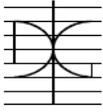


# DISEÑO AUTOMATIZADO DE VIGAS RECTANGULARES, BASADO EN CRITERIOS DE ECONOMÍA Y DURABILIDAD FRENTE AL ATAQUE POR CLORUROS

Por:  
Clemente García, Eduardo

JULIO de 2015

Autor/Author: Clemente García, Eduardo		Fecha/Date: 28/07/2015
Título/Title: Diseño automatizado de vigas rectangulares, basado en criterios de economía y durabilidad frente al ataque por cloruros		
Directores del trabajo/Supervisores: Yepes Piqueras, Víctor Bonilla Salvador, María Mercedes	Código/Code: CST/MIH-0	Nº Páginas/Pages: 160
Departamento/ Departament: Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil		
Universidad / University: Universitat Politècnica de València		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave/Keywords: Viga rectangular, red neuronal artificial, optimización, heurística, difusión de cloruros.		
Código Unesco: 33-3305-05/32		



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Víctor Yepes Piqueras, director del Máster Oficial en Ingeniería del hormigón y tutor de este trabajo de investigación, por su dedicación y por transmitirme el interés por la Optimización Heurística.

En segundo lugar y no menos importante, a María Mercedes Bonilla Salvador, investigadora del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) y cotutor de este trabajo, por su colaboración, por su atención y por transmitirme su saber en el ámbito de la química que concierne a los cloruros en el hormigón.

Agradecer a ambos por sus innumerables consejos y propuestas de mejora a lo largo de esta investigación, que han hecho posible el desarrollo de este trabajo.

También a Tatiana García Segura, por sugerir ideas muy útiles para este trabajo.

A la Universitat Politècnica de València y a los profesores del Máster Oficial en Ingeniería del Hormigón, por su profesionalidad y ayuda en todo momento.

Por último, a mi familia y amigos, por su apoyo incondicional en todo momento, en especial a Cidalia y María.

## RESUMEN

A la hora de realizar estructuras de hormigón armado los puntos clave que se deben tener en cuenta son la integridad estructural, la economía y la durabilidad de las mismas, incluso hay otros aspectos que han cobrado relativa importancia en la actualidad como la eficiencia energética y el impacto medioambiental.

El presente trabajo se ha realizado enfocando los tres primeros puntos mencionados anteriormente, el primero mediante la comprobación de nuestra estructura, una viga biapoyada, satisfaciendo los requisitos de la normativa EHE-08 (cuantías mínimas, los estados límite últimos y los de servicio), el segundo mediante la optimización heurística de nuestra estructura y el tercero satisfaciendo el estado límite de durabilidad también de la normativa EHE-08.

Respecto al tema de la durabilidad, para ver cómo se comportan los diferentes hormigones fabricados con cementos con adiciones en ambientes con cloruros, se ha procedido a realizar una predicción de datos referentes a coeficientes de difusión de cloruros en el hormigón a un año, edad del hormigón a la que se realizan los ensayos, consiguiendo con ello normalizar una tabla de estos coeficientes para varios tipos de cementos.

Los valores obtenidos para los coeficientes de difusión, se utilizan en la optimización heurística de la estructura para el cálculo del tiempo que tardaría el elemento estructural en manifestar un grado significativo de corrosión de la armadura, lo que engloba el período de iniciación y de propagación. Con ello también conseguimos averiguar qué tipo de adición del hormigón se comporta mejor en los diferentes ambientes y cuanto podríamos abaratar nuestra estructura. También se puede averiguar que variables son las que nos condicionan que nuestra estructura sea más o menos durable.

## ABSTRACT

At the time of perform reinforced concrete structures the key points to consider are the structural integrity, economy and durability of the same, even there are other aspects that have taken relative importance today as energy efficiency and environmental impact.

This work has been performed focusing on the first three points mentioned above, the first by checking our structure, a simply supported beam, satisfying the requirements of the regulations EHE-08 (minimum amounts, the ultimate limit state and service) the second by the heuristic optimization of our structure and the third satisfying the durability limit state also in EHE-08.

On the issue of durability, to see how behave different concretes made with cements with additions in environments with chlorides , we proceeded to make a prediction of data on diffusion coefficients of chloride in the concrete to an year, age concrete to which tests are performed, thereby achieving a table of normalizing coefficients for these various types of cement.

The values obtained for the diffusion coefficients are used in the heuristic optimization of the structure to calculate the time it would take the structural element in manifesting a significant degree of reinforcement corrosion, which includes the period of initiation and propagation. This also got to find out what kind of addition of concrete is better behaves in different environments and how could cheapen our structure. It can also find out what are the variables that determine that our structure more or less durable.

