo de un valor crítico, que suele situarse en torno a 9,5.
- La presencia de iones despasivantes, esencialmente cloruros, cuando supera un determinado valor crítico produce la rotura local de las capas pasivantes.

Existen otros factores secundarios que de menor importancia pero que en circunstancias especiales son capaces de iniciar la corrosión.

La reducción del pH no es causa suficiente para que se produzca la corrosión. La carbonatación y la presencia de iones proporcionan las condiciones termodinámicas necesarias para provocar la corrosión en estado activo pero dependen de otros factores para el desarrollo del ataque. Éstos son los factores condicionantes, que controlan la velocidad de corrosión acelerándola o retardándola, y los principales son la disponibilidad de oxígeno y la humedad.

3.2.1. Ingreso de los cloruros en el hormigón armado.

El ingreso de los cloruros en el hormigón se debe esencialmente a los cloruros añadidos al hormigón como aditivos o bien porque los contenga el medio ambiente en el que se encuentra el hormigón y penetren por difusión como en las zonas próximas al mar.

Una parte del contenido total de cloruros está ligado químicamente con el cemento (formando la llamada Sal de Friedell), otra queda inmovilizada por enlaces físicos y el resto permanece en estado libre en la solución de los poros, estos últimos son los que suponen un peligro para la corrosión de las armaduras.

La concentración de cloruros es más alta en la superficie y va decreciendo hacia el interior del hormigón. Los ciclos de humectación y desecación de la superficie del hormigón con agua que contenga cloruros produce un aumento de la concentración de éstos en la superficie. Durante el período de humectación el agua con cloruros ingresa en el hormigón por capilaridad, cuando el agua se evapora los cloruros quedan depositados en el hormigón.

La despasivación del acero debido a la contaminación del hormigón por cloruros depende esencialmente de dos parámetros:

- El coeficiente de difusión del hormigón, puesto que varía en función del tamaño y de la distribución de los poros del hormigón.
- La capacidad del hormigón de fijar o combinar cloruros.

El componente del cemento capaz de fijar iones cloruro es el aluminato tricálcico (C₃A), contenido en el Clinker de cemento portland. Los cementos más ricos en Clinker y con menos adiciones tienen mayor capacidad para fijar cloruros. Al aumentar la capacidad para fijar los cloruros disminuye la penetración de éstos al interior del hormigón, por ello los cementos con mayor cantidad de aluminato tricálcico tienen menores niveles de penetración.

La normativa limita el contenido de cloruros para evitar riesgos de corrosión. La EHE-08 fija estos límites para el contenido de cloruros aportados por los componentes del hormigón:

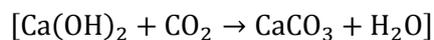
- En obras de hormigón pretensado: 0,2% del peso del cemento.
- En obras de hormigón armado u obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración: 0,4% del peso del cemento.

La destrucción de la capa pasivante sólo se puede dar cuando la concentración de cloruros alcanza un nivel crítico en relación con la concentración de iones hidroxilo de la solución de los poros.

3.2.2. La carbonatación en el hormigón armado.

Como se explica anteriormente el hormigón en estado normal presenta un pH entre 12,5 y 13,5, el acero embebido en él en esta situación se encuentra protegido frente a la corrosión.

Debido a la porosidad del hormigón el CO₂ de la atmósfera penetra en su interior produciendo la reacción entre el CO₂ y la fase acuosa intersticial saturada de hidróxido cálcico del hormigón y de los compuestos hidratados del cemento:



[Ecuación 3.1] Proceso de carbonatación.

A causa de esta reacción el pH del hormigón desciende a valores menores de 9, esto supone una deficiencia en la protección de las armaduras quedando expuestas a la corrosión. Se produce un gran cambio en el hormigón habiendo grandes diferencias de pH, unas con $\text{pH} > 12$ y otras con $\text{pH} < 9$.



Ilustración 3.7. Hormigón carbonatado.

El avance del frente carbonatado se puede predecir mediante la siguiente fórmula:

$$x_c = K_c \cdot \sqrt{t}$$

[Ecuación 3.2] Avance del frente carbonatado.

Siendo:

x_c Profundidad de la capa carbonatada en mm.

K_c Constante de carbonatación en $\text{mm/año}^{0.5}$.

t Tiempo en años.

El desarrollo de la carbonatación depende de varios factores como por ejemplo el contenido de CO_2 de la atmósfera, la permeabilidad del hormigón, el contenido y tipo de cemento y la humedad del ambiente.

La cantidad de CO_2 será mayor en zonas contaminadas como las zonas urbanas y especialmente en aparcamientos subterráneos, por tanto el avance de la carbonatación será mayor.

Un hormigón permeable se da con relaciones a/c altas, es un hormigón muy poroso que favorece la carbonatación. Cuanto mayor sea el contenido de cemento más será la dificultad de avance de la carbonatación.

Las humedades óptimas para que se produzca la carbonatación son del 50-60%. Con humedades muy bajas o muy altas (hormigón saturado) el proceso de carbonatación se dificulta.



Ilustración 3.8. Utilización de indicadores de pH.

Para comprobar si un hormigón está carbonatado se suelen utilizar indicadores de pH que cambian de color. El más común es la solución de fenolftaleína al 1% en etanol que colorea de púrpura o rosa al hormigón con pH superior a 9,5.

3.2.3. Combinación de carbonatación e iones cloruro.

Un hormigón carbonatado contiene menos iones OH^- que un hormigón no carbonatado, y por ello aumenta la cantidad de iones cloruro en relación con la de iones hidroxilo. Después de que se produzca la carbonatación se liberan parte de los iones cloruro fijados química y físicamente, aumentando así la cantidad de iones libres en los poros y con ello el riesgo de corrosión.

3.2.4. Factores acelerantes de la corrosión. Influencia de las variables climáticas en el proceso de corrosión.

La intensidad y naturaleza de la agresividad ambiental viene determinada por los factores de contaminación y los meteorológicos, que potencian sus efectos al actuar simultáneamente.

El NaCl y el SO₂ son los principales contaminantes corrosivos de la atmósfera. Los cloruros se encuentran en las atmósferas marinas o en suelos salinos aunque también podemos encontrarlo en las sales de deshielo; y el anhídrido sulfuroso se encuentra en atmósferas industriales o en grandes ciudades.

Los contaminantes atmosféricos aceleran la corrosión a través de sus efectos sobre la conductividad del electrólito, el proceso anódico y el proceso catódico. El ingreso de estos contaminantes depende de la porosidad del hormigón y del espesor del recubrimiento entre otros factores.

Los cloruros y el anhídrido carbónico son factores que determinan la corrosión o pasividad de las armaduras, en cambio, otros factores ambientales no son determinantes de la corrosión mientras las armaduras permanecen pasivas pero, una vez iniciada la corrosión, juegan un papel importante en la velocidad de ésta.

Estos factores acelerantes pueden ser entre otros la humedad, la temperatura y el acceso de oxígeno.

La presencia de agua es imprescindible para la corrosión y para la movilidad de los iones a través del electrolito. Cuanto más saturados de humedad estén los poros del hormigón, mayor será su conductividad eléctrica y mayor será la velocidad de corrosión. El agua implicada en el proceso de corrosión es la humedad contenida en los poros por tanto depende de la porosidad de éste y su cantidad depende de la humedad relativa del ambiente.

La temperatura es un factor a tener en cuenta en los procesos de deterioro, el aumento de la temperatura facilita la movilidad de las moléculas y el transporte de sustancias. La cantidad de vapor de agua de la atmósfera depende también de la temperatura.

Durabilidad en el hormigón armado

Para que se produzca el proceso de corrosión es necesario que llegue una cantidad mínima de oxígeno hasta las armaduras. La velocidad de corrosión es mayor cuando existe la suficiente cantidad de agua en los poros y estos no estén saturados. Cuando los poros están saturados el acceso de oxígeno se dificulta puesto que éste debe disolverse en el agua antes de llegar a las armaduras.



Ilustración 3.9. Zona de carrera de mareas.

Expuestos los parámetros ambientales que influyen en la corrosión podemos agrupar ambientes característicos que pueden representar niveles de agresividad similares.

- Ambientes interiores: aquellos en que la humedad relativa es baja y no hay sustancias que puedan provocar la corrosión.
- Intemperie: ambientes con humedad relativa alta y con bajos niveles de sustancias agresivas.
- Ambientes marinos: ambientes con humedad relativa alta y niveles de cloruros elevados. Podemos subdividirlo en zonas dependiendo del tipo de exposición:
 - Zona atmosférica: el nivel de cloruros depende de la distancia al mar, de la altura y de la dirección del viento.
 - Zona de salpicaduras.
 - Zona de carrera de mareas.
 - Zona sumergida.
 - Zona de lecho marino.

El riesgo es máximo en la zona atmosférica y en la zona de salpicaduras.

3.2.5. Factores retardadores de la corrosión de las armaduras.

Existen aditivos capaces de mantener el acero pasivo en presencia de factores agresivos, son sustancias químicas que se añaden al agua de amasado del hormigón y se llaman inhibidores de la corrosión.

Los inhibidores de corrosión más utilizados industrialmente son los nitritos. Para que su funcionamiento sea eficaz se debe de superar un umbral crítico de nitritos en relación con la cantidad de cloruros. La relación establecida experimentalmente es $\text{NO}_2^-/\text{Cl}^- = 1$. También tienen efecto en caso de que el hormigón esté carbonatado, reduciendo la velocidad de corrosión.

3.2.6. Mecanismos de transporte del agresivo en el hormigón.

Los agentes agresivos penetran a través de la red porosa del hormigón, en estado gaseoso o líquido. De la misma manera, los iones disueltos en la fase acuosa contenida en los poros circulan a través de la estructura porosa del hormigón. Los mecanismos de transporte del agresivo se diferencian por la fuerza impulsora que actúa, pudiendo ser un gradiente de concentraciones (difusión), tensión superficial de los poros capilares (absorción), diferencia de presiones (permeabilidad), diferencia de densidad o temperatura (convección) y diferencia de potencial electrostático (migración iónica).

- Difusión.

La difusión es un proceso físico en el que las partículas materiales se introducen en un medio que inicialmente carecía de ellas. Se produce por la existencia de un gradiente de concentración que tiende a equilibrar los diferentes niveles de concentración. Puede producirse en régimen estacionario en el que el caudal es constante en el tiempo, o transitorio.

- Absorción capilar.

La absorción capilar es una succión que se debe a que la superficie libre de los sólidos tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces con otras moléculas cercanas, por ello tiende a compensarse absorbiendo moléculas de agua que están en la superficie hasta alcanzar un estado de equilibrio. La tensión superficial provoca que el líquido ascienda por el poro. El proceso depende de las

propiedades del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial) y del sólido (estructura porosa).

- Permeabilidad.

Es la capacidad del hormigón para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna. Se genera por medio de un diferencial de presión hidráulica provocando que el fluido líquido o gaseoso atraviese el material.

- Migración iónica.

Se produce cuando existe una diferencia de potencial electrostático entre distintos puntos de un electrolito (en el hormigón sería la fase acuosa), esto provoca la formación de un campo eléctrico a causa del flujo de carga en sentido del campo.

- Convección.

Se produce por la diferencia de temperatura entre dos zonas del material. Los fluidos de la zona con mayor temperatura aumentan su volumen y disminuyen su densidad. El fluido tiende a homogeneizar sus propiedades por tanto se desplaza a las zonas más frías.

3.2.6.1. Determinación de la capacidad del medio para la difusión.

Para poder exponer unas ecuaciones de flujo de iones a través del hormigón se considera el material saturado y en condiciones homogéneas. En estas condiciones podemos representar dicho flujo mediante la ecuación de Nernst-Plank, en la que se considera el movimiento iónico total como la suma de los mecanismos de difusión, migración y convección:

$$J_j = -D_j \cdot \Delta C_j - \frac{Z_j \cdot F}{R \cdot T} \cdot D_j \cdot C_j \cdot \Delta \phi + C_j \cdot v_j$$

[Ecuación 3.3] Ecuación de Nernst-Plank.

Siendo:

- J_j Flujo de la especie j (mol/cm^2s)
- D_j Coeficiente de difusión de la especie j (cm^2/s)
- C_j Concentración de la especie j (mol/cm^3)

Z_j	Carga eléctrica de la especie j
v_j	Velocidad forzada del ión (cm/s)
F	Número de Faraday ($cal/V eq$)
R	Constante de gases ($cal/mol ^\circ K$)
T	Temperatura absoluta ($^\circ K$)
Δ	Vector operados gradiente; para transferencia de masa unidimensional y en coordenadas rectangulares $\Delta = i \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}\right)$, siendo i el vector unidad a lo largo del eje de abscisas y x la distancia
\emptyset	Diferencia de potencial electrostático (V)

Cuando tenemos una presión y temperatura constantes podemos descartar el fenómeno de convección en la fase acuosa de la red porosa y en condiciones naturales no se produce la migración; por tanto se puede simplificar todo ello estudiando solamente el transporte de los iones a través del hormigón por el mecanismo de difusión.

En un medio poroso es posible definir varios coeficientes de difusión. Los más importantes son el coeficiente de difusión efectivo D_{ef} y el coeficiente de difusión aparente D_{ap} . El coeficiente efectivo considera el medio como uno continuo y el coeficiente aparente considera que las partículas interaccionan con el sólido.

Para poder analizar la penetración de una especie por difusión pura en un medio poroso aplicamos la segunda ley de Fick, que representa la ecuación de conservación de la materia teniendo en cuenta la ley de transporte.

$$\frac{\partial c(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot D_{ap} \cdot \left(\frac{\partial c(x, t)}{\partial x}\right)$$

[Ecuación 3.4] Segunda ley de Fick.

Siendo:

C	Concentración de la sustancia que se difunde
x	Distancia

t	Tiempo
D_{ap}	Coefficiente de difusión aparente

La ley de Fick establece que la velocidad de cambio de la concentración en un volumen elemental, dentro de un campo difusional, es proporcional a la velocidad de cambio del gradiente de concentraciones en ese punto.

En el caso de que el medio sea semi-infinito y las condiciones iniciales uniformes, la concentración exterior (C_s) constante y concentración interior nula ($C_i \approx 0$), la ecuación se puede resolver mediante la función de error (*erf*).

$$C(x, t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{(D_{ap} \cdot t)}} \right) \right]$$

[Ecuación 3.5] Ley de Fick.

Siendo,

$C(x, t)$ Concentración a distancia x y tiempo t (% en peso)

x Profundidad (m)

t Tiempo (s)

C_s Concentración en la superficie (% en peso)

erf Ecuación de la función de error

D_{ap} Coeficiente de difusión aparente de transporte de cloruros (m^2/s)

La determinación del coeficiente de difusión en el hormigón mediante parámetros microestructurales en la mayoría de los casos es muy complicada, por ello es necesario acudir a la determinación experimental.

Mediante modelos semi-empíricos (ver apartado 0) podemos expresar la función $C(x, t)$ como una única variable K mediante la siguiente fórmula:

$$K = \frac{x}{\sqrt{t}}$$

[Ecuación 3.6] Determinación del coeficiente de difusión.

Siendo:

- K Coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales (mm/años^{0,5}).
- x Profundidad de penetración (mm).
- t Tiempo (años).

Nilsson [2000] propuso una expresión para relacionar los coeficientes de difusión efectivo y aparente. En ella se incluye la influencia de la porosidad y de la variación de concentración de los iones en la disolución.

$$D_{ap} = \frac{D_{ef}}{\varepsilon \cdot \left(1 + \frac{\partial C_s}{\partial C_l}\right)}$$

[Ecuación 3.7] Relación entre el coeficiente de difusión aparente y efectivo.

Siendo:

- ε Fracción volumétrica de los poros en el hormigón.
- C_s Concentración del ión cloruro en el sólido (mol/cm³)
- C_l Concentración de ión cloruro en líquido (mol/cm³)
- D_{ef} Coeficiente de difusión efectivo (cm²/s)
- D_{ap} Coeficiente de difusión aparente (cm²/s)

3.2.7. Medida de la velocidad de corrosión.

3.2.7.1. Técnicas tradicionales.

Las técnicas tradicionales consisten en la eliminación del hormigón que envuelve el acero corroído para posteriormente examinar y evaluar el efecto de la corrosión en dichas armaduras. Se suelen extraer las barras para poder determinar la pérdida de sección transversal una vez limpias.



Ilustración 3.10. Armadura al descubierto.

Estas técnicas no sirven para determinar las zonas donde puede estarse produciendo la corrosión sin síntomas visibles de ello.

3.2.7.2. Técnicas electroquímicas.

Las técnicas electroquímicas nos dan información acerca del proceso de corrosión pero no nos indican el estado de deterioro del acero.

Para obtener información que nos permita estimar la intensidad de corrosión necesitamos inducir una alteración al sistema, que se consigue mediante procedimientos electroquímicos, imponiendo una señal eléctrica de potencial y estudiando la respuesta en corriente del sistema.

4. Tratamiento de la normativa sobre la durabilidad.

4.1. EHE.

La EHE define la durabilidad de una estructura de hormigón como:

“La capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.”

Para conseguir una estructura durable se deben de considerar todos los factores que puedan dar lugar a la degradación del hormigón y se debe aplicar esta estrategia a cada una de las fases de proyecto, ejecución y uso de la estructura.

Durante la realización del proyecto se debe tener en cuenta la intensidad previsible del medio agresivo a la hora de realizar las dosificaciones, de elegir los materiales (muy importante seguir las recomendaciones de la norma cuando escojamos el tipo de cemento) y las formas estructurales, elección del espesor de recubrimiento (parámetro de gran importancia para lograr una protección adecuada de las armaduras durante la vida útil de la estructura), así como los procedimientos de puesta en obra del hormigón.

Durante la fase de ejecución se debe tener especial cuidado en la operación de curado del hormigón ya que éste influye notablemente en la durabilidad.

La norma define la durabilidad del hormigón como:

“La capacidad de comportarse satisfactoriamente frente a las acciones físicas o químicas agresivas y proteger adecuadamente las armaduras y demás elementos metálicos embebidos en el hormigón durante la vida de servicio de la estructura”.

Para conseguir la durabilidad del hormigón se deben cumplir los requisitos que la norma establece en cuanto a máxima relación agua/cemento, mínimo contenido de cemento, mínimo contenido de aire ocluido y la utilización de cementos especiales si es el caso.

Durabilidad en el hormigón armado

Para garantizar la durabilidad del hormigón y conseguir una buena protección de las armaduras contra la corrosión se debe obtener la permeabilidad mínima del hormigón. Para ello se necesitan relaciones a/c suficientemente bajas, una buena compactación, el contenido adecuado de cemento y la suficiente hidratación del mismo mediante un buen curado.

Para comprobar la permeabilidad del hormigón se puede realizar la prueba de profundidad de penetración de agua bajo presión según la UNE-EN 12390-8.

La instrucción establece que un hormigón es suficientemente impermeable al agua si se cumple simultáneamente que:

Clase de exposición ambiental	Profundidad máxima	Profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	≤50 mm	≤30 mm
IIIc, Qc, Qb, (sólo en el caso de elementos pretensados)	≤30 mm	≤20 mm

Tabla 4.1. Criterios de valoración de resultados de ensayo de profundidad de penetración de agua a presión (Art. 37.3.3. EHE-08)

La impermeabilidad al agua es una condición necesaria pero no suficiente para garantizar la durabilidad puesto que la permeabilidad no es el único mecanismo de ingreso de los agentes agresivos en el hormigón ya que existen otros como la absorción de agua y la difusión de gases e iones.

En cuanto a las armaduras la norma establece que durante la vida útil de la estructura éstas deben de estar exentas de corrosión. Para ello se debe de atender a las especificaciones de la norma en cuanto a espesores de recubrimiento y a la agresividad del ambiente según las clases de exposición. Se limita la utilización de materiales que contengan iones despasivantes como cloruros, sulfatos y sulfuros.

Cuando nos encontramos en el caso de agresividad extraordinaria se debe recurrir a métodos alternativos especificados en el Anejo 9 (novedad de la norma actual frente a la anterior del 98).

En el Anejo 9 se establecen las fórmulas semiprobabilistas para la comprobación del Estado Límite de Durabilidad, al cual define como:

“Fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.”

Para la comprobación del ELD se debe cumplir la condición siguiente:

$$t_L > t_d$$

[Ecuación 4.1] Comprobación del Estado Límite de Durabilidad.

Siendo t_L el valor estimado para la vida útil y t_d el valor de cálculo de la vida útil.

La vida útil de cálculo se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$t_d = \gamma_d \cdot t_g$$

[Ecuación 4.2] Vida útil de cálculo.

Siendo:

t_d Vida útil de cálculo.

γ_d Coeficiente de seguridad de vida útil, para el que se adoptará el valor $\gamma_d = 1,10$.

t_g Vida útil de proyecto.

Con esto se trata de establecer un procedimiento para verificar que el tiempo necesario para que los agresivos produzcan un ataque significativo sea mayor que el tiempo estimado en el diseño para la vida útil de la estructura.

Esta información se ampliará en el apartado 6 en el que se desarrollan los modelos de predicción de la durabilidad.

4.2. ACI.

La normativa ACI-318R-08 en el Capítulo 4 “Durability requirements” especifica que el valor de la resistencia característica será el mayor de los valores

requeridos para la durabilidad y para los requisitos de resistencia estructural. Las dosificaciones del hormigón deberán ser proporcionadas para cumplir con la máxima relación agua cemento (a/c, en inglés w/c) y otros requisitos en función de la clase de exposición asignada al elemento estructural de hormigón.

Las clases de exposición se centran en el ataque por sales de hielo-deshielo, sulfatos y cloruros.

4.3. Eurocódigo.

Según el Eurocódigo 2 en su capítulo 4:

“Una estructura durable debe cumplir los requisitos de comportamiento en servicio, resistencia y estabilidad a lo largo de la vida útil para la que ha sido proyectada, sin una pérdida significativa de utilidad o un mantenimiento excesivo no previsto.”

Dice que se deben considerar las condiciones ambientales y los efectos que se deriven de ellas.

En cuanto a la protección frente a la corrosión de las armaduras dice que:

“Depende de la densidad, calidad y espesor del recubrimiento de hormigón y de la fisuración. La densidad y calidad del recubrimiento se alcanzan mediante el control de la relación máxima de agua/cemento y del contenido mínimo de cemento”.

En el Anexo E de esta norma se exponen las clases resistentes indicativas para durabilidad y dice lo siguiente:

“La elección de un hormigón de durabilidad adecuada para la protección frente a la corrosión de la armadura y al ataque al hormigón, requiere considerar su composición. Esto puede requerir una resistencia a compresión del hormigón mayor que la requerida por el cálculo estructural. La relación entre las clases resistentes de hormigón y las clases de exposición se pueden describir mediante clases resistentes indicativas”.

Durabilidad en el hormigón armado

Clases de exposición conforme a la tabla 4.1										
Corrosión										
	Corrosión provocada por carbonatación				Corrosión provocada por cloruros			Corrosión provocada por cloruros de origen marino		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Clase resistente mínima indicativa	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37	C35/45	
	Sin riesgo	Ataque por hielo/deshielo				Ataque químico				
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3			
Clase resistente mínima indicativa	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37		C35/45			

Tabla 4.2. Clases resistentes mínimas indicativas (Eurocódigo 2).

5. Evaluación de la durabilidad del hormigón armado. Resistividad eléctrica.

5.1. Indicadores de corrosión. Definición.

Se llama indicador de durabilidad a las propiedades medidas en el hormigón que pueden reflejar aspectos de la microestructura o del transporte de moléculas e iones en su interior.

D'Andrea (2010) define los indicadores de corrosión como aquellos que se basan en complementar las especificaciones prescriptivas de la normativa (como contenido mínimo de cemento, relación a/c...), por algunos criterios basados en propiedades que reflejen el comportamiento del hormigón. Prevé el uso de estos indicadores para predecir la vida útil de la estructura de hormigón armado proyectada.

Deben ser fácilmente cuantificables y reproducibles y deben de tener un procedimiento de ensayo claramente definido.

D'Andrea (2010) propone la utilización de estos indicadores para el diseño y producción del hormigón y la predicción de su vida útil.

5.2. Ensayos de información.

Los ensayos de información son aquellos que nos informan sobre características, físicas, químicas o mecánicas del hormigón.

La mayoría de los ensayos disponibles están orientados a la estimación de la resistencia a compresión del hormigón mediante el conocimiento de alguna de sus propiedades físicas o mecánicas. En los últimos años muchos investigadores han comenzado a utilizarlos para el estudio de la durabilidad del hormigón pues es tan importante como la determinación de la resistencia de éste.

Existen multitud de ensayos pero muy pocos han sido lo suficientemente estudiados y utilizados, y los menos han sido regulados por normativas. Los métodos disponibles se pueden clasificar según su finalidad o según la información que se requiera (ver Tabla 5.1) y según su naturaleza en destructivos y no destructivos. Los ensayos de tipo destructivo son aquellos que producen una rotura de la pieza o el colapso de la zona estructural investigada y los no destructivos son aquellos que producen daño nulo o casi nulo.

Durabilidad en el hormigón armado

Información requerida	Métodos disponibles
Comportamiento en servicio, o hasta casi-rotura de un elemento estructural	Prueba de carga, con medición de flechas y niveles tensionales del hormigón y armaduras
Resistencia del hormigón	Testigos Esclerómetro Ultrasonidos Pull-out Pull-off y Break-off Resistencia a la penetración
Propagación de la fisuración	Ultrasonidos Emisión acústica
Coqueras internas y efectividad del proceso de compactación	Radiografías Testigos Ultrasonidos Técnicas de impulso-eco
Densidad	Radiometría
Permeabilidad	Ensayos de absorción Ensayos de flujo (Flow test) Ensayos de capilaridad
Contenido de humedad	Métodos nucleares Resistividad eléctrica Absorción de microondas
Contenido de cemento	Análisis químico Métodos nucleares
Propiedad de la mezcla y de sus constituyentes	Análisis químico Testigos Métodos micrométricos
Detección de armaduras	Métodos magnéticos Radiografías rayos X Radiografías rayos γ
Grado de deterioro del hormigón	Análisis químico Ultrasonidos Métodos micrométricos

Resistencia a la abrasión y grado de solidez	Esclerómetro Métodos físicos Termografía por infrarrojos
--	--

Tabla 5.1. Clasificación de los métodos de ensayo disponibles (Hostalet, 1994).

Para la evaluación de la durabilidad del hormigón los procedimientos más utilizados son aquellos que están basados en la microestructura del material. Para la elección del método o métodos que vayamos a utilizar como indicador de corrosión *D'Andrea (2010)* propone seguir los siguientes criterios:

- Existencia de normativa que lo avale.
- Capacidad teórica de reflejar propiedades intrínsecas del hormigón.
- Uso corriente en los estudios científicos para caracterizar el material y su microestructura. Aceptación por la comunidad científica.

Además de estos ensayos aconseja la elección de ensayos de referencia capaces de reflejar directamente el avance del agresivo en el interior del material para posteriormente analizar la viabilidad de los indicadores de corrosión.

Clasifica los métodos de ensayo como *Directos* o *Indirectos* según la relación entre la propiedad obtenida por la técnica y el deterioro del hormigón armado.

Los métodos *Indirectos* son por tanto aquellos que reflejan una propiedad que caracterice al hormigón, tanto en relación con sus propiedades intrínsecas como con la capacidad de transporte de gases o líquido por la red de poros de su microestructura. Son métodos de ensayo indirectos: la resistencia a compresión, la profundidad de penetración de agua bajo presión, la porosidad por intrusión de mercurio, la permeabilidad al oxígeno, la absorción capilar y la medida de la resistividad eléctrica.

Los métodos *Directos* son aquellos que reflejan directamente los fenómenos de penetración de los iones cloruro y de la carbonatación en el interior del hormigón.

5.2.1. Resistencia a compresión.

Aunque no guarda relación directa con la durabilidad es indispensable para caracterizar el hormigón y evaluar su capacidad resistente. En él se basan los proyectistas a la hora de elegir un hormigón para las estructuras de sus

proyectos. Para la realización del ensayo se deben seguir los procedimientos indicados en la UNE EN 12390-3.



Ilustración 5.1. Probeta sometida al ensayo de resistencia a compresión.

5.2.2. Profundidad de penetración al agua bajo presión.

Se realiza para determinar la capacidad permeable del hormigón, propiedad importante en relación a la durabilidad. La EHE 08 hace referencia a este ensayo y adopta la UNE EN 12390-8 para la realización del mismo.



Ilustración 5.2. Probeta sometida a ensayo de penetración de agua bajo presión.

5.2.3. Porosidad.

Es una de las propiedades del hormigón más importantes en cuanto a la durabilidad ya que influye directamente en las propiedades mecánicas y de transporte del agresivo.

Normalmente para determinar la porosimetría del hormigón se utiliza el método de intrusión de mercurio siguiendo el procedimiento de la Norma ASTM D4404, por el cual podemos estimar la distribución y tamaño de los poros y calcular el porcentaje de volumen de huecos en relación con el volumen total.

5.2.4. Permeabilidad al O₂.

Representa la permeabilidad del hormigón, propiedad muy importante que nos informa sobre el avance de los agresivos en el interior del material. Depende de la porosidad del material (de la distribución de poros, conectividad, tortuosidad, etc.), de la humedad interior, y de la presencia o no de microfisuras.

El método de ensayo ha sido descrito por la Asociación Europea de Cemento en 1989 y, en España, mediante la norma UNE 83981 aprobada en 2007.

5.2.5. Coeficiente de absorción capilar.

El transporte de agua por capilaridad en el hormigón depende de la relación agua-cemento, de la granulometría de los áridos, del curado y de la humedad de la muestra.

Fagerlund desarrolló un método de ensayo que fue adoptado por la normativa española con la norma UNE 83982.

5.2.6. Avance del fenómeno de la carbonatación.

- Método natural: Exposición al ambiente exterior, protegido de la lluvia.

En él se refleja directamente la profundidad de carbonatación alcanzada en el período de tiempo t , bajo condiciones ambientales reales. En España se adoptó la norma europea en la UNE 83993.

- Método acelerado:

Se basa en la exposición de una muestra de hormigón a una atmósfera concentrada de dióxido de carbono durante un intervalo de tiempo determinado y a con temperaturas elevadas para así acelerar el proceso.

El procedimiento no está consensuado por ello se adoptan los criterios de la norma UNE EN 13295 sobre "*Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón*".

5.2.7. Avance de los iones cloruros.

- Difusión natural: exposición en ambiente marino.

Se trata de un ensayo que refleja el avance de los iones cloruro en el interior del hormigón en ambiente marino real, en el que se ve afectado además por los factores atmosféricos como el viento, la lluvia, etc.

- Difusión natural: Método de la piscina de NaCl.

Es capaz de reflejar en un período relativamente corto, la penetración del agresivo a partir de la difusión natural, teniendo de antemano la concentración de cloruros y las demás variables.

- Migración: Método multiregimen.

Se trata de un método acelerado en condiciones controladas que posibilita obtener los resultados en un período corto, y que determina de forma directa los dos coeficientes de difusión de cloruros: el coeficiente en estado estacionario y el coeficiente en estado no estacionario. El método está normalizado mediante la UNE 83987 de 2008.

5.3. Resistividad eléctrica como indicador de corrosión.

Los métodos eléctricos utilizados en edificación como indicadores de corrosión son: la medida de la resistividad eléctrica, la medida del potencial de corrosión y la medida de la resistencia a la polarización (o velocidad de corrosión). Estos dos últimos métodos están orientados a la caracterización del estado de corrosión de las armaduras y son no-destructivos, sin embargo, la medida del potencial de corrosión necesita la perforación del hormigón de revestimiento en un punto para conectar un electrodo a la red de armaduras.

5.3.1. Definición de resistividad eléctrica de un material.

La resistividad eléctrica es la característica específica de un material para oponerse a la conducción de la corriente eléctrica a través de él. La resistividad

(ρ) se mide en ohm.m ($\Omega \cdot m$) en las unidades del sistema internacional, pero podemos encontrar igualmente otras unidades como $\Omega \cdot cm$ ó $k\Omega \cdot cm$.

$$R = \frac{V}{I} = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

[Ecuación 5.1] Ley de Ohm.

Donde R es la resistencia eléctrica que se mide aplicando un voltaje V y midiendo el paso de corriente I. Esa relación es igual a la resistividad por el factor geométrico l/A , es decir por la l (distancia entre electrodos) y A (área transversal de paso de la corriente).

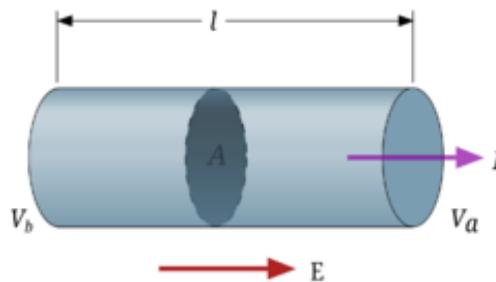


Ilustración 5.3. Gráfico representativo de la Ley de Ohm.

Su inversa, la conductividad eléctrica (σ), caracteriza la capacidad de la sustancia para facilitar la conducción de la corriente eléctrica a través de ella. Se da en siemens por metro (S/m), pero podemos encontrarla igualmente expresada en mho.m, es decir, $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$.

5.3.2. Mecanismos de conducción de la corriente eléctrica en los materiales.

La conducción eléctrica en un material puede manifestarse de tres formas: la conducción electrónica, la conducción electrolítica y la conducción dieléctrica.

5.3.2.1. La conducción electrónica.

La conducción electrónica en los materiales que contienen electrones libres (como los metales) se describe por la Ley de Ohm $\Delta V = R \cdot I$ [Ecuación 5.1].

5.3.2.2. La conducción electrolítica.

La conducción electrolítica se debe a la circulación de las cargas eléctricas transportadas por los iones que se desplazan en un electrolito bajo el efecto de un potencial. El esqueleto granular del hormigón es generalmente un muy mal conductor. Como en las rocas, la conducción de corriente eléctrica se hace esencialmente a través de la porosidad abierta por medio de los fluidos intersticiales, generalmente el agua.

5.3.2.3. La conducción dieléctrica.

La conducción dieléctrica está ligada a los desplazamientos de cargas sometidas a un campo eléctrico externo alternativo. Este tercer modo de conducción es dominante en los materiales muy poco conductores. El parámetro más importante es la permisividad absoluta (ϵ).

La influencia de este tipo de conducción en el hormigón es menor si trabajamos con señales eléctricas de baja frecuencia o continua, este es el caso para las técnicas de resistividad.

5.3.3. Mecanismos de conducción de la corriente eléctrica en el hormigón.

El hormigón es un material heterogéneo. Desde el punto de vista eléctrico puede considerarse como un material trifásico constituido por elementos sólidos poco conductores (los áridos) que están inmersos en un medio conductor (la pasta de cemento) y cuya porosidad está parcialmente compuesta de aire (no conductor).

Whittington et al. [1981] demostraron que la conducción eléctrica en el hormigón viene dada esencialmente por la pasta de cemento. Los iones libres se desplazan en los poros, haciendo circular así una corriente eléctrica. La circulación de la corriente eléctrica puede entonces seguir tres caminos:

- a. La corriente eléctrica circula a la vez a través de los áridos y la matriz. La resistividad aparente está entonces condicionada por las características de las dos fases.
- b. La corriente atraviesa únicamente la matriz conductora, la resistividad aparente es baja.

- c. La corriente circula únicamente por los áridos que están solos para condicionar la resistividad aparente.

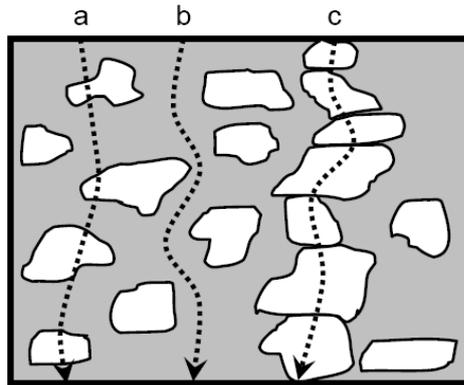


Ilustración 5.4. Circulación de la corriente eléctrica a través del hormigón.

La porosidad es un parámetro esencial que condiciona las posibilidades de circulación de los fluidos (por lo tanto de los electrolitos) en una matriz.

La influencia de otros parámetros tales como la naturaleza de los áridos, su grado de humedad y su geometría es también algo a tener en cuenta. Sin embargo, es la capacidad de circulación de los electrolitos en la matriz lo que condiciona más el valor de la resistividad.

5.3.3.1. Teorías de la resistividad.

Varias teorías se han desarrollado para modelar la resistividad eléctrica (o la conductividad) del hormigón no armado y como circula la corriente eléctrica a través de él. Estas teorías pueden dividirse en dos categorías: la teoría de los materiales multifases [Maxwell, 1873] y la teoría del factor de formación [Archie, 1942].

- Teoría de los materiales multifases.

Teoría independiente de las características físicas del hormigón. Su objetivo es proporcionar la resistividad eléctrica del hormigón en función de la resistividad eléctrica de cada componente de la mezcla, de sus fracciones de volumen y de sus formas. El hormigón se considera como un material compuesto de áridos aislantes (inclusiones) y de una pasta conductora (matriz).

Uno de los primeros modelos de propiedades eléctricas de los materiales multifases tuvo lugar en el siglo XIX por Maxwell [1873]. Según él, la

conductividad eléctrica del compuesto puede expresarse en términos de resistividad de las diferentes fases (matriz y áridos):

$$\frac{\frac{\rho_m}{\rho} - 1}{\frac{\rho_m}{\rho} + 2} = V_a - \frac{\frac{\rho_m}{\rho_a} - 1}{\frac{\rho_m}{\rho_a} + 2}$$

[Ecuación 5.2] Resistividad de materiales multifases.

Siendo:

ρ Resistividad eléctrica del compuesto (en $\Omega \cdot m$)

ρ_m Resistividad eléctrica de la matriz (en $\Omega \cdot m$)

ρ_a Resistividad eléctrica de los áridos (en $\Omega \cdot m$)

V_a Fracción de volumen del árido.

La resistividad eléctrica de los áridos se puede considerar infinita con respecto a la de la matriz. La fracción de volumen de los áridos se expresa como:

$$V_a = 1 - V_m$$

[Ecuación 5.3] Fracción de volumen de los áridos.

Siendo V_m el volumen de la matriz. La ecuación de Maxwell se reduce entonces a:

$$\rho = \rho_m \cdot \frac{3 - v_m}{2 \cdot v_m}$$

[Ecuación 5.4] Ecuación de Maxwell.

- Teoría del factor de formación.

Esta teoría utiliza relaciones empíricas establecidas entre la resistividad del material y la resistividad de la fase conductora.

La resistividad eléctrica puede deducirse si conocemos la resistividad del fluido intersticial, la porosidad del material y el grado de saturación.

Archie [1942] demostró la existencia de una relación entre la resistividad de la roca saturada y la resistividad del fluido que satura la roca. Esta relación se llama factor de formación F:

$$F = \frac{\rho}{\rho_0} = a \cdot \varepsilon^{-m}$$

[Ecuación 5.5] Factor de formación.

Siendo:

- ρ Resistencia eléctrica de la roca saturada
- ρ_0 También llamada ρ_w , resistividad eléctrica del fluido contenido en la roca.
- a Parámetro de litología.
- ε Porosidad de la roca.
- m Parámetro que depende de la estructura de los poros: conectividad y tortuosidad.

5.3.4. Medida de la resistividad.

Se puede realizar mediante unos electrodos colocados en las caras paralelas de las probetas o usando el "método de las 4 puntas". Ambos métodos están regulados por las normas UNE 83988-1 y UNE 83988-2.

Existen otros métodos en función del número de electrodos que tenga el aparato, pero los anteriores son los más comúnmente utilizados.

5.3.4.1. Método directo o método de referencia. [UNE 83988-1]

Este método consiste en aplicar un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta.

Las probetas a ensayar no podrán contener ninguna armadura en su interior. Pueden ser probetas de hormigón endurecido fabricadas según la norma UNE-EN 12390-2 o probetas testigo de hormigón extraídas según la norma UNE-EN 12504-1. Pueden ser cilíndricas o prismáticas y sus bases deben ser perfectamente paralelas y planas. Para la realización del ensayo las probetas deben estar saturadas de agua.

Se utilizará un resistivímetro que es el aparato que inducirá una intensidad de corriente sobre la probeta aportando también una medición de la intensidad y el

potencial. Se hará circular una corriente alterna de 30mA para probetas cúbicas y 50mA para probetas cilíndricas con una frecuencia inferior a 500Hz.



Ilustración 5.5. Método directo o de referencia.

Los electrodos a utilizar serán dos mallas de acero tupidas o chapas de acero, cobre o cualquier otro metal conductor que tendrán que tener las dimensiones de las bases de la probeta.

Se utilizarán también dos esponjas finas de dimensión igual que la de los electrodos y que se colocarán entre las chapas o mallas y las bases de la probeta. Éstas deberán ser humedecidas para realizar el ensayo.

Para el cálculo y expresión de los resultados seguiremos los siguientes pasos:

- Cálculo de la resistencia eléctrica del hormigón.

Partimos de la Ley de Ohm $R = V/I$ [Ecuación 5.1]. Obtendremos la resistencia eléctrica del hormigón por medio de esta fórmula:

$$R_e = R_{e+sp} - R_{sp}$$

[Ecuación 5.6] Resistencia eléctrica del hormigón.

Donde,

R_e Resistencia eléctrica del hormigón.

R_{e+sp} Resistencia eléctrica del hormigón más la de las esponjas.

R_{sp} Resistencia eléctrica de las esponjas.

- Cálculo de la constante de celda.

La constante de celda se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k = \frac{S}{L}$$

[Ecuación 5.7] Constante de celda para el método directo.

Donde,

S Área de la cara de la probeta en la que se sitúa la esponja, en m^2

L Altura de las probetas, en m .

- Cálculo de la resistividad eléctrica y expresión de los resultados.

Una vez obtenidos los parámetros anteriores la resistividad eléctrica se calcula mediante la expresión:

$$\rho_e = k \cdot R_e$$

[Ecuación 5.8] Resistividad eléctrica.

Donde,

ρ_e Resistividad eléctrica, en $\Omega \cdot m$.

k Constante de celda, en m .

R_e Resistencia eléctrica, en Ω .

Se deberá expresar la resistividad eléctrica en $\Omega \cdot m$ en números enteros y para cada probeta se expresará con el valor medio de las dos medidas realizadas.

5.3.4.2. Método de las cuatro puntas o de Wenner. [UNE 83988-2].

El método consiste en la aplicación de una corriente entre dos electrodos situados en la generatriz de la probeta, y medir el voltaje en otros dos electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. Nos proporciona la resistencia eléctrica del hormigón conociendo la distancia entre los electrodos y las dimensiones de la muestra.

Las probetas a utilizar fabricadas siguiendo una de las normas anteriormente mencionadas. No podrán contener ninguna armadura en su interior y deberán

ser cilíndricas con una altura mínima de 200mm. Al igual que en el ensayo anterior deberán estar saturadas previamente.