## INDICE

	Página
Listado de figuras .....	1
Listado de tablas .....	2
Ecuaciones y fórmulas.....	3
1 Capítulo: Introducción .....	4
1.1 Optimización en el diseño de estructuras.....	5
1.2 Objetivo del trabajo .....	5
1.3 El problema de los cloruros.....	6
1.4 Estructura del trabajo .....	7
2 Capítulo: Optimización de estructuras de hormigón y métodos heurísticos .....	8
2.1 Estado del arte.....	8
2.1.1 Antecedentes y evolución de la optimización en estructuras de hormigón armado. ....	8
2.1.2 Optimización heurística de estructuras de hormigón armado.....	10
2.2 Técnicas heurísticas .....	15
2.2.1 Redes Neuronales Artificiales (RNA) - (ANN: Artificial Neural Network).....	15
2.2.2 Algoritmos genéticos (GA).....	17
2.2.3 Algoritmos de búsqueda por gradiente (Descent local search (DLS)) ..	17
3 Capítulo: Cloruros en el hormigón.....	19
3.1 Cloruros en las estructuras de hormigón.....	19
3.2 Cloruros en la EHE-08.....	23
3.3 Técnicas de control de cloruros.....	25
3.4 Modelo desarrollado por FIB – Model Code 2010 .....	26
3.5 Predicción de coeficientes de difusión de cloruros mediante una red neuronal... ..	28
3.6 Datos de coeficientes de difusión de cloruros .....	30
3.7 Estudios recientes sobre cloruros.....	34
4 Capítulo : Descripción del problema de optimización.....	35
4.1 Introducción .....	35
4.2 Descripción del problema .....	36

4.2.1	Definición geométrica .....	36
4.2.2	Armado .....	36
4.2.3	Materiales .....	37
4.2.4	Cargas que intervienen.....	37
4.3	Comprobaciones geométricas previas.....	38
4.4	Comprobaciones de cuantías mínimas .....	38
4.4.1	Cuantía geométrica mínima (art. 42.3.5 EHE-08) .....	38
4.4.2	Cuantía mecánica mínima (art. 42.3.2 EHE-08) .....	39
4.4.3	Cuantía mínima de cortante (art. 44.2.3.4.1EHE-08).....	39
4.5	Comprobaciones en Estado Límite Último.....	39
4.5.1	Flexión .....	39
4.5.2	Cortante.....	42
4.5.2.1	Compresión oblicua del hormigón (art.44.2.3.1 EHE-08) .....	42
4.5.2.2	Agotamiento por tracción en el alma (art.44.2.3.2.2 EHE-08) .....	43
4.6	Comprobaciones en estado límite de servicio .....	44
4.6.1	Verificación del estado límite de fisuración por tracción (art.49.2.3 EHE-08).....	44
4.6.2	Cálculo de la flecha (art. 50.1 EHE-08) .....	46
4.6.2.1	Flechas activas .....	46
4.6.2.2	Flechas diferidas.....	47
4.6.3	Cálculo relativo al estado límite de durabilidad (Anejo 9º EHE-08) .....	48
4.6.3.1	Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión .....	49
4.6.3.2	Periodo de iniciación .....	50
4.6.3.3	Modelo de penetración de cloruros .....	50
4.6.3.4	Período de propagación .....	52
4.6.3.5	Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras.....	52
4.7	Definición del problema de optimización. ....	53
5	Capítulo: Aplicación de las heurísticas.....	54
5.1	Redes neuronales artificiales.....	54
5.1.1	Resultados obtenidos de la red neuronal .....	58
5.1.2	Diferencia de datos entre la EHE-08 y los obtenidos.....	59
5.2	Descripción del algoritmo genético .....	61

5.3	Descripción del algoritmo de búsqueda por gradiente (Descent local search (DLS)).....	65
6	Capítulo. Estudio paramétrico.....	67
6.1	Recubrimientos.....	67
6.2	Variables.....	68
6.3	Tiempo total necesario para un ataque significativo .....	68
7	Capítulo. Conclusiones y futuras líneas de investigación .....	75
7.1	Conclusiones generales.....	75
7.1.1	Cloruros y heurísticas .....	75
7.1.2	Optimización heurística.....	76
7.2	Futuras líneas de investigación .....	78
8	Capítulo: Referencias bibliográficas .....	79
	ANEXO 1: Técnicas de control de los cloruros .....	89
	ANEXO 2: Recopilación de artículos para la predicción de datos .....	108
	ANEXO 3: Datos extraídos de las redes neuronales .....	134
	ANEXO 4: Resultados obtenidos del algoritmo genético (GA).....	141