Para la medición se utilizará un medidor de resistencia eléctrica (resistivímetro) de cuatro puntas o tipo Wenner. Éste inducirá a la probeta una corriente alterna de hasta 40mA con una frecuencia inferior a 500Hz.



Ilustración 5.6. Resistivímetro tipo Wenner.

Los electrodos serán cuatro puntas de cobre u otro conductor de metal de diámetro entre 4 y 6 mm acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. Cada electrodo contará con una esponja individual humedecida previamente.

Para el cálculo y expresión de los resultados seguiremos los siguientes pasos:

- Cálculo de la resistencia eléctrica.

Calculamos la resistencia eléctrica según la Ley de Ohm $R_e = V/I$ (Ω) **[Ecuación 5.1]**.

- Cálculo de la constante de celda.

Para el caso de probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm, se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$k = \frac{2\pi a}{\chi}$$

[Ecuación 5.9] Constante de celda para el método Wenner.

Donde,

- a Distancia entre electrodos (5 cm)
- χ Constante de forma. Se considera de valor 1,65 en el caso de muestras cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm.

Para otros tamaños y configuraciones de probetas se deberá calcular la constante de forma χ según la norma UNE 83988-1.

- Cálculo de la resistividad eléctrica y expresión de los resultados.

El cálculo y la expresión de los resultados serán los mismos descritos en el apartado 5.3.4.1. para el método directo.

5.4. Factores que influyen en las propiedades eléctricas del hormigón.

Podemos distinguir diferentes familias de factores que afectan al hormigón:

- Parámetros de formulación del hormigón (tipo de cemento, de áridos, relación a/c, porosidad...)
- Aditivos en el hormigón (cenizas volantes, humo de sílice...)
- Parámetros externos, es decir, las condiciones de medida 'in situ' (humedad superficial, temperatura).
- Parámetros estructurales, que dependen de las características geométricas de la estructura.
- Alteraciones del hormigón (carbonatación, fisuración y delaminación)

5.4.1. Influencia de los componentes del hormigón.

5.4.1.1. El cemento.

El cemento es el que origina la circulación de los diferentes iones en la matriz porosa y asegura la conducción electrolítica en el material. Las especies químicas presentes en la solución intersticial dependen por lo tanto del tipo de cemento utilizado. El tipo de cemento, el contenido de álcali o el contenido de aluminatos son los elementos de la química de los cementos que consideramos que influyen en las propiedades del cemento.

Hammond et al. [1955] estudiaron el efecto de tres tipos de cemento, de diferentes contenidos de aluminatos (cemento Portland, cemento de alta resistividad inicial y cemento aluminoso), sobre la resistividad eléctrica de un hormigón a 28 días, la resistividad varía un factor 20 entre un hormigón fabricado con un cemento Portland tradicional y un cemento de alto contenido en aluminatos.

Monfore [1968] estudió el efecto sobre la resistividad eléctrica del hormigón de dos tipos de cemento de contenido en álcalis diferente. Las medidas realizadas a 28 días después de la fabricación muestran que la resistividad eléctrica varía poco.

Hughes et al. [1985] estudiaron la influencia sobre la resistividad eléctrica del contenido de cemento (contenido de 300, 350 y 400 kg/m³). Para una relación $a/c=0,50$, se observa una disminución lineal de la resistividad de un 20% con el aumento de la proporción de cemento de 300 a 400 kg/m³. Con una relación $a/c=0,55$, esta disminución es del 25%.

Quidel Cortés (2008) estudió la influencia del tipo de cemento sobre la resistividad eléctrica variando el porcentaje de puzolana presente en el cemento entre el 0% y el 15%. Las mezclas con cemento Portland Puzolánico presentan un aumento de resistividad eléctrica de hasta un 38% sobre el cemento Portland puro a 7 días; esto se debe a que, a medida que transcurre el tiempo de curado, las mezclas con adiciones de puzolana presentan una estructura de pasta de cemento con capilares de poros de menor tamaño.

González Sersen (2011) estudió la adición de escorias de alto horno y puzolanas en la composición cementícea y su relación con la resistividad eléctrica. De este estudio deduce que las dosificaciones con adiciones puzolánicas son mucho mejores de cara a aumentar la resistividad del hormigón, pero además tienden a aumentar la resistividad con el tiempo. Los hormigones Portland puro presentan un mayor número de capilares de poros que hacen que aumente la conductividad eléctrica y disminuya la resistividad.

5.4.1.2. Los áridos.

Monfore [1968] estudió la influencia de la naturaleza de los áridos sobre la resistividad eléctrica: el mármol o el granito son mucho más resistentes que la arenisca o la calcárea. Esto es debido a la densidad de cada tipo de árido, los más densos normalmente son más aislantes.

Morris et al. [1996] añaden que la influencia del tipo de árido sobre la variabilidad de las medidas es baja pero notable y que, cuanto mayor sea el contraste de resistividad eléctrica entre el árido y el cemento, más disminuye la variabilidad de la medida. También dice que cuanto mayor sea el tamaño

máximo del árido, mayor será la variabilidad de las medidas eléctricas. *Lataste [1998]* indica que la variabilidad de las medidas aumenta con la heterogeneidad de la distribución granulométrica.

Woelfl et al. [1980] muestran que podemos expresar la evolución de la resistividad eléctrica en función de la relación árido/cemento: cuanto mayor sea la cantidad de árido en el hormigón, mayor será la resistividad eléctrica aparente.

5.4.1.3. La relación agua-cemento.

Se trata de la relación entre la masa de agua (A) y la masa del cemento (C), utilizadas para la fabricación del hormigón. Es un parámetro importante que controla el rendimiento del hormigón (resistencia mecánica y durabilidad). Además, juega un papel importante en la microestructura del hormigón y la concentración iónica de la solución de los poros.

La resistividad eléctrica está influenciada por la relación a/c. *Monfore [1968]* estudió la relación entre la resistividad eléctrica y esta relación para pastas de cemento. Él demostró que la resistividad aumenta cuando la relación a/c disminuye: una pasta de cemento con relación a/c de 0,40 tiene una resistividad eléctrica dos veces mayor que una con una relación a/c de 0,60.

Quidel Cortés (2008) estudió la influencia de la relación a/c sobre la resistividad eléctrica del hormigón. Demostró que el aumento de la relación a/c conlleva una disminución de la resistividad, esto es debido a que a medida que aumenta la relación a/c se obtiene una mayor cantidad de capilares de poros, consiguiendo así un mayor nivel estructural que facilita la conductividad eléctrica.

La relación a/c influye en el flujo de iones que pasa en el interior del hormigón, teniendo que para un mismo tipo de hormigón a menor relación a/c, menor es la intensidad de corriente que pasa a través de él. Esto se debe a que a menor relación a/c menor es la dispersión de las partículas del cemento y por ello menor el volumen de poros; y con ello se dificulta el desplazamiento de los electrones en la microestructura del hormigón y aumenta la resistividad eléctrica. Una mezcla con menor relación a/c presenta una matriz menos permeable a la solución de poros y por tanto mayor resistividad eléctrica (*González Sersen, 2011*).

5.4.1.4. La porosidad.

Como se explica en el apartado 2.2.2., la porosidad total se define como la relación entre el volumen total de huecos y el volumen total de material y la porosidad abierta es la relación entre el volumen total de poros intercomunicados y el volumen total del material.

La conducción de la corriente eléctrica en el hormigón depende de la porosidad abierta y de sus características (cantidad, tamaño, conectividad, tortuosidad). Después de muchos estudios, para un hormigón saturado, cuanto mayor es la porosidad abierta, menor es la resistividad eléctrica. [Lataste, 1998]

Para muchos autores, la medida de la resistividad eléctrica se utiliza como herramienta de laboratorio para evaluar las características de la porosidad del hormigón. *Andrade et al. (2000)* afirman que la medida eléctrica es un parámetro que permite caracterizar la conectividad de los poros.

La porosidad es la ruta de acceso de los agentes exteriores al interior del hormigón. Por tanto la medida de la resistividad eléctrica es una herramienta que permite calificar la sensibilidad del hormigón a las agresiones exteriores.

Cuanto mayor sea el volumen de poros en la fase acuosa más disminuye la resistividad eléctrica del hormigón.

5.4.1.5. El grado de saturación.

En relación a lo que se indica en el apartado 3.2.4., cuando el hormigón se encuentra semi-saturado la conducción de los iones ocurre a través de la capa de agua adsorbida en las paredes de los poros, mientras que en hormigones muy secos la conductividad disminuye sensiblemente y el hormigón actúa como aislante.

Cuanto mayor sea el grado de saturación del hormigón menor será la resistividad eléctrica de éste, puesto que cuando los poros están totalmente saturados de agua la disponibilidad de oxígeno en los poros es mínima impidiendo así la buena circulación de los iones. Por ello la resistividad eléctrica alcanzará su máximo cuando los poros estén semi-saturados.

5.4.1.6. Los iones cloruro.

Henry [1964] estudió la influencia de la concentración de cloruros en el agua de amasado sobre la resistividad eléctrica del hormigón, a medida que la concentración de iones cloruro aumenta en el hormigón la resistividad eléctrica disminuye.

Tal y como se explica en los apartados 3.2.1. y 3.2.6., el mecanismo de transporte de iones cloruro viene determinado por la estructura de poros del hormigón (diámetro, volumen y conectividad) y por el grado de saturación de dichos poros. Un hormigón poco poroso y con baja interconexión entre ellos tendrá baja permeabilidad, baja difusividad, baja absorción capilar y baja conductividad eléctrica, por consiguiente, su resistividad eléctrica será alta al igual que la resistencia a la penetración de iones cloruro (*González Sersen, 2011*).

5.4.2. Influencia de las adiciones en el hormigón.

5.4.2.1. Cenizas volantes.

Las cenizas volantes son puzolanas artificiales, es decir, materiales silíceos. Sus partículas son esféricas (diámetro de 1 a 100 μm) y muy finas. Así que interactúan fácilmente con el hidróxido de calcio producido por la hidratación del cemento.

La adición de cenizas volantes a una dosificación de hormigón tiene por objeto reducir los poros capilares del material mediante la reacción puzolánica, esto influye en la conducción de la corriente eléctrica en el hormigón reduciéndola (ver apartado 5.4.1.4.). Por ello la presencia de cenizas volantes aumenta la resistividad eléctrica del hormigón de manera importante.

5.4.2.2. Humo de sílice.

La adición de humo de sílice, cuyo tamaño es 100 veces menor que el de las partículas de cemento Portland, provoca un cambio en la microestructura del hormigón y especialmente una disminución de la porosidad de la pasta.

La resistividad eléctrica aumenta con la presencia de humo de sílice en el hormigón debido a sus efectos tanto químicos (reacciona con el hidróxido de

calcio hidratado y forma el silicato de calcio hidratado CSH), como físicos pues rellena pequeños poros con finas partículas. Ayuda a la reducción de la porosidad en la zona de transición entre la matriz y el árido, lo que proporciona una microestructura más fuerte, con mayor densidad y menor volumen de poros interconectados para la conducción de cargas por iones.

5.4.3. Influencia de los factores externos.

5.4.3.1. Humedad de la superficie.

Para poder realizar medidas eléctricas sobre un paramento de hormigón, es necesario tener un grado de saturación elevado de la capa superficial para superar la resistencia de contacto entre los electrodos y el hormigón.

La humectación de la superficie aumenta el campo de utilización del método y mejora la repetibilidad de las mediciones.

5.4.3.2. Temperatura.

Con el aumento de la temperatura, la viscosidad del fluido disminuye y la movilidad de los iones responsables de la conducción de la corriente eléctrica aumenta (ver apartado 3.2.4.) lo que conlleva una disminución de la resistividad eléctrica.

La ley de *Rasch y Hinrichsen [1908]* nos da una relación entre la resistividad eléctrica y la temperatura:

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot e^A \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

[Ecuación 5.10] Relación entre resistividad eléctrica y temperatura.

Siendo:

ρ_1 Resistividad eléctrica a temperatura T_1 (en $\Omega \cdot m$)

ρ_2 Resistividad eléctrica a temperatura T_2 (en $\Omega \cdot m$)

T_1, T_2 Temperaturas (en K)

A Constante que depende del hormigón (en K)

5.4.4. Influencia del deterioro del hormigón.

5.4.4.1. La carbonatación.

Como ya hablamos anteriormente, la carbonatación entraña la disolución de la portlandita y ésta un aumento de la porosidad, seguido de la precipitación de la calcita que a su vez provoca la disminución de la porosidad. Esto se puede observar en los poros de mayor diámetro, aquellos que son esenciales para la conducción electrolítica. Además, a la carbonatación acompaña la disminución de la humedad del hormigón, lo cual acentúa el aumento de la resistividad aparente.

Según *Claisse et al. [1999]*, la permeabilidad del hormigón durante la carbonatación evoluciona de la misma forma que su resistividad eléctrica. Además, la creación y evolución de una capa superficial carbonatada induce a problemas de interpretación de la medida eléctrica: los resultados pueden indicar un hormigón compacto por lo tanto a priori sano. Una resistencia al contacto en la superficie demasiado elevada hace que la utilización de la medida eléctrica sea difícil de garantizar. Por todo ello se puede apreciar la dificultad para realizar las medidas eléctricas en este tipo de hormigón.

Millard et al. [1992] estudiaron los efectos de una capa superficial resistente carbonatada de hormigón en la medición de la resistividad aparente, con un dispositivo tipo Wenner. Con esta geometría, el espesor de la capa carbonatada tiene poco efecto sobre la resistividad aparente del material, ya que es pequeño en comparación con la separación entre electrodos. Comienza a detectarse para espesores equivalentes a la separación entre electrodos. Tal profundidad representa ya un espesor de carbonatación muy importante que puede haberse iniciado ya la corrosión de las armaduras. *Lataste [2002]* estudió el efecto de una capa carbonatada sobre la medida de la resistividad aparente. La resistividad aparente aumenta con el espesor carbonatado independientemente de la dirección de inyección a partir de una profundidad carbonatada de 2 mm.

Naar (2006) estudió la medida de perturbación de la resistividad eléctrica debida a la presencia de una capa resistente superficial carbonatada. Por un lado estudia el método para corregir el valor de la resistividad aparente medida conociendo el espesor de la capa carbonatada; y por otro lado estudia el método para estimar

el espesor de la capa carbonatada mediante la medida de la resistividad eléctrica.

Para esto último mide la resistividad eléctrica del hormigón en una zona sana ρ_2 y la resistividad eléctrica en una zona totalmente carbonatada ρ_1 . La resistividad aparente medida experimentalmente ρ_a depende de la profundidad del frente de carbonatación. Así, es posible calificar las variaciones relativas del espesor carbonatado a partir de medidas de resistividad realizadas en la superficie.

A medida que el espesor de la capa carbonatada tiende a cero, demuestra analíticamente que la resistividad aparente ρ_a tiende a ρ_2 . Cuando el espesor de la capa carbonatada tiende a $+\infty$, entonces la resistividad aparente ρ_a tiende a ρ_1 .

5.4.4.2. La reacción álcali-árido.

Tashiro et al. [1989] estudiaron la influencia de la reacción álcali-árido sobre las propiedades eléctricas del hormigón. Su trabajo se basó en la realización de cuatro tipos de morteros de los cuales dos fueron enriquecidos con álcalis para provocar la reacción. La resistividad eléctrica medida mediante electrodos integrados en el hormigón aumenta durante los 30 primeros días de curado. Este aumento es mucho más destacado en las probetas reactivas. Tashiro vincula este aumento a la expansión de las probetas provocada por la reacción. El autor propone la utilización de la resistividad eléctrica como indicador del grado de desarrollo de la reacción.

Bulsteel [2002] demostró que el contenido de álcalis presentes en la solución intersticial disminuye con el avance de la reacción. Dado que la resistividad eléctrica del hormigón está muy influenciada por la naturaleza de la solución intersticial y por el contenido de agua, se puede esperar que la reacción álcali-árido haga aumentar la resistividad eléctrica por el empobrecimiento en iones de la solución intersticial.

5.4.4.3. La fisuración y la delaminación.

Lataste [2002] estudió la influencia de la fisuración en la medida de la resistividad eléctrica. Demostró que la resistividad aparente depende de la resistividad de la fisura (fisura conductora o aislante) y de la orientación del

dispositivo de medición. Una inyección de corriente perpendicular a una fisura conductora no es capaz de detectarla. Las fisuras aislantes se detectan por contrastes de resistividad más débiles que las fisuras conductoras. Demostró también que existe una relación entre la profundidad de la fisura y la resistividad eléctrica. Las variaciones de la anisotropía eléctrica medidas sobre una fisura son más importantes cuanto más profunda es la fisura. También influye la abertura de la fisura, cuanto más aumenta ésta más aumentan las variaciones de la resistividad o de la anisotropía eléctrica.

En cuanto a la delaminación, *Lataste [2002]* demostró que las variaciones de resistividad aparentes confirman la sensibilidad del método a la presencia de una zona de delaminación. Esta alteración se detecta y localiza mediante la medida eléctrica, pero su profundidad es sólo estimada.

5.4.5. Variación de la resistividad con el tiempo.

D'Andrea (2010) expone que en los 20 primeros días después de la fabricación del hormigón la resistividad eléctrica de la pasta de cemento aumenta muy rápido. A los 30 días ya presenta entre el 70-90% de la resistividad que se obtiene a los 128 días. Cuanto mayor sea el tiempo de curado mayor será la resistividad eléctrica.

También explica que la resistividad aumenta en el tiempo hasta alcanzar un valor en el que se estabiliza a medida que se detiene la hidratación del cemento.

5.4.6. Relación frente al mecanismo de transporte difusivo del agresivo.

La resistividad eléctrica de un hormigón saturado nos informa de la microestructura de éste (porosidad, tamaño de poro, conectividad, tortuosidad) por ello está directamente relacionada con los mecanismos de transporte del agresivo.

Andrade [1993] expresó esta relación entre el mecanismo de difusión del agresivo y la resistividad eléctrica simplificando la fórmula de Nernst-Einstein:

$$D_s = K_{Cl,CO_2} \cdot \sigma = \frac{K_{Cl,CO_2}}{\rho_{sat}}$$

[Ecuación 5.11] Fórmula de Nernst-Einstein.

Siendo,

D_s Coeficiente de difusión en estado estacionario (no tiene en cuenta la interacción de los cloruros y de la carbonatación con las fases del cemento)

K_{Cl,CO_2} Constante que depende de la concentración exterior de los agresivos y del tipo de ambiente.

ρ_{sat} Resistividad del hormigón saturado.

σ Conductividad (inversa de la resistividad)

5.4.7. Relación frente a la corrosión activa.

La medida de la resistividad eléctrica es aplicable a la interpretación del valor de la velocidad de corrosión V_{corr} gracias a su relación con el contenido de humedad del hormigón (*D'Andrea, 2010*).

Cuando los poros están saturados de agua la resistividad eléctrica es mínima pero también lo es el acceso de oxígeno puesto que tiene que disolverse en el agua de los poros para poder llegar al interior del hormigón, por tanto la velocidad de corrosión se reduce por la falta de oxígeno (ver apartado 3.2.4.). Al empezar a secarse los poros estando semi-saturados el acceso de oxígeno se facilita pudiendo llegar a la armadura y la corrosión aumentará. Cuando los poros se sequen completamente la resistividad aumenta y la corrosión disminuye por la falta de electrolito.

En el apartado 3.2.4. se explica que la velocidad de corrosión máxima se alcanza cuando los poros del hormigón están semi-saturados y existe la disponibilidad tanto de oxígeno como de electrolito. Esto puede verse a través de la medida de la resistividad eléctrica puesto que es muy difícil encontrar un hormigón completamente seco. Por tanto, cuando la resistividad eléctrica sea mínima la velocidad de corrosión será mínima (estado saturado) y cuando la resistividad aumente la velocidad de corrosión aumenta también.

Alonso et al. [1988] establecieron una relación directa entre la resistividad y la intensidad de corrosión que expresaron mediante la siguiente ecuación:

$$I_{corr} = \frac{30}{\rho}$$

[Ecuación 5.12] Intensidad de corrosión.

Donde,

I_{corr} Intensidad de corrosión en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

ρ Resistividad eléctrica en $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$.

Se han podido establecer, gracias a la experiencia en laboratorio, distintos rangos de resistividad en relación con la probabilidad de corrosión [Alonso et al., 1988, Feliú et al., 1989] que podemos observar en la siguiente tabla.

Resistividad	Probabilidad de corrosión
>100-200 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$	No se puede distinguir entre acero en estado activo o pasivo de corrosión. Las velocidades de corrosión son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación.
50 a 100 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$	Velocidades de corrosión bajas.
10 a 50 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$	Velocidades de corrosión moderadas o altas, en hormigones carbonatados o con cloruros.
<10 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$	La resistividad no es el parámetro controlante del proceso. El valor de la intensidad de corrosión obtenido reflejará la cota superior de la velocidad de corrosión en ese hormigón para un determinado contenido de cloruros o un nivel de carbonatación.

Tabla 5.2. Rangos de la resistividad en relación con la probabilidad de corrosión [Alonso et al., 1988; Feliú et al., 1989]

5.5. Motivos para la elección de la medida de la resistividad eléctrica como indicador de corrosión.

De lo anteriormente expuesto podemos concluir que mediante el método de la resistividad eléctrica se tiene un control completo de las etapas por las que pasa el hormigón pues nos da información sobre su microestructura, sobre su

Durabilidad en el hormigón armado

porosidad y sobre su contenido de agua. Esta medida puede valorar aspectos del hormigón como: el endurecimiento en estado fresco, el grado de curado, la resistencia a la penetración de los cloruros y la carbonatación y la velocidad de corrosión de la armadura. Al ser un ensayo no destructivo se puede repetir las veces necesarias sin perturbar el material. Por todo ello es muy interesante estudiar su utilización como indicador de durabilidad ya que nos puede dar una valoración de la calidad del hormigón en todos sus aspectos.

6. Predicción de la durabilidad de las estructuras de hormigón armado.

6.1. Modelo de cálculo de durabilidad para los procesos de corrosión según EHE-08.

Tanto para el caso de corrosión por carbonatación como para la corrosión por cloruros el tiempo total t_L necesario para que el ataque y la degradación sean importantes se calcula de la siguiente manera:

$$t_L = t_i + t_p$$

[Ecuación 6.1] Cálculo del período de vida útil.

Siendo:

t_i Período de iniciación de la corrosión, es decir, el tiempo que tarda el frente de penetración del agresivo en alcanzar la armadura provocando el inicio de la corrosión.

t_p Período de propagación, es decir, el tiempo que tarda en propagarse la corrosión hasta que la degradación que produzca sea significativa.

Cuando las armaduras son armaduras activas se considera un período de propagación $t_p = 0$.

6.1.1. Cálculo del período de iniciación.

Tal y como se habla en apartados anteriores, la carbonatación y la penetración de iones cloruro son procesos de difusión en el hormigón a través de sus poros, por tanto podemos expresarlos de la siguiente forma:

$$d = K \sqrt{t}$$

[Ecuación 3.6]

6.1.1.1. Modelo de carbonatación.

Podemos estimar el período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia d respecto a la superficie del hormigón mediante la siguiente fórmula:

$$t = \left(\frac{d}{K_c} \right)^2$$

[Ecuación 6.2] Período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación.

Siendo:

K_c Coeficiente de carbonatación que se obtiene de la siguiente expresión:

$$K_c = c_{env} \cdot c_{air} \cdot a \cdot f_{cm}^b$$

[Ecuación 6.3] Coeficiente de carbonatación.

Donde:

f_{cm} Resistencia media del hormigón a compresión, en N/mm², que puede estimarse a partir de la resistencia característica especificada (f_{ck}).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8$$

[Ecuación 6.4] Resistencia media del hormigón a compresión.

c_{env} Coeficiente de ambiente, según la tabla A.9.1. del Anejo 9 de la EHE-08.

c_{air} Coeficiente de aireantes, según la tabla A.9.2. del Anejo 9 de la EHE-08.

a, b Parámetros en función del tipo de conglomerante, según la Tabla A.9.3. del Anejo 9 de la EHE-08.

Coeficiente C_{env}

Ambiente	C_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0,5

Tabla 6.1. Coeficiente C_{env} (Tabla A.9.1. Anejo 9. EHE-08)

Coeficiente C_{air}

Aire ocluido (%)	C_{air}
< 4,5%	1
> 4,5%	0,7

Tabla 6.2. Coeficiente C_{air} (Tabla A.9.2. Anejo 9. EHE-08)

Coefficiente *a* y *b*

Conglomerante	Cementos de la Instrucción de cementos vigente	<i>a</i>	<i>b</i>
Cemento Portland	CEM I CEM II/A CEM II/B-S CEM II/B-L CEM II/B-LL CEM II/B-M CEM/V	1.800	-1,7
Cemento Portland + 28% cenizas volantes	CEM II/B-P CEM II/B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1,2
Cemento Portland + 9% humo de sílice	CEM II/A-D	400	-1,2
Cemento Portland + 65% escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1,2

Tabla 6.3. Coeficientes *a* y *b* (Tabla A.9.3. Anejo 9. EHE-08)

6.1.1.2. Modelo de penetración de cloruros.

Podemos estimar el período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros C_{th} a una distancia d respecto a la superficie del hormigón mediante la siguiente expresión:

$$t = \left(d / K_{Cl} \right)^2$$

[Ecuación 6.5] Período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros.

Siendo

K_{Cl} Coeficiente de penetración de cloruros que podemos obtener mediante la siguiente fórmula:

$$K_{Cl} = \alpha \cdot \sqrt{12D(t)} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{C_{th} - C_b}{C_s - C_b}} \right)$$

[Ecuación 6.6] Coeficiente de penetración de cloruros.

Donde:

α Factor de conversión de unidades que vale 56157.

C_{th} Coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad t , expresado en cm^2/s .

Durabilidad en el hormigón armado

C_s Concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. Se puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (en kg/m³) como:

$$C_s \text{ (\% peso de cemento)} = C_s \text{ (\% peso de hormigón)} \cdot (2300/\text{contenido de cemento}).$$

C_b Contenido de cloruros aportado por las materias primas en el momento de fabricación del hormigón.

Podemos calcular el coeficiente de difusión de cloruros mediante la siguiente expresión:

$$D(t) = D(t_0) \left(\frac{t_0}{t} \right)^n$$

[Ecuación 6.7] Coeficiente de difusión de cloruros.

Siendo:

$D(t_0)$ Coeficiente de difusión de cloruros a la edad t_0

$D(t)$ Coeficiente de edad t

n Factor de edad que puede tomarse igual a 0,5.

En el caso de que se realicen ensayos de penetración de cloruros puede emplearse el valor de $D(t_0)$ obtenido en ellos. Si no es así, se deberán utilizar los valores de la Tabla A.9.4. del Anejo 9 de la EHE-08.

Coeficiente $D(t_0)$ ($\times 10^{-12}$ m²/s)

Tipo de cemento	a/c = 0,40	a/c = 0,45	a/c = 0,50	a/c = 0,55	a/c = 0,60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

Tabla 6.4. Coeficiente $D(t_0)$ (Tabla A.9.4. Anejo 9. EHE-08)

La concentración de cloruros será dada por el autor del proyecto. En condiciones normales se puede adoptar un valor de C_{th} del 0,6% del peso del cemento.

El valor de C_s puede adoptarse de acuerdo con la Tabla A.9.4. del Anejo 9 de la EHE-08.

Concentración de cloruros en la superficie de hormigón

Clase general de exposición	IIIa		IIIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa	Hasta 500m	500-5.000m	Cualquiera		-
C_s (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,50	0,50

Tabla 6.5. Concentración de cloruros en la superficie de hormigón (Tabla A.9.4. Anejo 9. EHE-08)

En el caso de que $C_{th} - C_b > C_s$ se considerará comprobado el Estado Límite sin necesidad de efectuar comprobaciones numéricas.

6.1.2. Cálculo del período de propagación.

Podemos estimar el período de propagación de la corrosión, que sería aquel período de tiempo que tarda en producir una pérdida de sección de la armadura que sea inadmisibles o la aparición de fisuras en el recubrimiento del hormigón, mediante la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80}{\phi} \frac{d}{V_{corr}}$$

[Ecuación 6.8] Período de propagación de la corrosión.

Siendo:

- t_p Tiempo de propagación en años.
- d Espesor de recubrimiento en mm.
- ϕ Diámetro de la armadura en mm.
- V_{corr} Velocidad de corrosión en $\mu\text{m/año}$.

Si no disponemos de datos experimentales podemos obtener el valor de V_{corr} de la Tabla A.9.5. del Anejo 9 de la EHE-08.

Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición

Clase general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m/año}$)
Normal	Humedad alta	IIa	3
	Humedad media	IIb	2
Marina	Aérea	IIIa	20
	Sumergida	IIIb	4
	En zona de mareas	IIIc	50
Con cloruros de origen diferente al medio marino		IV	20

Tabla 6.6. Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición (Tabla A.9.5. Anejo 9. EHE-08)

6.1.3. Estimación de vida útil debida a la corrosión de las armaduras.

Sumando el período de iniciación y el de propagación de la corrosión obtenemos el tiempo total, que en el caso de la corrosión por carbonatación será:

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d}{V_{corr}}$$

[Ecuación 6.9] Estimación de vida útil para ataque por carbonatación.

Y en el caso de la corrosión por cloruros será:

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K_{Cl}}\right)^2 + \frac{80}{\phi} \frac{d}{V_{corr}}$$

[Ecuación 6.10] Estimación de vida útil para ataque por cloruros.

6.2. Modelo basado en la resistividad eléctrica.

Como indica la ley de Ohm, la resistividad eléctrica ρ indica la resistencia al paso de las cargas eléctricas:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot l}$$

[Ecuación 5.1]

La evolución de la resistividad es paralela a la resistencia a compresión (*Andrade y D'Andrea, 2011*) y por ello la resistividad nos sirve para predecir que

resistencia obtendremos además del factor de edad q que se indica en la siguiente fórmula:

$$\rho(t) = \rho_0 \cdot \left(\frac{t}{t_0}\right)^{+q}$$

[Ecuación 6.11] Factor de edad.

La resistividad nos ayuda a predecir el período de iniciación (t_i) hasta que se desarrolla la corrosión de la armadura y también calcular el período de propagación (t_p) de la corrosión (*Andrade et al, 2000; Andrade y D'Andrea, 2008*). Esto es posible ya que la resistividad nos informa de la estructura porosa del hormigón, cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad, por tanto menor será el flujo de iones que circulen a través de él (ver apartado 5.4.1.4.).

Podemos decir que la vida total de una estructura sería la suma de estos dos períodos:

$$t = t_i + t_p$$

[Ecuación 6.1]

6.2.1. Cálculo del período de iniciación.

Para calcular la profundidad de penetración del agresivo d (en mm) utilizamos la ecuación simplificada de la raíz cuadrada del tiempo $d = K\sqrt{t}$ [Ecuación 3.6], pero considerando el factor de velocidad de penetración del agresivo (K) como la raíz cuadrada del coeficiente de difusión D_{Cl} [*Andrade, 2004*].

$$d = \sqrt{D_{Cl}} \cdot \sqrt{t_i}$$

[Ecuación 6.12] Profundidad de penetración del agresivo.

Si asumimos la resistividad como la inversa de la difusión obtenemos:

$$d = \sqrt{\frac{K_{Cl,CO_2}}{\rho_{ap}}} \cdot \sqrt{t_i}$$

[Ecuación 6.13] Profundidad de penetración del agresivo

Y sabiendo que la resistividad aparente del hormigón,

$$\rho_{ap} = \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2}$$

[Ecuación 6.14] Resistividad aparente del hormigón.

Entonces,

$$t_i = \frac{d^2 \cdot \rho_{ap}}{K_{Cl,CO_2}} = \frac{d^2 \cdot \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2}}{K_{Cl,CO_2}}$$

[Ecuación 6.15] Período de iniciación de la corrosión.

Siendo,

ρ_{es} Resistividad efectiva del hormigón saturado en agua y curado a 28 días en húmedo ($\Omega \cdot m$)

r_{Cl,CO_2} Factor de retardo debido a la interacción de los iones cloruro o de la carbonatación con el sólido.

En este modelo se tienen en cuenta gracias al factor de ambiente K_{Cl,CO_2} la concentración del agresivo y los factores que influyen en la cinética del transporte como la temperatura, la humedad relativa, etc. (*D'Andrea, 2010*). Además se considera la capacidad del medio para la difusión mediante el factor de retardo r_{Cl,CO_2} .

D'Andrea (2010) propone los siguientes valores para K_{Cl,CO_2} :

Ambiente	$K_{Cl} (\Omega cm^3/año)$
IIIa (d > 500 m de la costa)	5000
IIIa (d < 500 m de la costa)	10000
IIIb	20000
IIIc	25000

Tabla 6.7. Coeficiente K_{Cl} según tipo de ambiente (*D'Andrea, 2010*)

El factor de retardo r_{Cl} es una variable que depende del tipo de cemento del cual debería informarnos el fabricante. Si el fabricante no dispone de esta información y no es posible conseguirla, *D'Andrea (2010)* propone unos valores promedio y desviación típica calculados en función de los distintos tipos de cemento y mediante los métodos de difusión y migración de cloruros (tabla 6.8), que deduce de la ecuación siguiente:

$$r_{cl} = \frac{D_s}{\varepsilon} \cdot \frac{1}{D_{ns}}$$

[Ecuación 6.16] Factor de retardo.

Donde,

D_s Coeficiente de difusión en estado estacionario.

D_{ns} Coeficiente de difusión en estado no estacionario.

ε Porosidad del material en fracción de volumen.

Tipo de cemento	Estadística descriptiva	r_{cl}	
		Difusión	Migración
I	Promedio	3,1	1,9
	Desviación	1,8	1,3
II-a	Promedio	3,7	2,3
	Desviación	1,5	1,0
IIA	Promedio	7,0	3,8
	Desviación	3,0	2,1

Tabla 6.8. Valores de r_{cl} promedio y desviación típica calculados en función de los distintos tipos de cemento y mediante los métodos de difusión y migración.

6.2.2. Cálculo del período de propagación.

Para calcular el período de propagación consideramos que la penetración del ataque en el acero P_x (en $\mu\text{A}/\text{cm}^2$) depende de la velocidad de corrosión V_{corr} (en $\mu\text{m}/\text{año}$).

$$t_p = \frac{P_x}{V_{corr}}$$

[Ecuación 6.17] Período de propagación de la corrosión.

Relacionamos la resistividad con la velocidad de corrosión mediante la siguiente ecuación [Alonso et al., 1988] para el cálculo de t_p a una pérdida de sección predeterminada:

$$t_p = \frac{P_x \cdot \rho_{ef}}{K_{corr}}$$

[Ecuación 6.18] Período de propagación de la corrosión.

Siendo,

ρ_{ef} Resistividad efectiva del hormigón a cualquier grado de saturación (en $\Omega \cdot \text{m}$)

K_{corr} Factor de relación entre la resistividad y la velocidad de corrosión.

Andrade y D'Andrea (2011) simplifican todos estos cálculos mediante la expresión siguiente:

$$t_L = t_i + t_p = \frac{d^2 \cdot \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2}}{F_{Cl,CO_2}}$$

[Ecuación 6.19] Período de vida útil mediante resistividad eléctrica.

En la que incluyen el "Factor de Reacción" que depende del tipo de cemento y el factor F_{Cl,CO_2} (cm³/año) que depende del tipo de ambiente.

Mediante este modelo es posible calcular la vida útil a partir del valor de la resistividad del hormigón y de unos factores que tienen unos valores fijos que dependen del ambiente o del tipo de cemento.

6.2.3. Diseño del hormigón para alcanzar una determinada resistividad.

Los pasos a seguir para el diseño de un hormigón para alcanzar una determinada resistividad según D'Andrea (2010) son los siguientes:

- i. El proyectista debe definir algunos de los aspectos de la estructura según la estrategia de durabilidad. Estos aspectos son:
 - El tipo de ambiente que defina la agresividad a la que va a estar sometida la estructura.
 - El espesor mínimo del recubrimiento de la armadura en función del tipo de ambiente (r_{min}).
 - La vida útil prevista para la estructura t_L .
- ii. El proyectista debe especificar la resistividad aparente mínima del hormigón ρ_{ap} . Según D'Andrea (2010) podemos calcularla de dos formas:
 - Para ELD_i de despasivación de la armadura que contempla la penetración del agresivo a través del recubrimiento del hormigón hasta alcanzar la armadura y despasivarla (t_i).

$$\rho_{ap}(ELD_i) = \frac{K_{CL,CO_2} \cdot t_L}{r_{min}^2}$$

[Ecuación 6.20] Resistividad aparente para ELD_i.

Siendo,

K_{CL,CO_2} Coeficiente que depende del tipo de ambiente de exposición (ver tabla 6.7).

t_L Vida útil prevista.

r_{min} Recubrimiento mínimo.

- Para ELD_p debido a la propagación de la corrosión: $t_i + t_p$, que ocurre una vez alcanzada la armadura (t_i) cuando el agresivo ataca el acero y propaga la corrosión (t_p).

$$\rho_{ap}(ELD_p) = \frac{t_L}{\frac{(r_{min})^2}{K_{CL,CO_2}} + \frac{P_x}{r_{CL,CO_2}} \cdot \left(\frac{t_0}{t_i}\right)^{-q} \cdot \xi \cdot K'_{corr}}$$

[Ecuación 6.21] Resistividad aparente para ELD_p.

Siendo,

t_0 Edad de medición de la resistividad en condición saturada (igual a 28 días).

t_i Período de iniciación.

r_{CL,CO_2} Factor de retardo de la matriz del hormigón.

q Factor de edad del cemento.

ξ Factor de corrección de la resistividad en función del ambiente.

P_x Penetración del ataque.

K'_{corr} Constante de corrosión.

Dado que lo que se pretende es evitar la corrosión de la armadura utilizaremos como estado límite ELD_i.

- iii. Se elige el tipo de cemento con su correspondiente factor de retardo r_{cl,CO_2} . Se determina el coeficiente m a partir de hormigones tipo.
- iv. Se estima la relación a/c y se introduce en la ecuación de Powers para el cálculo de la porosidad de la pasta.

$$\varepsilon_p (\% \text{ volumen}) = \frac{\frac{a}{c} - 0.3623 \alpha}{\frac{a}{c} + \frac{1}{\gamma_c}} \approx \frac{\frac{a}{c} - 0.36 \alpha}{\frac{a}{c} + 0.32} \cdot 100$$

[Ecuación 2.5]

Y se introduce el contenido de cemento c en la fórmula para el cálculo de la porosidad del hormigón:

$$\varepsilon = \varepsilon_p \cdot \gamma$$

[Ecuación 6.22] Porosidad del hormigón.

Siendo,

- ε_p Porosidad de la pasta calculada.
- ε Porosidad del hormigón.
- γ Fracción de pasta por volumen de hormigón que calculamos mediante la fórmula siguiente:

$$\gamma_{pasta} (\% \text{ vol}) = \frac{Vol_{pasta}}{Vol_{hormigón}} \approx \frac{\left(\frac{Cemento (kg)}{\delta_{cemento} (kg/m^3)} + \frac{Agua (kg)}{\delta_{agua} (kg/m^3)} \right)}{1000 (m^3)} \cdot 100$$

[Ecuación 6.23] Fracción de pasta por volumen de hormigón

- α Grado de hidratación del cemento.

Tipo de cemento	α (28 días)
Tipo I	0,80
Tipo II-a	0,60
Tipo IIA-V	0,65
Tipo IIA-S	0,50

Tabla 6.9. Valores aproximados del grado de hidratación a los 28 días [Lam y col., 2000; Chen y Brouwers, 2004; Wang y col., 2004; Pane y Hansen, 2005]

- v. Aplicamos la ecuación basada en la ley de Archie para comprobar si los valores estimados para dicha relación a/c son suficientes para alcanzar la resistividad exigida.

$$\rho = \rho_0 \cdot (\varepsilon_p \cdot \gamma)^{-m}$$

[Ecuación 5.5]

Donde,

ρ Resistividad efectiva, que es igual a $\rho = \rho_{ap}/r_{Cl,CO_2}$ **[Ecuación 6.14]**.

ρ_0 Resistividad de la fase acuosa (se asume 0,5 $\Omega \cdot m$)

m Coeficiente que depende del tipo de cemento.

Tipo de cemento	m (28 días)
Tipo I	1,7
Tipo IIA (P)	1,7
Tipo IIA-B (V)	2,0
Tipo II-a	2,7

Tabla 6.10. Valores de m y sus parámetros estadísticos función del tipo de cemento (D'Andrea, 2010)

Si no se logra conseguir la resistividad exigida tenemos dos soluciones: la primera es elegir otro tipo de cemento con otros valores de r y m hasta comprobar la validez de a/c, y la segunda es modificar la relación a/c y la cantidad de cemento hasta lograrlo.

- vi. Finalmente comprobamos mediante la determinación experimental de la resistividad eléctrica del hormigón saturado a 28 días, si se cumple con la ecuación $\rho = \rho_{ap}/r_{Cl,CO_2}$.

7. Planeamiento de la investigación.

Los ensayos pertenecientes a este trabajo se realizaron en el laboratorio de control de calidad de materiales Control y Estudios (CyE) en el polígono industrial de A Gándara (Narón) entre los meses de febrero y abril de 2014.

Se plantean las variables a estudiar, expuestas en el apartado 7.1., y se decide el diseño de un hormigón HA-30 para la consecución del trabajo. Los responsables del laboratorio estudiaron las dosificaciones a emplear, las cuales se resumen en el apartado 7.3.2.

Se propone el siguiente desarrollo de los ensayos, que se divide en dos fases:

- **Fase 1.**

Se fabrican en una primera fase tres dosificaciones distintas de hormigón con relación $a/c=0,55$ variando la cantidad de cemento de éstas, resultando las dosificaciones D330 ($c=330$ kg), D365 ($c=365$ kg) y D400 ($c=400$ kg). Se realiza una toma de 4 probetas cilíndricas (de dimensiones 150 mm de diámetro y altura 300 mm) de cada amasada para la realización de los siguientes ensayos:

- Rotura a compresión a 7 y 28 días según UNE EN 12390-3.
- Ensayo de resistividad eléctrica a 1, 4, 7, 14 y 28 días según UNE 83988-2.

- **Fase 2.**

Se realiza una segunda fase en la que se utiliza la dosificación D400 anterior variando la relación agua-cemento, resultando así tres dosificaciones distintas con relaciones $a/c=0,45$; $a/c=0,55$ y $a/c=0,65$. Se realiza una toma de 6 probetas cilíndricas para la realización de los siguientes ensayos:

- Rotura a compresión a 7 y 28 días según UNE EN 12390-3.
- Ensayo de resistividad eléctrica a 1, 4, 7, 14, 28, 35 y 42 días según UNE 83988-2.
- Ensayo de resistividad eléctrica a 19°C y 65°C según UNE 83988-2.
- Profundidad de penetración al agua bajo presión UNE EN 12390-8 y tracción indirecta UNE EN 12390-6.