## Listado de figuras

	Página
Figura 1: Esquema de la neurona de McCulloch-Pitts .....	14
Figura 2: Feed-forward o Perceptrón.....	14
Figura 3: Red neuronal artificial.....	15
Figura 4: Gráfica de búsqueda por gradiente .....	18
Figura 5: Esquema de corrosión del acero por picadura en el hormigón .....	21
Figura 6: Cargas que debe soportar la viga a comprobar. ....	36
Figura 7: Variables geométricas y de armado. ....	37
Figura 8: Estado de cargas para momento flector máximo. ....	40
Figura 9: Dominios de deformación (fuente EHE-08) .....	40
Figura 10: Estado de cargas para cortante máximo en apoyos.....	42
Figura 11: Estado de cargas para cortante máximo a un canto útil del apoyo .....	43
Figura 12: El diagrama de flujo del método Levenberg-Marquardt .....	56
Figura 13: Estructura del Multi Layer Perceptron .....	57
Figura 14: Coeficientes de difusión $D(t_0)$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s] ( $t_0$ a 1 año).1 .....	59
Figura 15: Coeficientes de difusión $D(t_0)$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s] ( $t_0$ a 1 año).2 .....	59
Figura 16: Comparación de los CEM I .....	60
Figura 17: Comparación de los CEM II/A-V .....	60
Figura 18: Comparación de los CEM III .....	61
Figura 19: Diagrama de flujo del algoritmo genético .....	62
Figura 20: Representación de soluciones en GA .....	63
Figura 21: Ruleta empleada en la selección de individuos.....	64
Figura 22: Cruzamiento por dos puntos.....	64
Figura 23: Diagrama de flujo de un DLS .....	66
Figura 24: Resultados $T_L$ para CEM I.....	68
Figura 25: Ampliación de los resultados $T_L$ para CEM I .....	69
Figura 26: Resultados $T_L$ para CEM II/A-V.....	69
Figura 27: Ampliación de los resultados $T_L$ para CEM II/A-V .....	70
Figura 28: Resultados $T_L$ para CEM II/B-V.....	70
Figura 29: Ampliación de los resultados $T_L$ para CEM II/B-V .....	71
Figura 30: Resultados $T_L$ para CEM II/A-W .....	71
Figura 31: Resultados $T_L$ para CEM III.....	72
Figura 32: Ampliación de los resultados $T_L$ para CEM III .....	72
Figura 33: Resultados $T_L$ para CEM IV.....	73
Figura 34: Ampliación de los resultados $T_L$ para CEM IV .....	73

Figura 35: AASHTO T-259 .....	91
Figura 36: Nordtest, NTBuild 443 .....	92
Figura 37: AASHTO T-277 (ASTM C-1202) .....	93
Figura 38: Celda de migración de cloruros.....	95
Figura 39: Una disposición de la configuración de migración. ....	97
Figura 40: Migración celular de Tang y Nilsson .....	98
Figura 41: Dispositivo de medición de resistividad DC. ....	100
Figura 42: Sondeo de matriz de Wenner .....	101
Figura 43: Prueba de penetración por presión.....	103
Figura 44: Técnica de absorción en laboratorio .....	104
Figura 45. Aparato de absorción.....	105

### **Listado de tablas**

	Página
Tabla 1: Coeficiente de migración de cloruros.....	27
Tabla 2: Coeficientes de envejecimiento .....	27
Tabla 3: Promedio de todos los datos .....	30
Tabla 4: Promedio de los datos del ambiente de laboratorio.....	30
Tabla 5: Promedio de los datos del ambiente marino.....	31
Tabla 6: Coeficiente de Variación (Todos los datos).....	32
Tabla 7: Coeficiente de Variación (Datos de laboratorio).....	32
Tabla 8: Coeficiente de Variación (Datos del ambiente marino) .....	32
Tabla 9: Coeficiente de Variación (NTB 443).....	33
Tabla 10: Coeficiente de Variación (AASHTO T277) .....	33
Tabla 11: Coeficiente de Variación (ASTM C-1152).....	33
Tabla 12: Coeficientes de difusión $D(t_0)$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s] ( $t_0$ a 1 año) .....	57
Tabla 13: Clasificación RCPT (ASTM C1202) .....	92
Tabla 14: Resumen de los diferentes métodos de determinación .....	106

## Ecuaciones y fórmulas

	Página
(1) Primera ley de Fick...	22
(2) Segunda ley de Fick .....	22
(3) Contenido crítico de cloruros en el “Model Code 2010” .....	26
(4) Desviación estándar .....	31
(5) Coeficiente de variación .....	31
(6) Separación entre barras de la armadura longitudinal inferior .....	37
(7) Cuantía geométrica de acero en tracción de la viga .....	37
(8) Cuantía geométrica de acero en compresión de la viga .....	38
(9) Cantidad de acero a cortante .....	38
(10) Resistencia media a flexotracción .....	38
(11) Inercia fisurada .....	44
(12) Momento de fisuración crítico .....	45
(13) Tiempo total para el ataque o degradación por ataque de cloruros .....	48
(14) Período de iniciación de la corrosión .....	49
(15) Período de propagación .....	51
(16) El contenido de cloruros (% en peso) en la normativa UNE 112010:2011.....	89
(17) Ecuación de Nernst-Planck.....	93
(18) Ecuación de Nernst-Einstein .....	94
(19) Coeficiente de migración en NordTest NTBuild 492 .....	96
(20) Derivada de la ecuación de Nernst-Einstein .....	97
(21) Resistencia de la corriente continua (DC).....	98
(22) Ecuación de conversión a resistividad .....	98
(23) Ecuación de la resistividad para una región semi-infinita .....	99
(24) Ecuación que rige la convección y difusión en penetración por presión .....	100
(25) Velocidad lineal promedio del flujo .....	101
(26) Solución de la ecuación diferencial (11) .....	101
(27) Ecuación de Valenta .....	101
(28) Absorción de agua acumulada por unidad de superficie .....	103

# 1 Capítulo: Introducción

Hoy en día los cálculos necesarios para los proyectos de construcción en hormigón se realizan mediante un predimensionamiento de la estructura. Posteriormente se hacen unas comprobaciones referentes a la normativa de cada territorio y, finalmente, el proyectista ajusta las dimensiones que la definen para llegar a una solución definitiva, todo ello de manera iterativa.