7.1. Variables a estudiar.

- Influencia de la cantidad de cemento en la resistividad eléctrica.

- Influencia de la relación agua-cemento en la resistividad eléctrica.
- Influencia de la temperatura en la resistividad eléctrica.
- Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica.
- Relación entre la penetración de agua a presión y la resistividad eléctrica.
- Aplicación del modelo de predicción de durabilidad basado en la resistividad eléctrica.

7.2. Descripción de los métodos de ensayo utilizados.

7.2.1. Ensayo de asentamiento del cono de Abrams según UNE EN 12350-2:2009.

El ensayo se lleva a cabo en un molde en forma de tronco de cono fabricado con chapa de acero galvanizado de base mayor 200 ± 2 mm, base menor 100 ± 2 mm y altura 300 ± 2 mm, humedecido y colocado sobre una chapa metálica plana, rígida y no absorbente también humedecida. El cono debe estar provisto de dos asas en la base menor para su sujeción con las manos y en su base mayor de dos grapas de fijación o piezas fijas de pie para sostenerlo firmemente contra la chapa.

Se sujeta fuertemente el molde sobre la chapa con los pies y se procede a llenarlo con tres capas, de forma que cada una de ellas sea un tercio del volumen del molde.

Con ayuda de una barra compactadora de acero de punta semiesférica de 16 ± 1 mm de diámetro y longitud 600 ± 5 mm se procede al compactado de cada una de las capas aplicando 25 pinchazos uniformemente distribuidos de modo que penetren ligeramente hasta la capa inferior (cosido). En el llenado y compactado de la última capa, se debe procurar que el hormigón rebose antes de comenzar el proceso de compactado. En el caso de que a consecuencia del compactado no hubiese suficiente hormigón para llegar al borde superior del molde, se añade más hormigón para que siempre haya exceso sobre el nivel superior. Después de compactar la última capa, se retira el hormigón sobrante enrasando con el borde superior de la base.



Ilustración 7.1. Ilustración 7.2. Ensayo de asentamiento del cono de Abrams.

Se retira el hormigón sobrante de la chapa metálica y se procede a levantar el molde con cuidado en dirección vertical con un movimiento rápido (entre 2 y 5 segundos) de manera uniforme y sin causar ningún movimiento lateral o de torsión al hormigón.

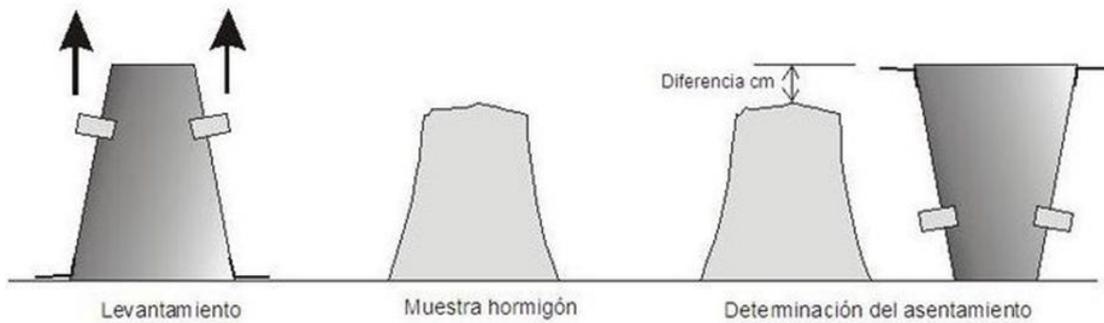


Ilustración 7.3. Procedimiento a seguir en el ensayo de asentamiento.

Finalmente, se coloca el molde al lado de la muestra de hormigón y se procede a medir la diferencia entre la altura del molde y el punto más alto de la probeta de hormigón asentada. El resultado se expresa en mm.



Ilustración 7.4. Medición del asentamiento de la muestra.

El ensayo se da por válido cuando se produce un correcto asentamiento de la masa del hormigón, es decir, cuando el hormigón permanece sustancialmente intacto y de forma simétrica sin que se produzca una caída lateral de la muestra.



Ilustración 7.5. Asentamiento no válido.

7.2.2. Ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de las cuatro puntas o de Wenner según UNE 83988-2.

El método consiste en la aplicación de una corriente entre dos electrodos exteriores situados en la generatriz de la probeta, y se mide la diferencia de potencial entre los dos electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. La corriente es transportada por iones en el líquido en los poros. El aparato nos proporciona la medición de la resistencia eléctrica del hormigón conociendo la distancia entre los electrodos (a) y las dimensiones de la muestra (l): $\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot V/l$ (k Ω .cm) [**Ecuación 5.1**][**Ecuación 5.9**].

Las probetas utilizadas en el ensayo fueron probetas cilíndricas de hormigón endurecido fabricadas según la norma UNE-EN 12390-2, de altura 300 mm y diámetro 150 mm.

Para la medición se utilizó un medidor de resistencia eléctrica (resistivímetro) de cuatro puntas, tipo Wenner, modelo Resipod de la casa Proceq. Con resolución de $\pm 0,2$ k Ω .cm con corriente nominal total de 200 μ A y frecuencia de 40 Hz.



Ilustración 7.6. Ilustración 7.7. Resistivímetro tipo Wenner utilizado.

Los electrodos son cuatro puntas de material metálico de diámetro entre 4 y 6 mm acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. Cada electrodo cuenta con una esponja individual pero se decide la utilización de una esponja del tamaño del soporte (aproximadamente) para mejorar el contacto de los electrodos con la superficie de la probeta. Dicha esponja se humedecerá antes de realizar cada medición.

El procedimiento a realizar comienza retirando las probetas de la cámara húmeda, se dejan reposar unos minutos para escurrir el exceso de agua.

Antes de proceder a realizar las mediciones se calibra el aparato en la cinta de prueba.

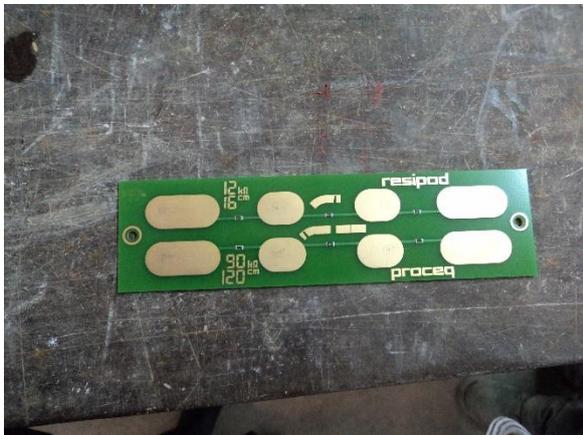


Ilustración 7.8. Ilustración 7.9. Calibración del aparato.

Se realizan tres mediciones por cada probeta en distintas zonas de la misma intentando evitar coqueas, pintura utilizada para la designación de la probeta,

reborde procedente del desmolde u otras deformaciones que puedan afectar a la medición. El resultado de la medición se expresa en números enteros en $\Omega.m$.



Ilustración 7.10. Medición de resistividad con aparato tipo Wenner.

La resistividad que nos brinda el aparato es una resistividad experimental ρ_{exp} y tal y como se refleja en la norma se debe dividir por la constante de forma χ cuyo valor para probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y altura 30 cm es 1,65.

7.2.3. Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión según UNE EN 12390-8.

Para la realización de este ensayo se utilizaron probetas cilíndricas de diámetro 150 mm y altura 300 mm curadas en cámara húmeda durante 28 días.

Se someten las probetas a la aplicación de agua a presión de 500 ± 50 kPa (exponiendo a ello la cara fratasada) durante 72 ± 2 h en un equipo de ensayo destinado a dicho procedimiento, revisando su estado periódicamente para identificar la posible presencia de agua en la cara opuesta.



Ilustración 7.11. Probetas sometidas a ensayo de penetración de agua a presión.

Pasado el tiempo especificado para el ensayo, se retira la probeta del equipo, se limpia la cara en la que se le aplicó la presión de agua para retirar el exceso de ésta. Se coloca la probeta de forma horizontal en una prensa de rotura para proceder a su rotura longitudinal en dos mitades (perpendicularmente a la cara expuesta a la presión de agua).



Ilustración 7.12. Ilustración 7.13. Rotura de probetas para ensayo de penetración de agua a presión.

Una vez rota la probeta se marca el frente de penetración del agua a presión con un rotulador de color. Se coloca sobre la probeta una lámina plástica transparente y se marca en ella una línea horizontal. Se coloca esta lámina sobre la probeta haciendo coincidir la línea horizontal anterior con el borde de la cara inferior de la probeta. Se marcha con un rotulador sobre la lámina el frente de

penetración antes indicado. Se dibuja una línea horizontal paralela a la anterior por el punto más alto de la línea curva que forma el frente de penetración.

Se mide entonces la penetración máxima y la penetración media.



Ilustración 7.14. Profundidad de penetración de agua en las probetas ensayadas.

7.2.4. Ensayo de resistencia a compresión de probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.

Se utilizaron probetas cilíndricas de diámetro 150 mm y altura 300 mm curadas en cámara húmeda durante 7 y 28 días respectivamente según edades de rotura.

Para la realización del ensayo primero se retiran las probetas de la cámara húmeda y se deja escurrir unos minutos el exceso de agua.

Posteriormente se procede al pulido de la cara fratasada y se somete la probeta a la rotura en prensa.



Ilustración 7.15. Ilustración 7.16. Rotura de probetas a compresión.

7.3. Desarrollo experimental.

7.3.1. Características de los materiales.

7.3.1.1. Áridos.

Se utilizan los siguientes áridos:

- Gravilla 4/12 granítica, procedente de Canteras Ferrolanas (Ferrol).

TAMICES (mm)	31,5	20	16	14	12,5	10	8	6,3	4	2	1	0,50	0,250	0,125	0,063
% Pase				100	99	91	74	49	20	11	6	4	3	2	1,3

Tabla 7.1. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006.

Durabilidad en el hormigón armado

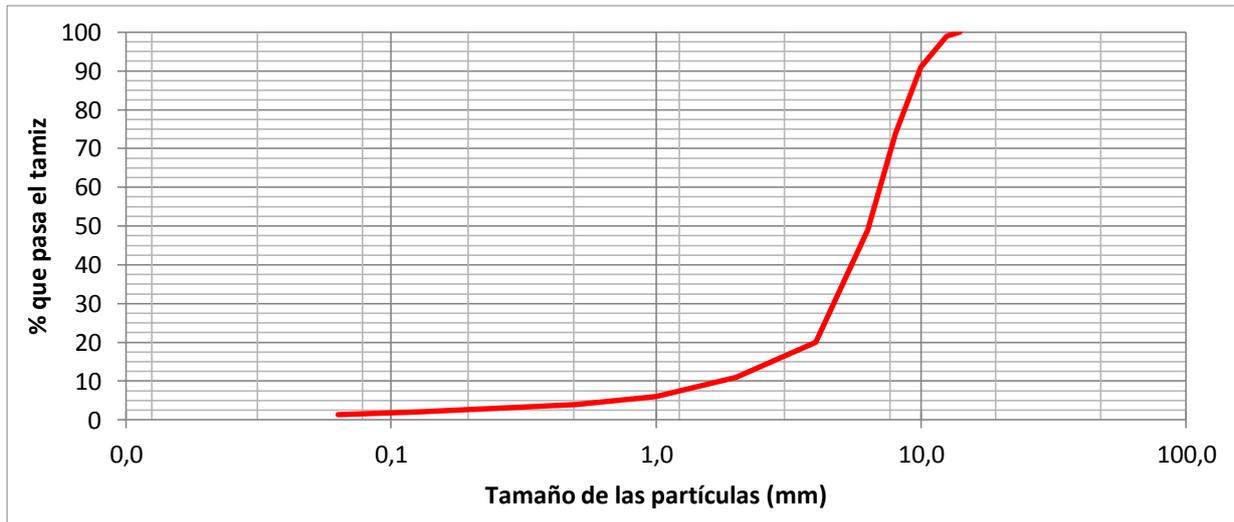


Ilustración 7.17. Granulometría de gravilla 4/12 granítica.

- Arena 0/4 granítica, procedente de Canteras Ferrolanas (Ferrol).

TAMICES (mm)	12,5	8	6,3	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063
Huso árido fino EHE				100	96	84	60	30	23	10-16
				85	62	40	18	6	0	0
% Pase			100	91	69	45	28	18	9	4,9

Tabla 7.2. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006.

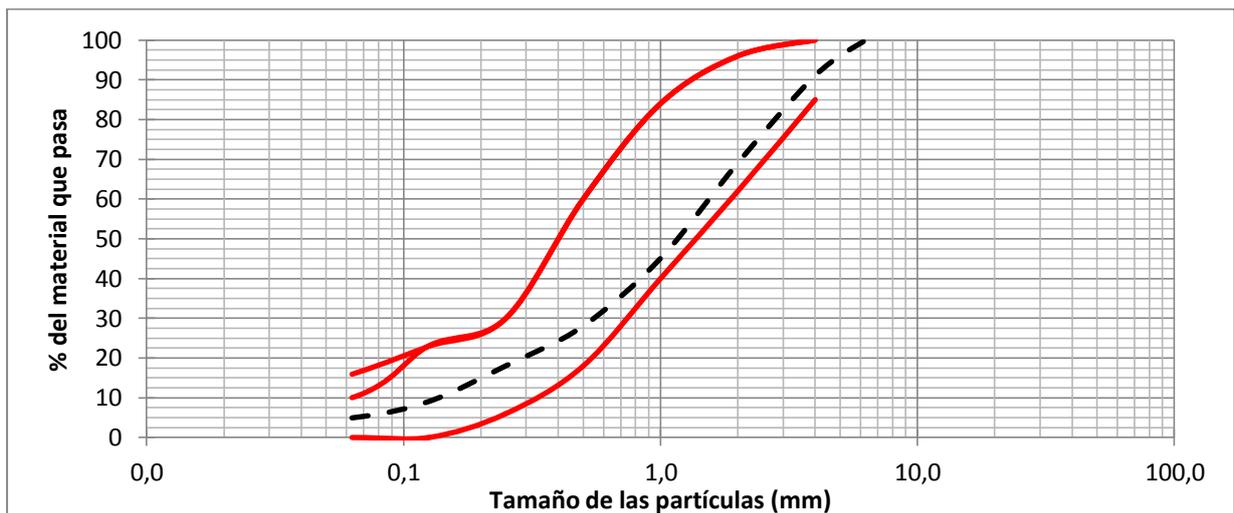


Ilustración 7.18. Granulometría de arena 0/4 granítica.

- Arena 0/4 caliza, procedente de Canteras CANPESA (Baralla).

TAMICES (mm)	12,5	8	6,3	4	2	1	0,500	0,250	0,125	0,063
Huso árido fino EHE				100	96	84	60	30	23	10-16
				85	62	40	18	6	0	0
% Pase			100	93	68	42	27	19	14	11,5

Tabla 7.3. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006.

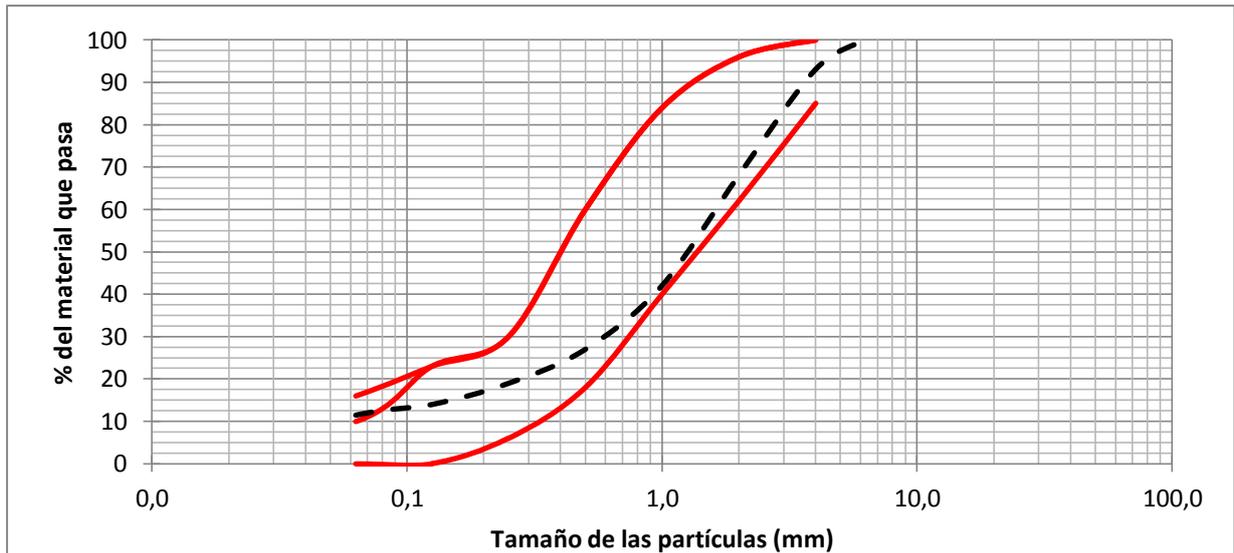


Ilustración 7.19. Granulometría de arena 0/4 caliza.

7.3.1.2. Cemento.

Se utiliza un cemento tipo CEM I 52,5 R/SR.

7.3.1.3. Agua.

Se utiliza agua de la red general de abastecimiento.

7.3.1.4. Aditivos.

Se utilizan los aditivos siguientes:

- CHRYSO PLAST 795 C795.
- CHRYSO FLUID OPTIMA 62.

7.3.2. Dosificación.

Composición de áridos ajustada mediante la fórmula de Fuller:

Tamiz UNE mm	16	12,5	10	8	4	2	1	0,50	0,250	0,125
Fuller 12,5		100	89,4	80	56,6	40	28,3	20	14	10
Curva determinada		100	96	88	58	42	26	17	11	6

Tabla 7.4. Composición de áridos ajustada mediante la fórmula de Fuller.

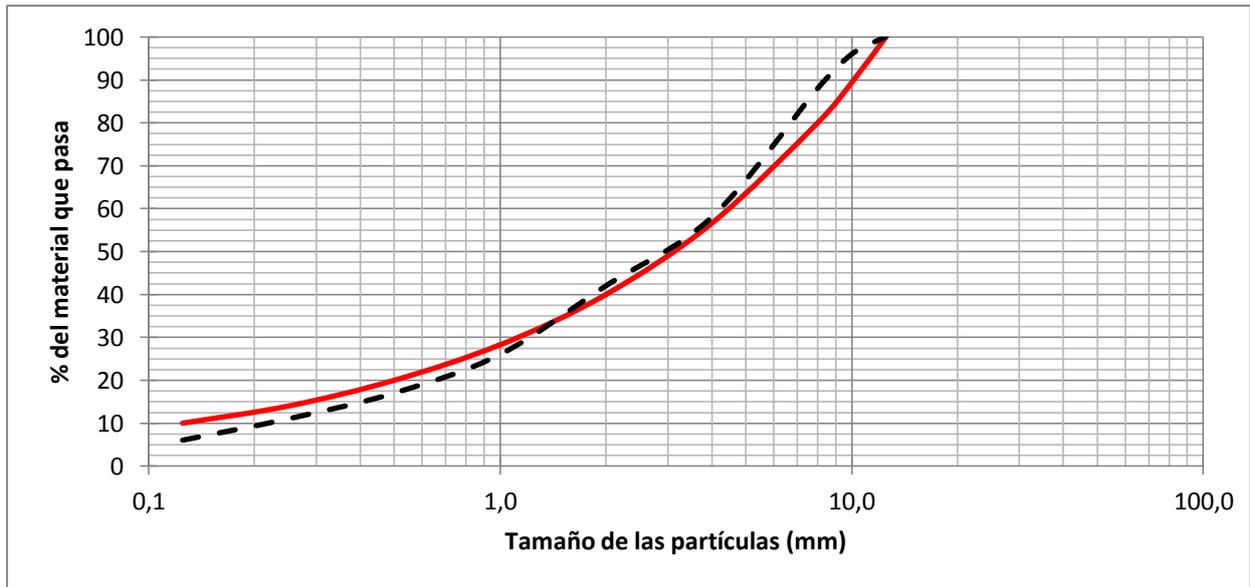


Ilustración 7.20. Composición de áridos ajustada mediante curva de Fuller.

7.3.2.1. Fase 1.

Dosificación D 330, a/c = 0,55

Materiales		Volumen (dm ³)	Densidad (g/cm ³)	Masa (Kg)
Áridos	Grava 4/12 C. Ferrolanas	326	2,65	864
	Arena 0/4 C. Ferrolanas	263	2,65	697
	Arena 0/4 Canpessa	104	2,75	286
Cemento	CEM I 52,5 R/SR	110	3	330
Agua	Procedente de red	182	1	182
Aditivos	CHRYSTO PLAST 795	1,65	1	1,65
	CHRYSTO FLUID OPTIMA 62	4,95	1	4,95
Huecos		40	-	-

Tabla 7.5. Dosificación D330, a/c = 0,55.

Dosificación D 365 a/c = 0,55

Materiales		Volumen (dm ³)	Densidad (g/cm ³)	Masa (Kg)
Áridos	Grava 4/12 C. Ferrolanas	311	2,65	824
	Arena 0/4 C. Ferrolanas	252	2,65	668
	Arena 0/4 Canpessa	99	2,75	272
Cemento	CEM I 52,5 R/SR	122	3	365
Agua	Procedente de red	201	1	201
Aditivos	CHRYSTO PLAST 795	1,83	1	1,83
	CHRYSTO FLUID OPTIMA 62	3,65	1	3,65
Huecos		40	-	-

Tabla 7.6. Dosificación D365, a/c = 0,55.