Para realizar cualquier obra de construcción son necesarios numerosos recursos, los cuales son limitados y caros, por lo que hay que intentar utilizar la menor cantidad posible o acercarse a ella para ejecutarla. Los proyectos se diseñan para que sean económicos, ya que es el modo de cuantificar el consumo de recursos más efectivo. Pero además en la actualidad debemos hablar de durabilidad, que es un aspecto que a largo plazo puede condicionar el resultado económico y estructural de nuestra obra. Esto es debido a que las obras pueden verse afectadas por agentes agresivos, con necesidad de una posterior reparación y por lo tanto una repercusión económica importante. Por otro lado, debemos tener en cuenta la optimización ambiental en aras de una construcción más sostenible.

En definitiva, para ejecutar un proyecto de hormigón estructural con éxito y correctamente se deben aplicar técnicas de diseño y de construcción adecuadas. Además se han de tener conocimientos suficientes de las diferentes técnicas de construcción de los elementos estructurales existentes y de los diferentes materiales del mercado, para así predecir su comportamiento final, y su optimización económica y ambiental.

## **1.1 Optimización en el diseño de estructuras**

Como se ha comentado antes, el proceso de diseño de una estructura se hace de forma tradicional y con base en la experiencia y conocimiento del proyectista, mediante el método de prueba y error hasta conseguir un diseño final, normalmente seleccionando la solución más adecuada como la más económica. Aunque este método no nos asegura la solución óptimo-económica.

Respecto a la optimización de las estructuras se hace complicada su sistematización porque cada una de ellas depende de unas condiciones de contorno, de unos precios de los materiales, de una ejecución que varía de una estructura a otra y debido a la complejidad y lentitud que se necesita para el proceso de prueba y error.

Gracias a la aparición de los ordenadores personales y a su gran capacidad de cálculo, al desarrollo de las técnicas de optimización como las heurísticas y a la participación de proyectistas cualificados, se han realizado numerosos diseños y optimizaciones de diferentes estructuras. Algunos de estos problemas de optimización son de gran complejidad matemática, por lo que al aplicarlo a casos reales es poco práctico. A pesar de ello, la optimización proporciona conclusiones de gran utilidad para el sector de la construcción, como reducir costes materiales y de producción, conseguir una mayor eficiencia energética, mayor durabilidad de las estructuras y conseguir mejoras en temas del medio ambiente.

En este trabajo se desarrolla un proceso de diseño automatizado que comprueba los estados límite, según la normativa española EHE-08, a partir de un diseño aleatorio de una viga de hormigón armado. Además optimizará dicha estructura, desarrollando las características propias de la heurística que genera soluciones y las valora para aceptarlas o rechazarlas.

Las pruebas se han desarrollado completamente en lenguaje Matlab y las aplicaciones obtenidas han ejecutado sobre un Intel (R) Core (TM) 2 Duo P8400 con procesador de 2.26 GHz, con 2.00GB de memoria RAM.

## **1.2 Objetivo del trabajo**

Este “Trabajo Final de Máster” se ha dividido en dos partes claramente diferenciadas. Por un lado la búsqueda de referencias científicas en las que aparezcan coeficientes de difusión de cloruros para diferentes tipos de cemento, con el objetivo de introducirlos en una red neuronal artificial para conseguir una predicción de ellos y elaborar así una propuesta de tabla similar a la Tabla A.9.4 de la EHE-08. Ambas las compararemos y veremos cómo varían los diferentes datos.

Por otro lado, se desarrolla un programa de optimización estructural de una viga biapoyada, mediante la aplicación de técnicas heurísticas, que la comprueba estructuralmente respecto a la normativa EHE-08 y la optimiza para conseguir un menor coste de realización. A este programa le incluiremos los cálculos relativos al estado límite de durabilidad frente al ataque de cloruros, incorporando la nueva tabla de difusión de cloruros propuesta, con el objetivo de analizar los resultados obtenidos y ver cómo se puede alargar la vida útil de nuestras estructuras a un coste bajo.

### **1.3 El problema de los cloruros**

El proceso de degradación más importante del hormigón armado en ambiente marino o en presencia de sales fundentes es la corrosión de las armaduras por la acción de los cloruros, fundamentalmente (Bermúdez Odriozola, M.A. [1]). Para el cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón en estos ambientes debe contabilizar tanto el periodo de iniciación (tiempo que tardan los cloruros en alcanzar las armaduras y despasarlas) como el periodo de propagación de la corrosión (tiempo que tarda en alcanzarse un grado de corrosión significativo y producirse la fisuración del recubrimiento). El primero depende de la velocidad de penetración de los cloruros en el hormigón y el segundo depende de la disponibilidad de oxígeno y humedad en las inmediaciones de la armadura.

La duración de estos periodos está condicionada por varios factores, entre ellos el ambiente en el que se encuentre la estructura. En zona sumergida, el hormigón está saturado y los cloruros se introducen bajo presión a una determinada profundidad y por absorción cuando están próximos al nivel de bajamar. Estos avanzan por la permeabilidad y, al no haber oxígeno, se suelen producir productos de corrosión poco expansivos, sin ocasionar daños considerables. En zona de carrera de mareas el hormigón no se seca y está saturado, los cloruros se introducen por difusión y al no haber oxígeno ocurre como en la zona anterior, corrosión con pocas consecuencias. La zona de salpicaduras, que es la inmediatamente superior al nivel alto de carrera de mareas, se humedece y seca constantemente, los cloruros avanzan por succión capilar y por difusión; en esta zona sí que hay acceso de oxígeno por lo que el riesgo de corrosión es alto. Si las armaduras de la zona de carrera de mareas y de salpicaduras están conectadas se puede dar el caso de formación de macropilas, con la zona anódica en la zona de carrera de mareas y la zona catódica en la zona de salpicaduras. En la zona aérea los cloruros se ponen en contacto con el hormigón por niebla salina, por el viento, condensación, etc. El transporte se produce también por difusión pero es la zona con el avance más lento y tarda bastante en alcanzar las armaduras, aunque se produce corrosión por la presencia de oxígeno. En cualquier caso, es la difusión el mecanismo de penetración de cloruros a través del hormigón prioritario (Bermúdez Odriozola, M.A. [1]).

## 1.4 Estructura del trabajo

El presente “Trabajo Final de Máster” se ha estructurado de la siguiente manera. En primer lugar está el 1<sup>er</sup> Capítulo, donde introducimos brevemente el estado actual de la optimización en el diseño de estructuras, cual es nuestro objetivo del trabajo y cuál es el problema de los cloruros en las estructuras de hormigón.

En el 2<sup>o</sup> Capítulo se realiza un estado del arte de trabajos referentes a la optimización estructural y de los trabajos que han estudiado técnicas heurísticas para optimizar estructuras de hormigón. También se ha incluido una breve introducción a las técnicas heurísticas que se van a utilizar en el trabajo.

El 3<sup>er</sup> Capítulo habla exclusivamente de los cloruros en el hormigón, como se presentan en las estructuras de hormigón, donde habla la EHE-08 de ellos, diferentes técnicas de control, un modelo desarrollado útil para mostrar de donde se obtienen los coeficientes de difusión de cloruros y la explicación de cómo se pueden predecir estos coeficientes de difusión mediante una red neuronal artificial.

En el 4<sup>o</sup> Capítulo se desarrolla toda la descripción del problema de optimización para una viga biapoyada de sección rectangular y las comprobaciones de la normativa EHE-08 como: geométricas, estados límite últimos, los estados límite de servicio y estado límite de durabilidad.

En el 5<sup>o</sup> Capítulo, se describen un poco más en profundidad las heurísticas utilizadas en el problema de optimización y como se desarrollan los algoritmos para nuestro problema, comenzando con las redes neuronales artificiales, seguido del algoritmo genético y terminando con la búsqueda por gradiente.

En el 6<sup>o</sup> Capítulo, se realiza un estudio paramétrico donde analizan los recubrimientos, las diferentes variables que han resultado de las pruebas y el tiempo total necesario para que un ataque por cloruros sea significativo.

En el 7<sup>o</sup> Capítulo se describen las conclusiones del trabajo y se definen posibles líneas de investigación que pueden surgir de él.

En el 8<sup>o</sup> Capítulo se presenta la bibliografía utilizada para este trabajo.

Y por último, se incluyen unos “ANEXOS” con información recopilada de artículos científicos y los datos extraídos de los diferentes algoritmos.

## 2 Capítulo: Optimización de estructuras de hormigón y métodos heurísticos

En este capítulo se procede al análisis del estado del arte en los trabajos de optimización de elementos estructurales usando diferentes técnicas, desde su comienzo hasta la actualidad y una breve descripción de los algoritmos heurísticos utilizados en el trabajo.

### **2.1 Estado del arte**

Este apartado se centra principalmente en la revisión bibliográfica, mostrándose los diferentes trabajos, realizados a lo largo de los años, planteados como problemas de optimización de diferentes elementos estructurales de hormigón armado y la aplicación de los distintos métodos.

#### **2.1.1 Antecedentes y evolución de la optimización en estructuras de hormigón armado.**

Los primeros científicos que mostraron interés en el estudio de la optimización de estructuras fueron Leonardo da Vinci en el siglo XV y Galileo Galilei en el siglo XVI, realizando estudios sobre elementos estructurales de madera para disminuir su peso y llegando a predecir formas óptimas de algunas estructuras. Galileo, en 1638, en su

obra *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno, a due nuove scienze attinenti alla meccanica et i movimenti locali*, ponía en práctica el modelo científico en el campo de la construcción, donde publicaba trabajos como la forma óptima de una viga en voladizo con una carga puntual en su extremo libre.