Dosificación D 400 a/c = 0,55

Materiales		Volumen (dm³)	Densidad (g/cm³)	Masa (Kg)
Áridos	Grava 4/12 C. Ferrolanas	297	2,65	787
	Arena 0/4 C. Ferrolanas	240	2,65	636
	Arena 0/4 Canpesa	95	2,75	261
Cemento	CEM I 52,5 R/SR	133	3	400
Agua	Procedente de red	220	1	220
Aditivos	CHRYSTO PLAST 795	2,00	1	2,00
	CHRYSTO FLUID OPTIMA 62	4,00	1	4,00
Huecos		40	-	-

Tabla 7.7. Dosificación D400, a/c = 0,55.

7.3.2.2. Fase 2.

Dosificación D 400 a/c = 0,45

Materiales		Volumen (dm³)	Densidad (g/cm³)	Masa (Kg)
Áridos	Grava 4/12 C. Ferrolanas	316	2,65	837
	Arena 0/4 C. Ferrolanas	255	2,65	676
	Arena 0/4 Canpesa	101	2,75	278
Cemento	CEM I 52,5 R/SR	133	3	400
Agua	Procedente de red	180	1	180
Aditivos	CHRYSTO PLAST 795	4,00	1	4,00
	CHRYSTO FLUID OPTIMA 62	6,00	1	6,00
Huecos			-	

Tabla 7.8. Dosificación D400, a/c = 0,45.

Dosificación D 400 a/c = 0,65

Materiales		Volumen (dm³)	Densidad (g/cm³)	Masa (Kg)
Áridos	Grava 4/12 C. Ferrolanas	278	2,65	737
	Arena 0/4 C. Ferrolanas	225	2,65	596
	Arena 0/4 Canpesa	89	2,75	245
Cemento	CEM I 52,5 R/SR	133	3	400
Agua	Procedente de red	260	1	260
Aditivos	CHRYSTO PLAST 795	0,00	1	0,00
	CHRYSTO FLUID OPTIMA 62	0,00	1	0,00
Huecos		40	-	-

Tabla 7.9. Dosificación D400, a/c = 0,65.

7.3.3. Fabricación y curado de las probetas.

Para la fabricación de las probetas se utilizan moldes cilíndricos de diámetro 150 mm y 300 mm de altura según UNE EN 12390-1.

Una vez realizado el ensayo de consistencia por el método del cono de Abrams (ver apartado 7.2.1.) se reamasa la muestra y se procede al llenado de los moldes con la ayuda de una tolva de llenado.

Se escoge como método de compactado el vibrado manual, por ello se llenan las tolvas en tres capas que se vibran cada una por separado mediante picado con una barra compactadora de sección transversal circular de diámetro 16 mm y longitud 600 mm. Se realizan 25 pinchazos uniformemente distribuidos de modo que penetren ligeramente hasta la capa inferior (cosido) para eliminar las burbujas de aire atrapado.

Posteriormente se golpea lateralmente el molde de forma cuidadosa con un mazo hasta que las burbujas de aire mayores cesen de aparecer en la superficie.

Para finalizar se engrasan las probetas con el borde superior del molde.



Ilustración 7.21. Ilustración 7.22. Fabricación y curado de probetas.

Se identifican y marcan las probetas con un papel colocado en la cara superior del cilindro y para evitar la pérdida de humedad se sellan en bolsas de plástico. Después se llevan a la cámara húmeda donde se procederá a su curado a una temperatura de 20 ± 2 °C y a una humedad relativa $\geq 95\%$.

8. Resultados.

8.1. Ensayos de caracterización de comportamiento del hormigón.

8.1.1. Ensayos de hormigón fresco. Asentamiento del cono de Abrams según UNE EN 12350-2.

8.1.1.1. Fase 1.

Ensayo de asentamiento UNE EN 12350-2

D 330	D 365	D 400
>200 mm	20 mm	170 mm

Tabla 8.1. Resultados de ensayo de asentamiento de cono de Abrams para Fase 1 (UNE EN 12350-2:2009).

8.1.1.2. Fase 2.

Ensayo de asentamiento UNE EN 12350-2

a/c = 0,45	a/c = 0,55	a/c = 0,65
30 mm	180 mm	140 mm

Tabla 8.2. Resultados de ensayo de asentamiento de cono de Abrams para Fase 2 (UNE EN 12350-2:2009).

8.1.2. Ensayos de hormigón endurecido. Resistencia a compresión de probetas cilíndricas según UNE EN 12390-3.

El ensayo se realizó de acuerdo a lo especificado en la norma UNE EN 12390-3.

8.1.2.1. Fase 1.

Rotura a compresión (MPa) UNE EN 12390-3

Edad	D 330		D 365		D 400	
7	42,2	42,9	40,9	40,8	36,9	36,5
	43,5		40,6		36,0	
28	47,2	46,9	47,1	46,5	40,5	41,0
	46,5		45,8		41,5	

Tabla 8.3. Resultados de ensayo de rotura a compresión (MPa) de la Fase 1 (UNE EN 12390-3).

8.1.2.2. Fase 2.

Rotura a compresión (MPa) UNE EN 12390-3

Edad	a/c = 0,45		a/c = 0,55		a/c = 0,65	
7	50,8	53,4	36,9	36,5	31,1	30,6
	56,0		36,0		30,1	
28	56,9	56,5	40,5	41,0	33,8	34,5
	56,0		41,5		35,2	

Tabla 8.4. Resultados de ensayo de rotura a compresión (MPa) de la Fase 2 (UNE EN 12390-3).

8.2. Ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner según UNE 83988-2.

8.2.1. Fase 1.

Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$) UNE 83988-2

Edad	D330				D365				D400			
		ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ			ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ			ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ	
1	P1	48	45	27	P1	52	47	28	P1	43	41	25
		50				48				43		
		46				49				41		
	P2	50			48	40						
		49			47	39						
		49			46	40						
	P3	49			47	41						
		48			47	43						
		51			48	42						
	P4	47			44	39						
		47			44	38						
		47			46	41						
3	P1	61	60	36	P1	54	59	36	P1	52	53	32
		59				56				52		
		61				57				50		
	P2	63			55	51						
		59			57	52						
		59			57	52						
	P3	60			58	52						
		59			59	52						
		59			59	52						
	P4	58			63	57						
		57			70	57						
		60			61	58						
7	P1	66	64	39	P1	60	64	39	P1	57	57	35
		64				63				58		
		66				60				57		
	P2	66			68	59						
		63			63	57						
		66			72	58						

Durabilidad en el hormigón armado

	P3	6			P3	64			P3	53		
		64				62				54		
		61				63				52		
	P4	61			P4	64			P4	61		
		65				63				58		
		64				61				60		
14	P3	77	77	47	P3	77	76	46	P3	72	70	42
		80				78				73		
		79				78				73		
	P4	73			P4	74			P4	69		
		78				75				64		
		76				74				69		
28	P3	101	98	59	P3	96	97	59	P3	96	96	58
		100				96				98		
		101				100				97		
	P4	97			P4	96			P4	93		
		96				100				96		
		91				96				94		

Tabla 8.5. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 1 (UNE 83988-2).

8.2.2. Fase 2.

Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$) UNE 83988-2

Edad	a/c = 0,45			a/c = 0,55			a/c = 0,65					
		ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ		ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ		ρ_{exp}	ρ_{exp}/χ			
1	P1	-	-	-	P1	43	41	25	P1	30	31	19
		-				43				31		
		-				41				32		
	P2	-			P2	40			P2	32		
		-				39				31		
		-				40				32		
	P3	-			P3	41			P3	30		
		-				43				30		
		-				42				32		
	P4	-			P4	39			P4	33		
		-				38				32		
		-				41				33		
	P5	-			P5	43			P5	30		
		-				44				30		
		-				42				31		
	P6	-			P6	42			P6	30		
		-				43				32		
		-				42				31		
3/4	P1	88	87	53	P1	52	54	33	P1	38	39	24
		87				52				40		
		88				50				38		
	P2	85			P2	51			P2	39		
		86				52				39		
		82				52				39		

Durabilidad en el hormigón armado

	P3	90			P3	52			P3	39		
		85				52				39		
		87				52				39		
	P4	90			P4	57			P4	40		
		92				57				39		
		90				58				41		
	P5	83			P5	54			P5	39		
		85				54				40		
		89				55				40		
	P6	86			P6	55			P6	39		
		85				56				40		
		86				55				40		
7	P1	88	89	54	P1	57	59	36	P1	43	43	26
		87				58				41		
		90				57				42		
	P2	87			P2	59			P2	41		
		90				57				44		
		92				58				43		
	P3	86			P3	53			P3	41		
		89				54				41		
		90				52				41		
	P4	90			P4	61			P4	43		
		94				58				44		
		93				60				45		
	P5	88			P5	62			P5	43		
		87				61				43		
		90				59				41		
	P6	89			P6	63			P6	43		
		90				61				44		
		90				64				44		
14	P3	98	100	61	P3	72	64	39	P3	52	52	32
		99				73				52		
		101				73				51		
	P4	101			P4	69			P4	56		
		102				64				55		
		103				69				53		
	P5	97			P5	69			P5	49		
		93				71				51		
		95				72				50		
	P6	105			P6	67			P6	52		
		103				69				51		
		102				67				52		
28	P3	129	127	77	P3	96	81	49	P3	56	57	35
		131				98				57		
		128				97				55		
	P4	126			P4	93			P4	57		
		129				96				61		
		125				94				62		
	P5	127			P5	79			P5	54		
		125				85				55		
		121				79				56		
	P6	129			P6	78			P6	60		
		128				81				56		
		123				75				58		

Durabilidad en el hormigón armado

35	P6	136	135	82	P6	88	90	55	P6	62	63	38
		133				91				64		
		135				91				62		
42	P6	138	138	84	P6	94	95	58	P6	65	66	40
		139				96				68		
		138				94				66		

Tabla 8.6. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 2 (UNE 83988-2).

Resistividad eléctrica ($\Omega \cdot m$) UNE 83988-2. Edad 55 días

T^a (°C)	a/c = 0,45		a/c = 0,55		a/c = 0,65	
	ρ_{exp}	$\frac{\rho_{exp}}{\chi}$	ρ_{exp}	$\frac{\rho_{exp}}{\chi}$	ρ_{exp}	$\frac{\rho_{exp}}{\chi}$
19	146	88	95	58	68	41
65	41	25	31	19	24	15

Tabla 8.7. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 2 a distintas temperaturas (UNE 83988-2).

8.3. Ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión según UNE EN 12390-8.

Profundidad de penetración de agua bajo presión UNE EN 12390-8

a/c	Profundidad máxima (mm)	Profundidad media (mm)	Tracción indirecta (MPa)
0,45	13	7	5,2
0,55	17	8	4,2
0,65	19	9	3,4

Tabla 8.8. Resultados de ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión (UNE EN 12390-8)

Los requisitos que establece la norma para el cumplimiento de los resultados se exponen en la Tabla 4.1. Criterios de valoración de resultados de ensayo de profundidad de penetración de agua a presión (Art. 37.3.3. EHE-08)

9. Análisis de datos.

9.1. Influencia de la cantidad de cemento en la resistividad eléctrica.

Los resultados obtenidos en relación con la cantidad de cemento no aclaran realmente cómo influye la cantidad de cemento en la resistividad eléctrica del hormigón que se ensaya. En las mediciones de resistividad a 7 días se aprecia una diferencia de resistividad de un 11% entre el hormigón con mayor cantidad de cemento y el de menor cantidad, sin embargo, en cuanto el hormigón va endureciendo y su resistividad va aumentando, a 28 días se puede observar que esa diferencia no es más que del 2%. Es posible que esta diferencia fuese más perceptible a edades más avanzadas cuando la hidratación del cemento finalizase y la resistividad del hormigón ensayado se estabilizase.

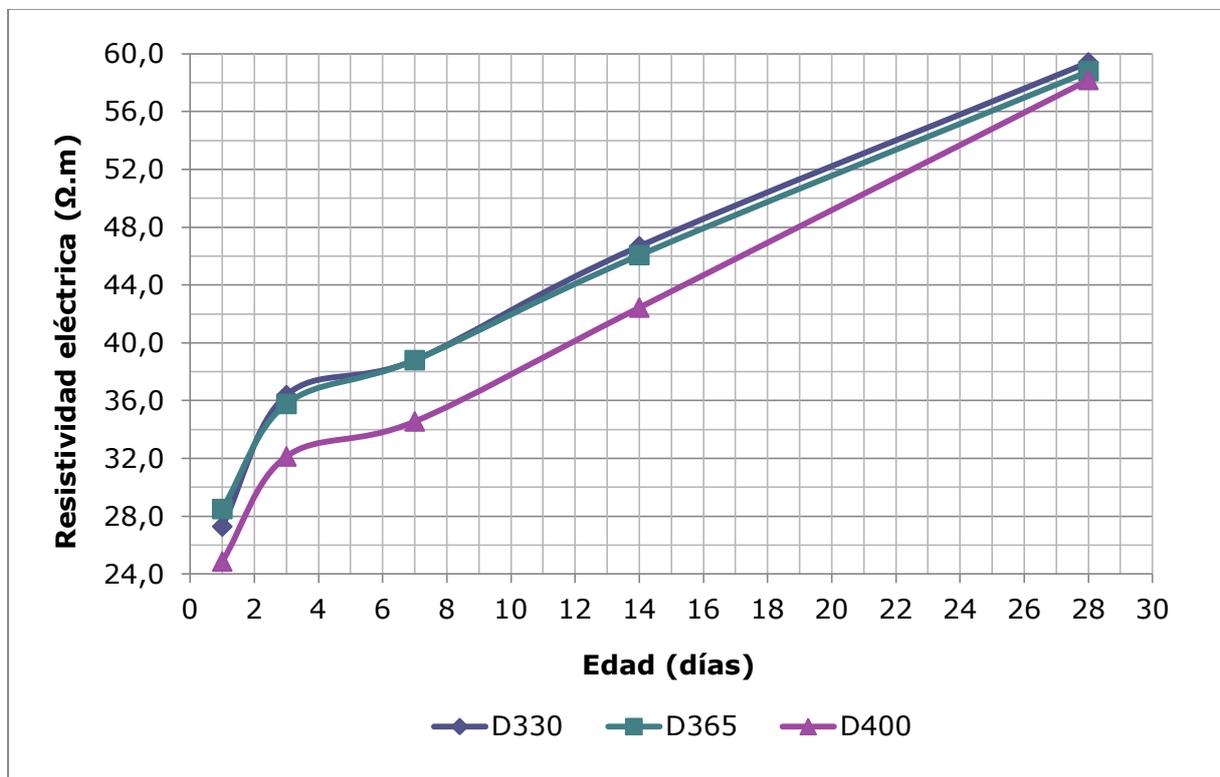


Ilustración 9.1. Relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de cemento.

	7 DÍAS			14 días			28 días		
	ρ	%	Dif.	ρ	%	Dif.	ρ	%	Dif.
D330	38,8	100	0	46,7	100	0	59,4	100	0
D365	38,8	100	0	46,1	99	1	58,8	99	1
D400	34,6	89	11	42,4	91	9	58,2	98	2

Tabla 9.1. Diferencia de porcentajes de resultados de resistividad eléctrica para Fase 1.

9.2. Influencia de la relación agua-cemento en la resistividad eléctrica.

Como se explica en apartados anteriores el nivel de flujo de iones cuando sometemos el hormigón al paso de una corriente se ve influenciado por la permeabilidad de éste y la cantidad y tamaño de la estructura porosa de la pasta de cemento. Si aumentamos la relación agua-cemento conseguimos un mayor volumen de poros capilares y una mayor estructura porosa que facilita el transporte de iones aumentando así la conductividad, y por consiguiente, disminuyendo la resistividad eléctrica. Se ha comprobado experimentalmente este razonamiento, se puede observar en la ilustración 9.2 y en la tabla 9.2, que a 7 días se obtiene una diferencia de un 52% entre la resistividad del hormigón con relación $a/c=0,45$ y el de $a/c=0,65$; a 28 días esta diferencia es de un 55% y a 42 días de 52%.

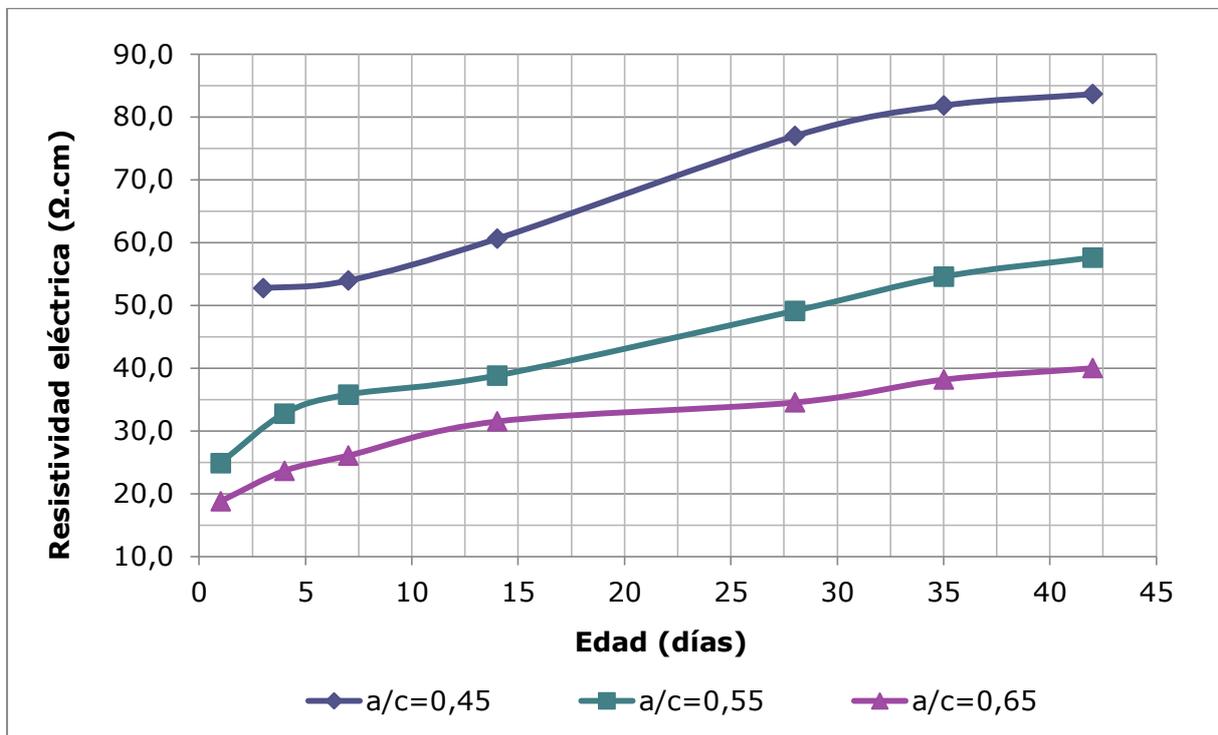


Ilustración 9.2. Relación entre la resistividad eléctrica y la relación agua/cemento.

	7 DÍAS			28 días			42 días		
	ρ	%	Dif.	ρ	%	Dif.	ρ	%	Dif.
a/c 0,45	53,9	100	0	77,0	100	0	83,6	100	0
a/c 0,55	35,8	66	34	49,1	64	36	57,6	69	31
a/c 0,65	26,1	48	52	34,5	45	55	40	48	52

Tabla 9.2. Diferencia de porcentajes de resultados de resistividad eléctrica para Fase 2.

9.3. Influencia de la temperatura en la resistividad eléctrica.

Como se comenta en el apartado 5.4.3.2 de este documento, con el aumento de la temperatura, la viscosidad del fluido disminuye y la movilidad de los iones responsables de la conducción de la corriente eléctrica aumenta haciendo que disminuya la resistividad eléctrica. Según la ley de Rasch y Hinrichsen (1908) podemos relacionar la resistividad eléctrica y la temperatura mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_1 = \rho_2 \cdot e^A \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)$$

[Ecuación 5.10]

Para el estudio de esta variable se midió la resistividad eléctrica de las probetas saturadas de agua a 19°C y 65°C siguiendo el procedimiento establecido en la UNE 83988-2. Se puede observar en la ilustración 9.3 que según se aumenta la temperatura del agua en la que están saturadas las probetas la resistividad eléctrica es menor, disminuyendo en torno a un 28% la resistividad entre los 19°C y los 65°C para la relación a/c=0,45; un 33% para la relación a/c=0,55 y un 37% para la relación a/c=0,65.