La siguiente referencia la encontramos en siglo XIX con los trabajos de Maxwell, J.C. [2] en el 1869, y Levy M.M. [3] en 1874, y a comienzos del siglo XX con Mitchel, A.G.M. [4]. Estos autores analizaron el diseño óptimo de estructuras de arcos y cerchas metálicas para conseguir el mínimo peso, para un estado tensional concreto. Estos estudios fueron pioneros al establecer una base científica para la optimización estructural, al desarrollar una metodología capaz de proporcionar soluciones optimizadas (Navarrina Martínez, F.L. [5]), aunque el diseño obtenido no era aplicable a la realidad.

En 1955 Klein, B. [6] planteó que la optimización estructural debería formularse como problemas de optimización condicionada. A partir de aquí hubo un punto de inflexión en la forma de optimizar las estructuras, y sobre todo, en la potencia de cálculo que proporcionarían los ordenadores. Schmit, L.A. [7] en 1960 desarrolla la síntesis estructural, combinando por primera vez los elementos finitos en el análisis estructural, con una programación lineal para la optimización matemática.

Dado que el análisis estructural suele ser un problema no lineal de muchas variables, la aplicación del método anterior se pudo realizar a base de “linealizar” el problema, ya fuera mediante cambios de variable o mediante simplificaciones del mismo. Así comenzaron a desarrollarse y a emplearse técnicas que permitían resolver problemas no lineales, destacando los criterios de optimalidad de Karush, W. [8], y Kuhn, H.W. y Tucker, A.W. [9] en la búsqueda del óptimo global. Ya en los años setenta comienzan a aplicarse los multiplicadores de Lagrange aumentados o el gradiente generalizado reducido. Desde entonces, se han ido perfeccionando estas técnicas, y aumentando la dimensión de los problemas, con una continua evolución hasta el momento actual.

En el campo de las estructuras de hormigón armado, se pueden destacar algunos de los trabajos siguientes: en 1980 Moragues, J. [10] aplicó métodos de optimización al diseño de estructuras aporticadas, cuyo objetivo era minimizar el coste de la estructura. En 1989 Arenas, J. y Villegas, L. [11] presentaron el proceso de análisis y dimensionamiento de las pilas del viaducto de Cruzul (Lugo, Galicia). En 1991 Gasch, M.S. [12] optimizó la planta de un forjado reticular sometida exclusivamente a acciones verticales. En 1994 Cohn, M.Z. y Dinovitzer, A.S. [13] realizaron una revisión de los problemas de optimización resueltos hasta ese momento. En 1997 Balling, R. y Yao, X. [14] abordaron la optimización de pórticos de edificación de hormigón armado mediante tres estrategias diferentes. En 2003 Torrano, M. [15] optimizó secciones con forma arbitraria y cualquier distribución de armado y elementos estructurales de hormigón armado. En 2005 Rodrigues et al. [16] estudiaron para un edificio de 16 alturas, sometido a acciones verticales y horizontales, la optimización de los pilares.

## 2.1.2 Optimización heurística de estructuras de hormigón armado.

### - Algoritmos genéticos en estructuras de hormigón (GA)

Los algoritmos genéticos utilizados para optimizar estructuras de hormigón han sido estudiados en numerosas partes del mundo. Comenzamos hablando de los estudios realizados en la India, donde encontramos uno de los más recientes que se encuentran sobre GA, realizado por Chakrabarty, B.K. [17] en Nueva Delhi, el cual presentó un modelo para optimizar el coste de una viga de hormigón armado sometida a flexión. Posteriormente Rajeev, S. y Krishnamoorthy C.S. [18], del Instituto de Tecnología de la India en Madras, realizan la optimización del diseño de pórticos planos de hormigón armado utilizando la metodología basada en estos algoritmos. Más tarde encontramos un trabajo de Govindaraj, V. & Ramasamy, J.V. [19], del Colegio de Tecnología de Coimbatore, donde optimizaron vigas de hormigón armado mediante GA utilizando las especificaciones de la norma India (*Indian Standard Specifications*). Aplicaron los cálculos a una viga de un vano y a otras dos continuas de dos vanos, siendo los resultados obtenidos comparados con otros disponibles y concluyendo que el método propuesto es adecuado para el diseño óptimo y económico de este tipo de estructuras. Poco después Srinivas, V. y Ramanjaneyulu, K. [20], del departamento de "Structural Health Monitoring" de Chennai, diseñaron un procedimiento que integra algoritmos genéticos para la optimización económica de tableros de vigas pretensadas y una red neuronal para predecir la factibilidad de las soluciones.

En América se encuentran estudios del Departamento de informática de la Universidad de Tulane en Nueva Orleans, donde Coello et al. [21] utilizaron GA para la optimización de una viga biapoyada de hormigón armado sometida a momento flector. Usaron diferentes sistemas de codificación, considerando como variables de la viga, el canto, ancho de la viga y su armadura inferior de momentos positivos. En otro estudio, de la Universidad de Memphis en Tennessee, Camp et al. [22] abordaron la optimización de pórticos de hormigón armado mediante GA, diseñados conforme al código de construcción del American Concrete Institute (ACI) y optimizados para reducir el coste de los materiales y de la construcción.