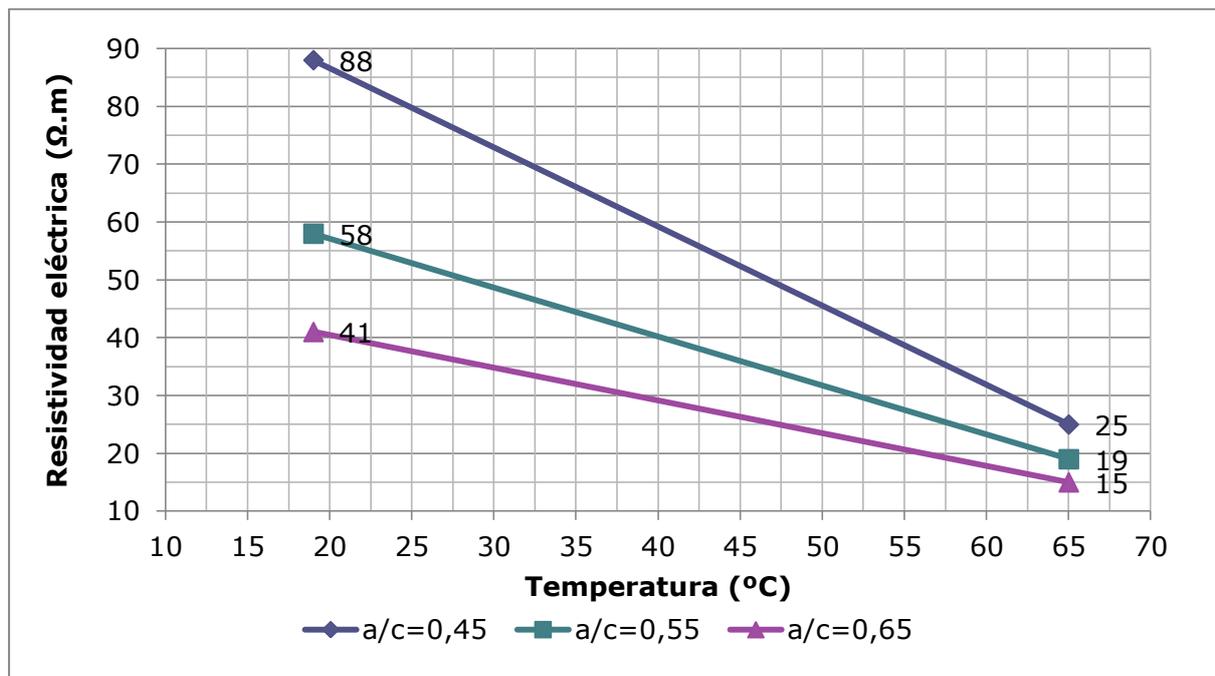


Ilustración 9.3. Influencia de la temperatura en la resistividad eléctrica.

9.4. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica.

La resistividad eléctrica y la resistencia a compresión tienen en común su relación inversamente proporcional a la porosidad del material, que podemos observar según la ley de Archie [Archie, 1942] [Ecuación 5.5], que relaciona la resistividad eléctrica con la porosidad del material, y con la ecuación de Powers [Powers, 1960] [Ecuación 2.5], que nos informa del índice de poros capilares de la pasta.

Como podemos observar en los gráficos siguientes, a medida que aumenta el nivel de hidratación y el hormigón va endureciendo, se produce una disminución de los capilares de poros y la resistencia a compresión aumenta al tener más fase sólida por volumen de material. Al producirse una disminución de los poros capilares se dificulta el traslado de iones que conducen la corriente eléctrica, por ello aumenta también la resistividad eléctrica.

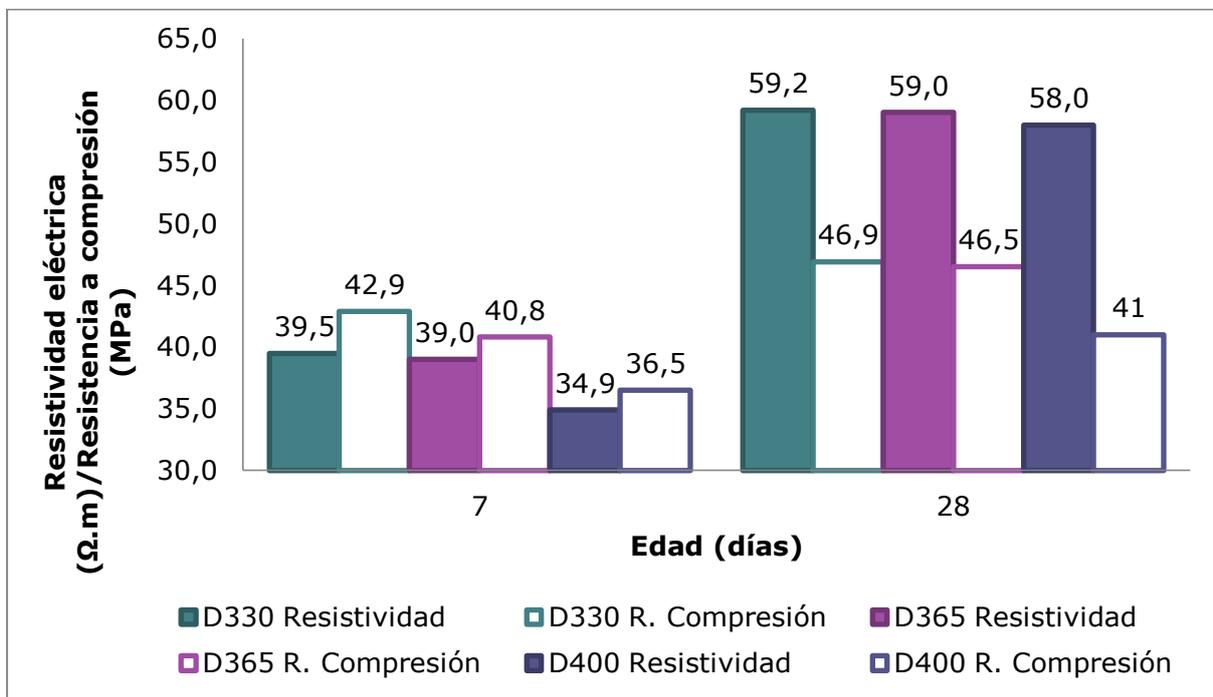


Ilustración 9.4. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica. Fase 1.

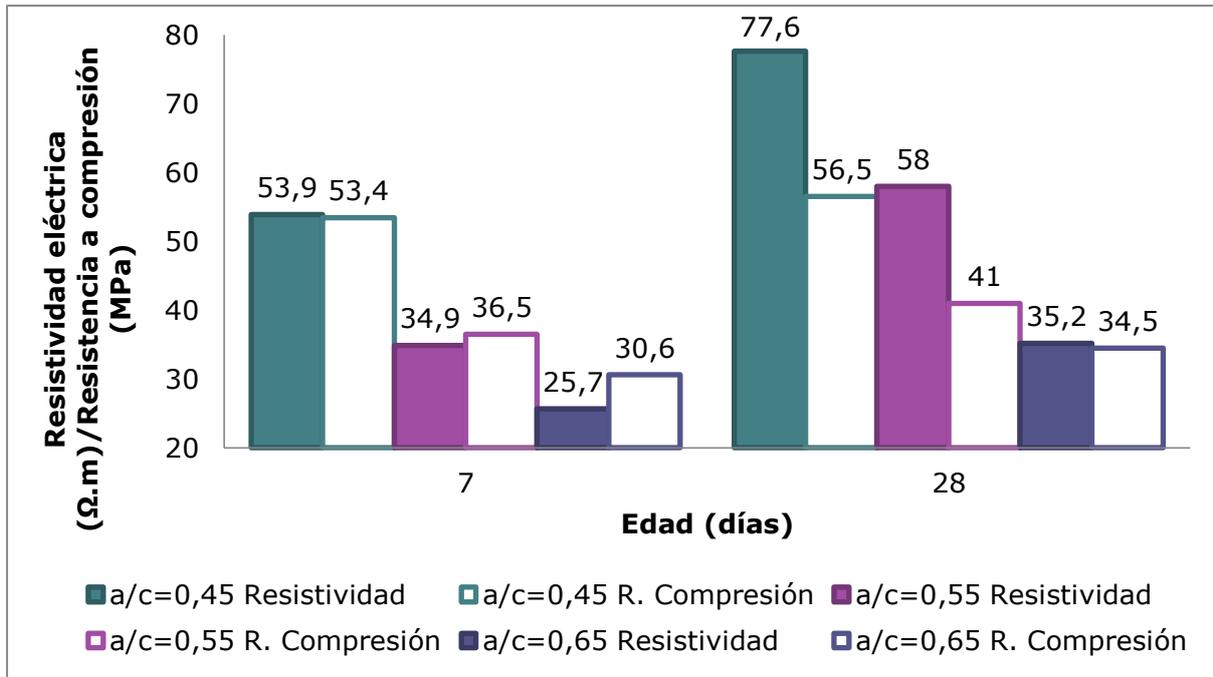


Ilustración 9.5. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica. Fase 2.

9.5. Relación entre la penetración de agua a presión y la resistividad eléctrica.

Como ya se habló en apartados anteriores, la permeabilidad del hormigón depende de la porosidad del material, de la interconexión entre los poros, su forma, tamaño, etc., variables que influyen también en su resistividad eléctrica. El ensayo de penetración de agua a presión nos da una apreciación de la profundidad que podría tener el ataque de los agresivos en el hormigón; cuanto mayor sea el índice de poros, mayor serán la profundidad de penetración de agua y el posible ataque.

En los resultados obtenidos podemos ver que existe una relación inversamente proporcional entre la profundidad penetración de agua y la resistividad eléctrica; está última disminuye a medida que aumenta la primera.

Según se aumenta la relación a/c (y con ello la porosidad del material) de 0,45 a 0,65; vemos que la resistividad disminuye un 55% mientras que la profundidad de penetración de agua aumenta un 46%.

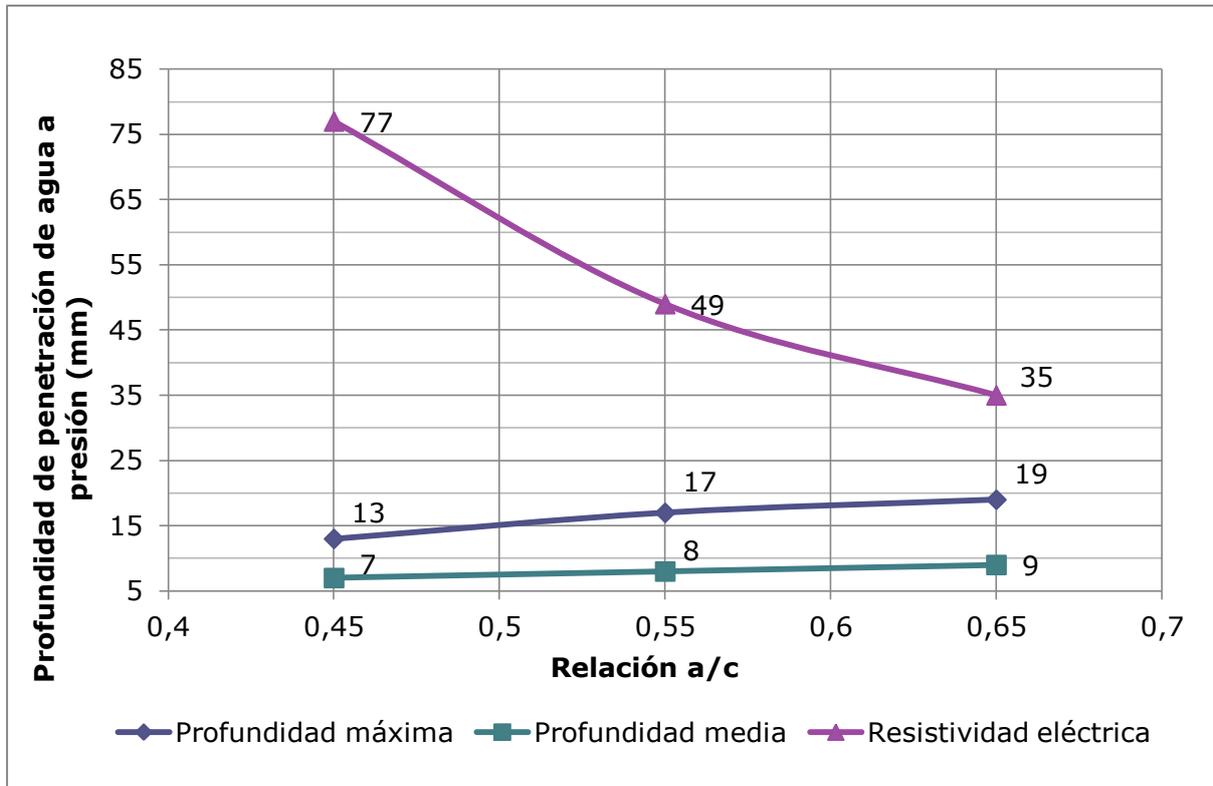


Ilustración 9.6. Relación entre la penetración de agua a presión y la resistividad eléctrica.

9.6. Aplicación del modelo de predicción de durabilidad basado en la resistividad eléctrica.

9.6.1. Diseño de un hormigón para la obtención de una determinada resistividad.

Primero, mediante la [Ecuación 6.20], propuesta por *D'Andrea (2010)*, se calcula la resistividad aparente ρ_{ap} para el tiempo de vida útil que define el proyectista, en este caso se proponen dos supuestos de 50 y 100 años. Se utilizan los valores de K_{cl} de la Tabla 6.7 y los valores aproximados de r_{cl} de la Tabla 6.8. Se calcula para las clases de exposición en ambiente marino que serían las más desfavorables con respecto al ataque por cloruros. Se realiza la conversión mediante la [Ecuación 6.14] para la posterior comparación con la resistividad calculada y la resistividad experimental a 28 días.

$$\rho_{ap} (ELD_i) = \frac{K_{CL,CO_2} \cdot t_L}{r_{min}^2} \quad \text{[Ecuación 6.20]}$$

$$\rho_{ap} = \rho_{es} \cdot r_{Cl,CO_2} \quad \text{[Ecuación 6.14]}$$

Durabilidad en el hormigón armado

Clase de exposición	t_L (años)	r_{min} (mm)	K_{Cl} ($\Omega cm^3/año$)	ρ_{ap}	r_{Cl}	ρ_{es}
IIIa d>500m de la costa	50	45	5000	123,5	2,0	61,7
	100	65	5000	118,3	2,0	59,2
IIIa d<500m de la costa	50	45	10000	246,9	2,0	123,5
	100	65	10000	236,7	2,0	118,3
IIIb	50	50	20000	400,0	2,0	200,0
	100	70	20000	408,2	2,0	204,1
IIIc	50	50	25000	500,0	2,0	250,0
	100	70	25000	510,2	2,0	255,1

Tabla 9.3. Cálculo de la ρ_{ap} para las clases de exposición IIIa, IIIb y IIIc.

Posteriormente se calcula la resistividad para los distintos hormigones diseñados mediante la ley de Archie [Ecuación 5.5].

		Hormigón		
		Relación a/c	Contenido cemento	Designación
Fase 1		0,55	330	F1-A
		0,55	365	F1-B
		0,55	400	F1-C
Fase 2		0,45	400	F2-A
		0,55	400	F2-B
		0,65	400	F2-C

Tabla 9.4. Designación de tipos de hormigón utilizados.

Hormigón	α aprox.	ϵ_p	γ	ϵ calc.	m	ρ_0 aprox.	ρ calc.
F1-A	0,80	0,30	0,29	0,09	1,70	0,50	31,2
F1-B	0,80	0,30	0,32	0,10	1,70	0,50	26,3
F1-C	0,80	0,30	0,35	0,11	1,70	0,50	22,5
F2-A	0,80	0,21	0,31	0,07	1,70	0,50	50,9
F2-B	0,80	0,30	0,35	0,11	1,70	0,50	22,5
F2-C	0,80	0,37	0,38	0,14	1,70	0,50	13,9

Tabla 9.5. Cálculo de ρ mediante la ley de Archie.

Hormigón	ρ calc. ($\Omega.m$)	ρ 28 días ($\Omega.m$)	Clase de exposición	t_L (años)	ρ_{es} ($\Omega.m$)
F1-A	31,2	59,4	IIIa d>500m de la costa	50	61,7
F1-B	26,3	58,8		100	59,2
F1-C	22,5	58,2	IIIa d<500m de la costa	50	123,5
F2-A	50,9	77,0		100	118,3
F2-B	22,5	49,1	IIIb	50	200,0
F2-C	13,9	34,5		100	204,1
			IIIc	50	250,0
				100	255,1

Tabla 9.6. Comparativa de resistividad calculada, resistividad experimental a 28 días y resistividad mínima definida en proyecto.

Como se puede observar, la resistividad experimental a 28 días es en todos los casos superior a la calculada mediante la ley de Archie. Sin embargo, sólo una de ellas (F2-A) supera a la resistividad mínima exigida por el proyectista y solamente en el supuesto de la clase de exposición menos agresiva; esto puede

ser debido a la utilización de un cemento Portland puro, sin adiciones, que tiene un factor de retardo bajo.

La solución más apropiada sería el cambio del tipo de cemento utilizado puesto que modificar el contenido de cemento o la relación a/c, tal y como propone *D'Andrea (2010)*, no sería suficiente para salvar las grandes diferencias que se pueden apreciar.

Si se hubiese utilizado un cemento tipo II, se tendría un factor de retardo dos veces mayor que el del tipo I por lo que la resistividad aparente mínima ($\rho_{ap} = \rho \cdot r_{cl}$) exigida en proyecto se reduciría a la mitad.

9.6.2. Cálculo del período de iniciación de la corrosión t_i con el método de durabilidad basado en la resistividad eléctrica.

El proceso se basa en la [Ecuación 6.15] para calcular el período de iniciación de la corrosión, demostrando así la utilidad de la resistividad eléctrica (ρ a 28 días) como indicador de durabilidad en la que se tienen en cuenta, gracias al factor K_{Cl,CO_2} , la concentración del agresivo y los factores que influyen en el transporte de dicho agresivo y, gracias al factor de retardo r_{Cl,CO_2} , se tiene en cuenta la capacidad del medio para la difusión.

Se calcula entonces el tiempo que tardaría el agresivo en entrar en contacto con la armadura, es decir, el tiempo que tardaría en atravesar el recubrimiento de las armaduras. Para la comparación de varias variables se escogen como r_{min} dos valores que se repetirán para las cuatro clases de exposición de las que se habló en el apartado anterior.

Durabilidad en el hormigón armado

	Clase de exposición							
	IIIa (d > 500 m de la costa)		IIIa (d < 500 m de la costa)		IIIb		IIIc	
r_{min} (mm)	45	65	45	65	45	65	45	65
Hormigón	Período de iniciación t_i							
F1-A	48,1	100,4	24,1	50,2	12,0	25,1	9,6	20,1
F1-B	47,6	99,4	23,8	49,7	11,9	24,8	9,5	19,9
F1-C	47,1	98,4	23,6	49,2	11,8	24,6	9,4	19,7
F2-A	62,4	130,1	31,2	65,1	15,6	32,5	12,5	26,0
F2-B	39,8	83,0	19,9	41,5	9,9	20,7	8,0	16,6
F2-C	27,9	58,3	14,0	29,2	7,0	14,6	5,6	11,7

Tabla 9.7. Cálculo del período de iniciación de la corrosión para las clases de exposición IIIa, IIIb y IIIc para los distintos tipos de hormigón confeccionados.

En función de la clase de exposición se puede observar que a medida que se aumenta la agresividad el período de iniciación de la corrosión, como es lógico, disminuye.

Se puede ver también que si aumentamos el recubrimiento aumenta también el período de iniciación de la corrosión ya que el agresivo debe atravesar un mayor espesor de capa de protección de hormigón.

En cuanto al contenido de cemento aunque la diferencia de resultados es muy poco significativa, se aprecia un pequeño descenso del período de iniciación de corrosión según aumenta la cantidad de cemento empleado.

Donde sí se aprecia una gran diferencia de valores es en la variable de la relación agua-cemento. Se puede observar que hay una relación inversamente proporcional entre dicha relación y el período de iniciación de la corrosión, a mayor relación agua-cemento menor será el período de iniciación. Esto es debido a que al aumentar la relación agua-cemento la porosidad del hormigón también aumenta, por lo que el agresivo tendrá más facilidad para penetrar a través del hormigón y llegar a la armadura.

10. Conclusiones.

De todo lo expuesto anteriormente se puede deducir que el uso de la resistividad eléctrica como indicador de corrosión está bien justificado. Hemos podido observar como la variable que más influye en la resistividad es la porosidad del hormigón, y que ésta a su vez la se ve influenciada por otra serie de factores como la relación agua-cemento, el contenido de cemento, etc. Se puede decir que la resistividad tiene una relación inversamente proporcional a la porosidad del hormigón y todos los factores que en ella influyen van a modificar la resistividad del hormigón.

- Los resultados obtenidos sobre la influencia de la cantidad de cemento utilizado en la resistividad eléctrica no han sido los esperados, ya que, la diferencia entre un hormigón con un contenido de cemento de 330kg a uno con un contenido de cemento de 400kg a 28 días sólo a resultado de un 2%. Es posible que esto se deba al tipo de cemento utilizado, Portland puro, y si se hubiese utilizado un cemento con adiciones las diferencias de porcentaje hubiesen sido más notables. O también puede deberse a que las reacciones de hidratación del cemento aún no hubiesen concluido y por tanto la resistividad eléctrica no llegase aún a estabilizarse.
- Se puede justificar la relación inversamente proporcional que antes citábamos entre la porosidad y la resistividad eléctrica con los resultados obtenidos sobre la relación agua-cemento. Podemos ver que a 7 días se obtiene una diferencia de un 52% entre la resistividad del hormigón con relación $a/c=0,45$ y el de $a/c=0,65$; a 28 días esta diferencia es de un 55% y a 42 días de 52%.
- También se deduce del estudio realizado que la temperatura influye notablemente en la resistividad eléctrica. Se observa que al realizar el curado del hormigón a 65°C y para una relación $a/c=0,45$ disminuye en torno a un 28% respecto al curado del hormigón a 19°C . La disminución es de un 33% para la relación $a/c=0,55$ y un 37% para la relación $a/c=0,65$.