Ya en Europa, en la Universidad de Plymouth de Reino Unido, Rafiq M.Y. y Southcombe, C. [23] presentan un nuevo enfoque para el diseño óptimo de columnas biaxiales de hormigón armado utilizando algoritmos genéticos, utilizando especificaciones del British Standard (BS8110) y satisfaciendo los requerimientos de E.L.U (Estados límites últimos). En la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Praga, en la República Checa, Leps, M. y Sejnoha, M. [24] optimizaron una viga continua de dos vanos simétrica de hormigón armado, teniendo en cuenta el armado de flexión y el de cortante. El algoritmo de optimización aplicado es el Augmented Simulated Annealing que combina el SA (Simulated Annealing) con el GA, utilizando el principio del SA pero trabajando con una población de soluciones y las nuevas soluciones se obtienen a partir de las existentes mediante la aplicación de los operadores genéticos. Más tarde en la Universidad Queen Mary de Londres, Sahab et al. [25], [26], presentan la optimización de estructuras tridimensionales de edificación compuestas por pilares y losas de hormigón armado. Además realizaron la

optimización de estructuras de edificación con forjados tipo losa, transformando la estructura de tres dimensiones en una plana, mediante el uso de GA. En el Instituto de Arquitectura de la Universidad Técnica de Berlín, en Alemania, Philipp, G. [27], utilizó la optimización de diseño multidisciplinar (MDO), como herramienta para el diseño de un edificio. Se aplica con un algoritmo genético multiobjetivo (MOGA), donde la función objetivo que emplea se compone de tres grupos principales. El primer grupo se compone de objetivos económicos, el segundo los objetivos ambientales, divididos en energías renovables, no renovables y calentamiento global, y el tercero son criterios de preferencia del usuario. En la facultad de Ingeniería Civil de Besiktas, en Turquía, Atabay, S. [28] presentó la optimización de las dimensiones de muros de arriostramiento horizontal de edificios de hormigón armado. El autor pone un especial énfasis en las ventajas derivadas de emplear un método como los GA que permiten la formulación discreta del problema.

Respecto a los estudios destacados del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia, en España, encontramos los siguientes estudios, entre 2004 y 2015:

(2004 - 2010) Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González Vidosa, F., Hospitaler, A., y Martínez, F.J. [29-34] plantean numerosos trabajos para la optimización de marcos de carretera de hormigón armado utilizando diferentes heurísticas como FB, SA, TS (Tabu Search), TA (Threshold Acceptance), OBA (Old Bachelor Acceptance), GA y MA (Memetic Algorithm).

(2008 - 2015), Yepes et al. [35-38] realizan un estudio paramétrico de muros de contención óptimos mediante SA, con el objetivo de examinar la optimización económica. El estudio además estima la importancia relativa de factores tales como el coeficiente de fricción de la base, el ángulo de fricción del llenado del muro y la limitación de deflexiones de la puntera. En 2012 presentan un enfoque para una metodología para diseñar muros de contención en voladizo, mediante el “Método estratégico de optimización híbrida multireiniciada basada en algoritmos de búsqueda por entornos variable y estrategia de aceptación por umbrales” (VNS-MTAR) cuyas funciones objetivo son: el coste económico y el CO<sub>2</sub> asociado a las diferentes etapas de producción de materiales, transporte y construcción, llegando a comprobar que ambas están estrechamente relacionadas. En 2015 desarrollan un trabajo que propone una aproximación cognitiva para analizar y reducir el óptimo de Pareto para la optimización multiobjetivo (MOO); para ilustrar esta metodología realiza un estudio de caso sobre una viga en I de hormigón armado, consiguiendo estructuras duraderas y ecológicas. Otro trabajo destacado en 2015 es la metodología para optimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> y de costes en el diseño de puentes de carretera con prefabricados pretensados de hormigón con sección transversal en forma de doble U, donde se usa un algoritmo de optimización híbrido de enjambre de luciérnagas combinado con SA (SAGSO) y otro de “global search” con la optimización de enjambre de luciérnagas (OSG), consiguiendo pautas para diseño de puentes prefabricados de hormigón armado y una considerable reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

(2008-2010) Payá, I. et al [39] describen una metodología para diseñar marcos de construcción de hormigón armado mediante un algoritmo multiobjetivo con simulated annealing (MOSA) aplicado a 4 funciones objetivo: coste económico, constructibilidad, impacto ambiental y seguridad general. Todo aplicado a una estructura de edificación con el fin de ayudar a ingenieros estructurales a mejorar sus diseños. En 2010 proponen una metodología general para determinar el número de pruebas numéricas necesarias para proporcionar soluciones para un problema de optimización con una precisión definida por el usuario en comparación con una solución óptimo global, utilizando el algoritmo SA.

(2010 -2013) Martínez et al. [40-41] publican un estudio donde compara el GA y TA con dos nuevas variantes del Ant Colony Optimization, aplicando 95 variables, y recomendando para su calibración 250 hormigas y 100 etapas. La mejor solución obtenida, comparada con un diseño realizado por un experto, es un 33% más económica. En 2012 publican un estudio para diseñar pilas de puentes de hormigón armado utilizando tres algoritmos híbridos multiobjetivo con simulated annealing, realizando movimientos en el entorno basados en operadores de mutación de algoritmos genéticos, cuyas funciones objetivo son el coste económico, la congestión del acero de refuerzo y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas. En 2013 realizan un estudio paramétrico de pilas altas de viaductos de hormigón armado con perfiles tubulares rectangulares cuyos resultados son de gran valor para el diseño preliminar de estas estructuras.