- Volviendo a la relación entre la porosidad y la resistividad, y sabiendo que la penetración de agua en el interior del hormigón depende esencialmente de la porosidad de éste, podemos deducir que la penetración de agua (y del agresivo en su caso) tiene también una relación inversamente proporcional a la resistividad eléctrica. Se justifica experimentalmente variando la relación agua-cemento de 0,45 a 0,65; con ello se observa que la resistividad disminuye un 55% mientras que la profundidad de penetración de agua aumenta un 46%.
- La resistividad eléctrica y la resistencia a compresión tienen en común su relación inversamente proporcional a la porosidad del material, según aumenta la resistividad eléctrica aumenta también la resistencia a compresión. Mediante la resistividad eléctrica, haciendo comprobaciones experimentales a 7 días, se podría tener una idea de la resistencia a compresión que se obtendrá a 28 días sin necesidad de realizar el ensayo de rotura a compresión.

En cuanto a la predicción de la durabilidad mediante el método de resistividad eléctrica se puede concluir:

- Por un lado, que la resistividad eléctrica es un método de ensayo no destructivo, por tanto repetible, que nos informa del tiempo que tardará la armadura en comenzar a ser atacada por los agresivos y se puede predecir, mediante mediciones 'in situ', en qué circunstancias se encuentra la armadura de la estructura en un momento fijado. Todo ello de una manera bastante precisa pues el método de predicción de la durabilidad mediante la resistividad eléctrica tiene en cuenta tanto los factores ambientales (concentración del agresivo, cinética del transporte, humedad relativa, temperatura, etc.), como la capacidad del medio para la difusión. Se ha comprobado experimentalmente mediante la medición de la resistividad eléctrica que hay una relación inversamente proporcional entre la relación agua-cemento y el período de iniciación de la corrosión. Como podemos ver en la tabla siguiente a medida que aumentamos la relación

a/c de 0,45 a 0,65 el período de iniciación de la corrosión se reduce aproximadamente en un 55%.

	Clase de exposición							
	IIIa (d > 500 m de la costa)		IIIa (d < 500 m de la costa)		IIIb		IIIc	
r_{min} (mm)	45	65	45	65	45	65	45	65
Porcentaje de disminución de t_i a medida que aumenta la relación a/c	55,3%	55,2%	55,1%	55,1%	55,1%	55,1%	55,2%	55,0%

Tabla 10.1. Porcentaje de disminución de t_i a medida que aumenta la relación a/c.

- Y por otro lado, podemos concluir, que es posible el diseño en fase de proyecto de un hormigón con una durabilidad determinada, confeccionado individualmente para cada estructura, teniendo en cuenta los factores anteriormente citados que influyen de manera decisiva en la durabilidad del hormigón. Este sería un gran paso a seguir en futuras normativas, en las que se podría exigir, además de la resistencia a compresión a 28 días como condición necesaria para el control de calidad, una resistividad eléctrica determinada a una edad definida.

En estos tiempos en los que los avances tecnológicos nos permiten hacer estructuras de ingeniería espectaculares y de gran tamaño, garantizar una vida útil desde proyecto debería de ser una de las principales premisas para los proyectistas. El método de predicción de la durabilidad basado en la resistividad eléctrica en un futuro próximo será un método de referencia para el diseño y control de calidad de hormigones. Nos permitirá precisar con bastante exactitud la vida útil de cualquier estructura, puesto que este método es individualizado para cada una de ellas y tiene en cuenta todos los factores que pueden afectar a su durabilidad. Su aplicación es sencilla y no se necesitan grandes conocimientos sobre la materia para poder utilizarlo, esto facilitará su uso a todos los niveles.

Como reflexión final puedo decir que haber participado en este estudio experimental en el que se estudiaron la influencia de diferentes factores sobre la durabilidad del hormigón, me ha hecho darme cuenta de la gran importancia que tiene el diseño de un buen hormigón para el futuro de una estructura, en especial la óptima elección de la relación agua-cemento. Cuando cursaba la

asignatura de hormigón no era consciente de por qué mis profesores insistían tanto en que esta variable era tan importante y mediante este proyecto he podido experimentar personalmente la influencia que ésta tiene en la durabilidad.

Quiero añadir también que haber podido realizar esta experiencia en un laboratorio de control de calidad de materiales ha sido para mí un gran descubrimiento. En general los alumnos de esta titulación no tenemos gran conocimiento de las tareas que se llevan a cabo en un laboratorio de control de calidad y por ello muchas veces nos cerramos esta puerta pensando que es "aburrido" o "monótono", por mi experiencia creo que es un gran error pensar de esta manera. En mi opinión este campo es muy interesante y muy motivador para una persona con ganas de aprender cada día un poco más; te da la posibilidad de realizar labores de investigación y te obliga a pensar y agilizar tu mente para resolver cada situación o problema que se te plantea.

11. Bibliografía.

11.1. Libros.

Calavera, J. 1996. *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado. Tomo I.* Madrid: INTEMAC.

Cobo Escamilla, Alfonso. 2001. *Corrosión de armaduras de estructuras de hormigón armado: causas y procedimientos de rehabilitación.* Madrid: Fundación Escuela de la Edificación.

Fernández Cánovas, Manuel. 1994. *Patología y terapéutica del hormigón armado.* Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

González Fernández, José A. 1984. *Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión.* Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.

11.2. Artículos.

Aguirre, A.M.; Mejía de Gutiérrez, R. 2013. *Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas.* Revista Materiales de Construcción. Vol. 63 nº 309, pág. 7-38.

Alonso, C.; Andrade, C. 1987. *Aproximación al efecto de la resistividad del hormigón en la corrosión de armaduras embebidas en hormigón.* Revista Materiales de Construcción. Vol. 37, nº 207, pág. 7-12.

Andrade Pedrix, Carmen; Barberá Ortega, E.; Perepérez Ventura, B. 1987. *La agresividad ambiental y la durabilidad de las estructuras de hormigón.* Revista Informes de la Construcción. Vol. 38 nº 388, pág. 17-24.

Andrade Pedrix, Carmen. 1992. *Durabilidad.* Revista Hormigón y Acero nº 182, pág. 29-39.

Andrade, C.; D'Andrea, R.; Castillo, A.; Castellote, M. 2009. *The use of electrical resistivity as NDT method for the specification of the durability of reinforced concrete.* Nantes (France): Non-Destructive Testing in Civil Engineering.

Andrade Pedrix, Carmen; D'Andrea, Renata. 2010. *Concrete mixture design based on electrical resistivity*. Ancona (Italia): Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies.

Andrade Pedrix, Carmen; D'Andrea, Renata. 2011. *La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad*. Revista Alconpat. Vol. 1, nº 2, pág. 93-101.

Andrade Pedrix, Carmen. 2013. *Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de conservación*. Revista Alconpat. Vol. 3, nº 2, pág. 82-101.

Calavera Ruiz, José. *Las estructuras*. 1999. Revista Ingeniería y Territorio nº 48, pág. 40-47.

Hostalet Alba, Francisco. 1994. *Situación actual de las técnicas de ensayo no destructivo del hormigón*. Revista Informes de la Construcción. Vol. 46, nº 433, pág. 19-31.

Nistral Cordero, Ángel Francisco; Retana Maqueda, M^a Jesús; Ruiz Abrio, Teresa. 2012. *El Hormigón: Historia, antecedentes en obras y factores indicativos de su resistencia*. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Vol. X (Separata). Madrid: Universidad Alfonso X El Sabio.

Puertas, Francisca; Palomo, Ángel; Blanco, Teresa. 1991. *Microestructuras interfaciales en el hormigón*. Revista Materiales de Construcción. Vol. 41, nº 221, pág. 91-106.

11.3. Tesis doctorales y trabajos académicos.

Alcaraz Marín, Jesús. 2012. *Microestructura del hormigón*. Murcia: Universidad Politécnica de Cartagena.

Castillo Talavera, Ángel. 2005. *Modelado del efecto de las acciones climáticas en la cantidad de agua en estado líquido del hormigón para la estimación de la corrosión de la armadura*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

D'Andrea, Renata. 2010. *Predicción de la durabilidad del hormigón armado a partir de indicadores de corrosión: aplicación de la resistividad eléctrica*. Madrid:

Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

González Sersen, Álvaro Mauricio. 2011. *Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Molina Bas, Omar I. 2008. *La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento Portland en la durabilidad del hormigón*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.

Naar, M. Samuel. 2006. *Évaluation non destructive du béton par mesures de résistivité électrique et thermographie infrarouge passive*. Burdeos: L'Université Bordeaux 1. École Doctorale des Sciences Physiques et de l'Ingénieur.

Quidel Cortés, Rodrigo Alberto. 2008. *Estudio experimental de la relación permeabilidad resistividad eléctrica del hormigón*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

11.4. Páginas web.

Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). *Historia del cemento*. www.ieca.es. Consultado en línea: Marzo, 2014.

11.5. Normativa.

ACI 318-08. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Reported by ACI Committee 318.

ACI 201.2R-08. Guide to Durable Concrete. Reported by ACI Committee 201.

EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Con comentarios de los miembros de la Comisión Permanente del Hormigón.

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

UNE-EN-1992-1-1:2013. Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para la edificación.

UNE-EN-12350-2:2009. Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento.

UNE-EN-12390-1:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.

UNE-EN-12390-2:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.

UNE-EN-12390-3:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

UNE-EN-12390-8:2013. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.

UNE-EN-13295:2005. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistencia a carbonatación.

UNE-83988-1:2008. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 1: Método directo (método de referencia).

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.

UNE-83992-1:2012. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 1: Método natural para la determinación del tiempo hasta corrosión.

UNE-83992-2:2012. Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Ensayos de penetración de cloruros en el hormigón. Parte 2: Método integral acelerado.

12. Índice de tablas.

Tabla 2.1. Componentes del cemento Portland y sus proporciones (Alcaraz Marín, 2012; D’Andrea, 2010).....5

Tabla 2.2. Límites usuales de composición del cemento Portland [Neville, 1997].6

Tabla 4.1. Criterios de valoración de resultados de ensayo de profundidad de penetración de agua a presión (Art. 37.3.3. EHE-08) 32

Tabla 4.2. Clases resistentes mínimas indicativas (Eurocódigo 2). 35

Tabla 5.1. Clasificación de los métodos de ensayo disponibles (Hostalet, 1994). 38

Tabla 5.2. Rangos de la resistividad en relación con la probabilidad de corrosión [Alonso et al., 1988; Feliú et al., 1989] 60

Tabla 6.1. Coeficiente C_{env} (Tabla A.9.1. Anejo 9. EHE-08)..... 63

Tabla 6.2. Coeficiente C_{air} (Tabla A.9.2. Anejo 9. EHE-08) 63

Tabla 6.3. Coeficientes a y b (Tabla A.9.3. Anejo 9. EHE-08) 64

Tabla 6.4. Coeficiente $D(t_0)$ (Tabla A.9.4. Anejo 9. EHE-08)..... 65

Tabla 6.5. Concentración de cloruros en la superficie de hormigón (Tabla A.9.4. Anejo 9. EHE-08)..... 66

Tabla 6.6. Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición (Tabla A.9.5. Anejo 9. EHE-08)..... 67

Tabla 6.7. Coeficiente K_{Cl} según tipo de ambiente (D’Andrea, 2010) 69

Tabla 6.8. Valores de r_{Cl} promedio y desviación típica calculados en función de los distintos tipos de cemento y mediante los métodos de difusión y migración. 70

Tabla 6.9. Valores aproximados del grado de hidratación a los 28 días [Lam y col., 2000; Chen y Brouwers, 2004; Wang y col., 2004; Pane y Hansen, 2005] 73

Tabla 6.10. Valores de m y sus parámetros estadísticos función del tipo de cemento (D’Andrea, 2010)..... 74

Tabla 7.1. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006..... 83

Tabla 7.2. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006..... 84

Tabla 7.3. Análisis granulométrico por vía húmeda según UNE-EN 933-1:1998 + A1:2006..... 84

Tabla 7.4. Composición de áridos ajustada mediante la fórmula de Fuller. 85

Tabla 7.5. Dosificación D330, a/c = 0,55. 86

Tabla 7.6. Dosificación D365, $a/c = 0,55$	86
Tabla 7.7. Dosificación D400, $a/c = 0,55$	87
Tabla 7.8. Dosificación D400, $a/c = 0,45$	87
Tabla 7.9. Dosificación D400, $a/c = 0,65$	87
Tabla 8.1. Resultados de ensayo de asentamiento de cono de Abrams para Fase 1 (UNE EN 12350-2:2009).	89
Tabla 8.2. Resultados de ensayo de asentamiento de cono de Abrams para Fase 2 (UNE EN 12350-2:2009).	89
Tabla 8.3. Resultados de ensayo de rotura a compresión (MPa) de la Fase 1 (UNE EN 12390-3).	89
Tabla 8.4. Resultados de ensayo de rotura a compresión (MPa) de la Fase 2 (UNE EN 12390-3).	90
Tabla 8.5. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 1 (UNE 83988-2).	91
Tabla 8.6. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 2 (UNE 83988-2).	93
Tabla 8.7. Resultados de ensayo de resistividad eléctrica mediante el método de Wenner para Fase 2 a distintas temperaturas (UNE 83988-2).	93
Tabla 8.8. Resultados de ensayo de profundidad de penetración de agua bajo presión (UNE EN 12390-8).....	93
Tabla 9.1. Diferencia de porcentajes de resultados de resistividad eléctrica para Fase 1.....	94
Tabla 9.2. Diferencia de porcentajes de resultados de resistividad eléctrica para Fase 2.....	95
Tabla 9.3. Cálculo de la ρ_{ap} para las clases de exposición IIIa, IIIb y IIIc.	100
Tabla 9.4. Designación de tipos de hormigón utilizados.	100
Tabla 9.5. Cálculo de ρ mediante la ley de Archie.	100
Tabla 9.6. Comparativa de resistividad calculada, resistividad experimental a 28 días y resistividad mínima definida en proyecto.....	100
Tabla 9.7. Cálculo del período de iniciación de la corrosión para las clases de exposición IIIa, IIIb y IIIc para los distintos tipos de hormigón confeccionados.....	102
Tabla 10.1. Porcentaje de disminución de t_i a medida que aumenta la relación a/c	105

13. Índice de ecuaciones.

[Ecuación 2.1] Proceso de hidratación de la pasta de cemento.	6
[Ecuación 2.2] Porosidad total.	9
[Ecuación 2.3] Porosidad abierta.....	10
[Ecuación 2.4] Porosidad cerrada.	10
[Ecuación 2.5] Fórmula de Powers.	11
[Ecuación 3.1] Proceso de carbonatación.	20
[Ecuación 3.2] Avance del frente carbonatado.	21
[Ecuación 3.3] Ecuación de Nernst-Plank.....	26
[Ecuación 3.4] Segunda ley de Fick.	27
[Ecuación 3.5] Ley de Fick.	28
[Ecuación 3.6] Determinación del coeficiente de difusión.....	28
[Ecuación 3.7] Relación entre el coeficiente de difusión aparente y efectivo.	29
[Ecuación 4.1] Comprobación del Estado Límite de Durabilidad.	33
[Ecuación 4.2] Vida útil de cálculo.....	33
[Ecuación 5.1] Ley de Ohm.	42
[Ecuación 5.2] Resistividad de materiales multifases.	45
[Ecuación 5.3] Fracción de volumen de los áridos.....	45
[Ecuación 5.4] Ecuación de Maxwell.	45
[Ecuación 5.5] Factor de formación.	46
[Ecuación 5.6] Resistencia eléctrica del hormigón.....	47
[Ecuación 5.7] Constante de celda para el método directo.	48
[Ecuación 5.8] Resistividad eléctrica.....	48
[Ecuación 5.9] Constante de celda para el método Wenner.....	49
[Ecuación 5.10] Relación entre resistividad eléctrica y temperatura.	55
[Ecuación 5.11] Fórmula de Nernst-Einstein.	59
[Ecuación 5.12] Intensidad de corrosión.	60
[Ecuación 6.1] Cálculo del período de vida útil.	62
[Ecuación 6.2] Período de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación.	63
[Ecuación 6.3] Coeficiente de carbonatación.....	63
[Ecuación 6.4] Resistencia media del hormigón a compresión.	63
[Ecuación 6.5] Período de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros.	64

[Ecuación 6.6] Coeficiente de penetración de cloruros.....	64
[Ecuación 6.7] Coeficiente de difusión de cloruros.	65
[Ecuación 6.8] Período de propagación de la corrosión.	66
[Ecuación 6.9] Estimación de vida útil para ataque por carbonatación.	67
[Ecuación 6.10] Estimación de vida útil para ataque por cloruros.....	67
[Ecuación 6.11] Factor de edad.	68
[Ecuación 6.12] Profundidad de penetración del agresivo.	68
[Ecuación 6.13] Profundidad de penetración del agresivo	68
[Ecuación 6.14] Resistividad aparente del hormigón.	69
[Ecuación 6.15] Período de iniciación de la corrosión.	69
[Ecuación 6.16] Factor de retardo.	70
[Ecuación 6.17] Período de propagación de la corrosión.	70
[Ecuación 6.18] Período de propagación de la corrosión.	70
[Ecuación 6.19] Período de vida útil mediante resistividad eléctrica.	71
[Ecuación 6.20] Resistividad aparente para ELDi.	72
[Ecuación 6.21] Resistividad aparente para ELDp.	72
[Ecuación 6.22] Porosidad del hormigón.	73
[Ecuación 6.23] Fracción de pasta por volumen de hormigón	73

14. Índice de ilustraciones.

Ilustración 2.1. Ettringita rellenando un poro. [Fuente: www.monografias.com],.7

Ilustración 2.2. Pasta de cemento hidratada: Ca(OH)_2 y C-S-H [Fuente: www.concrete.0catch.com]9

Ilustración 3.1. Daños de abrasión-cavitación [Fuente: www.arqhys.com]. 14

Ilustración 3.2. Delaminación superficial producida por la corrosión de la armadura. [Fuente: propia]..... 15

Ilustración 3.3. Fisuración producida por la corrosión de la armadura [Fuente: propia] 15

Ilustración 3.4. Cubo de hormigón sometido a sulfatos. [Fuente: www.concrete.0catch.com] 16

Ilustración 3.5. Ataque por sulfatos. [Fuente: www.concrete.0catch.com] 16

Ilustración 3.6. Armadura corroída. [Fuente: propia] 18

Ilustración 3.7. Hormigón carbonatado.[Fuente: www.construmatica.com] 21

Ilustración 3.8. Utilización de indicadores de pH. [Fuente: www.intemac.es] 22

Ilustración 3.9. Zona de carrera de mareas.[Fuente: www.monografias.com] .. 24

Ilustración 3.10. Armadura al descubierto. [Fuente: www.improrep.com] 30

Ilustración 5.1. Probeta sometida al ensayo de resistencia a compresión. [Fuente: propia] 39

Ilustración 5.2. Probeta sometida a ensayo de penetración de agua bajo presión. [Fuente: propia] 39

Ilustración 5.3. Gráfico representativo de la Ley de Ohm. [Fuente: www.wikifisica.etsit.upm.es] 42

Ilustración 5.4. Circulación de la corriente eléctrica a través del hormigón.[Fuente: Tesis Naar] 44

Ilustración 5.5. Método directo o de referencia. [Fuente: Tesis D'Andrea]..... 47

Ilustración 5.6. Resistímetro tipo Wenner. [Fuente: www.proceq.com] 49

Ilustración 7.1. Ensayo de asentamiento del cono de Abrams. [Fuente: propia]. 77

Ilustración 7.3. Procedimiento a seguir en el ensayo de asentamiento..... [Fuente: www.construmatica.com]..... 77

Ilustración 7.4. Medición del asentamiento de la muestra. [Fuente: propia] 78

Ilustración 7.5. Asentamiento no válido. [Fuente: propia]..... 78

Ilustración 7.6. Ilustración 7.7. Resistímetro tipo Wenner utilizado. [Fuente: propia] 79

Ilustración 7.8. Ilustración 7.9. Calibración del aparato. [Fuente: propia]	79
Ilustración 7.10. Medición de resistividad con aparato tipo Wenner. [Fuente: propia]	80
Ilustración 7.11. Probetas sometidas a ensayo de penetración de agua a presión . [Fuente: propia]	81
Ilustración 7.12. Ilustración 7.13. Rotura de probetas para ensayo de penetración de agua a presión. [Fuente: propia]	81
Ilustración 7.14. Profundidad de penetración de agua en las probetas ensayadas. [Fuente: propia].....	82
Ilustración 7.15. Ilustración 7.16. Rotura de probetas a compresión. [Fuente: propia]	83
Ilustración 7.17. Granulometría de gravilla 4/12 granítica. [Fuente: propia].....	84
Ilustración 7.18. Granulometría de arena 0/4 granítica. [Fuente: propia].....	84
Ilustración 7.19. Granulometría de arena 0/4 caliza. [Fuente: propia]	85
Ilustración 7.20. Composición de áridos ajustada mediante curva de Fuller. [Fuente: propia]	86
Ilustración 7.21. Ilustración 7.22. Fabricación y curado de probetas. [Fuente: propia]	88
Ilustración 9.1. Relación entre la resistividad eléctrica y el contenido de cemento. [Fuente: propia]	94
Ilustración 9.2. Relación entre la resistividad eléctrica y la relación agua/cemento. [Fuente: propia]	95
Ilustración 9.3. Influencia de la temperatura en la resistividad eléctrica. [Fuente: propia]	96
Ilustración 9.4. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica. Fase 1. [Fuente: propia].....	97
Ilustración 9.5. Relación entre la resistencia a compresión y la resistividad eléctrica. Fase 2. [Fuente: propia].....	98
Ilustración 9.6. Relación entre la penetración de agua a presión y la resistividad eléctrica. [Fuente: propia]	99