(2011 – 2012) Carbonell, A. et al. [42-44] centran los estudios en el diseño y minimización de costes económicos de bóvedas de hormigón armado empleados en la construcción de pasos inferiores, mediante el uso de algoritmos multiarranque de búsqueda por entornos de máximo gradiente (DLS), simulated annealing (SA), threshold acceptance (TA) e iterated local search (ILS), llegando a encontrar ahorros bastante significativos respecto a bóvedas diseñadas en oficinas de proyectos experimentadas.

(2013) Torres-Machí, C. et al. [45] desarrollan una metodología en el diseño de vigas de hormigón de alta resistencia mediante el “Método estratégico de optimización híbrida multireinicio basada en algoritmos de búsqueda en entorno variable y estrategia de aceptación por umbrales”. Tres estrategias se siguieron: Entorno variable descendente (VND), búsqueda reducida por entornos (RNS) y búsqueda por entornos variable básica (BVNS). Cuyas funciones objetivo son las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas y el coste económico.

(2013 – 2015) Martí, J.V. et al. [46-48] desarrollaron un método de análisis y diseño de puentes de carretera con prefabricados pretensados de hormigón, con sección transversal en forma de doble U y vanos isostáticos. El procedimiento utilizado para resolver el problema combinatorio es una variante del SA con un movimiento por entornos basado en el operador de mutación de los algoritmos genéticos (SAMO). Este algoritmo se aplicó al coste económico de estas estructuras en diferentes etapas de fabricación, transporte y construcción. En 2014 realizaron un diseño automático de tableros de puentes de vigas artesas pretensadas prefabricadas, empleando un algoritmo memético híbrido que combina la búsqueda poblacional de soluciones mediante GA y VNS, consiguiendo ahorros entre 8 y 50% respecto a estructuras

ejecutadas. En 2015 presentaron un estudio que describe la influencia del acero, en hormigón con fibras de refuerzo, en el diseño con coste optimizado para una estructura igual que la utilizada en el artículo de 2013, pero usando un algoritmo memético con VNS.

(2014 - 2015) García Segura, T. et al [49-51] presentan un nuevo algoritmo de enjambre de luciérnagas híbrido (SAGSO) combinado con SA para resolver problemas de optimización estructural, en este caso la estructura propuesta es un viga en I. Las funciones objetivo de este trabajo son minimizar las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas y la reducción del coste económico de la estructura. En otro trabajo evalúan las emisiones y captura de CO<sub>2</sub> en una columna de hormigón armado durante su vida de servicio y después de la demolición y reutilización como relleno de grava. En uno de los trabajos más reciente consiguen encontrar diseños sostenibles de puentes peatonales postensados de hormigón con sección en viga cajón, usando un algoritmo “harmony search” híbrido combinado con la “optimización por umbrales”.

En la zona de Corea, Japón y China destacan los siguientes trabajos: En la Universidad de Chung-Ang de Corea del Sur, Lee, C. y Ahn, J. [52], optimizaron los pilares y las vigas considerando esfuerzos de flexión en estado límite último. En un convenio entre la Universidad Politécnica de Hong Kong con la Universidad de Queensland de Australia Chau, K.W. y Albermani, F. [53] plantearon un modelo híbrido, utilizando el programa Abaqus para el cálculo estructural y GA para realizar la optimización, en el estudio del diseño optimizado de depósitos rectangulares de hormigón armado. Se hace un análisis optimizado del coste de la estructura considerando únicamente tres variables: canto de las losas de hormigón, diámetro de la armadura y separación entre las barras. En la Universidad de Beijing en China, Kong, J. [54] utilizó GA para minimizar el peso de edificios de hormigón armado sometidos a acciones horizontales, cuya única restricción era el desplazamiento relativo entre dos plantas. Por último, en la Universidad de Yamaguchi en Japón, Miyamoto et al. [55] aplican algoritmos genéticos (GA) y algoritmos inmunes (IA) en la optimización del diseño de losas de hormigón armado comparando los resultados obtenidos. Los IA se desarrollan para mantener la diversidad de la población, y así evitar que la solución converja muy pronto, como ocurre con los GA.

#### - **Redes Neuronales Artificiales (ANN)-(RNA)**

Una ANN es un procesador distribuido en paralelo compuesto por unidades de proceso elementales (nodos ó neuronas artificiales) masivamente interconectadas entre sí y con organización jerárquica, con capacidad de adquirir conocimiento de tipo experimental, con capacidad para simular y predecir procesos lineales, y capacidad de aprendizaje para generalizar casos anteriores a situaciones nuevas (García Bartual, R [56]).

En 1943 McCulloch, W. y Pitts, W. [57] presentaron el primer modelo artificial de neurona, que consistía en un dispositivo no lineal multientrada con interconexiones. Lo que hace esta neurona es sumar las entradas de datos ya ponderadas, les aplica una

función no lineal y transmite una salida. El esquema de esta neurona es el siguiente (Figura 1).

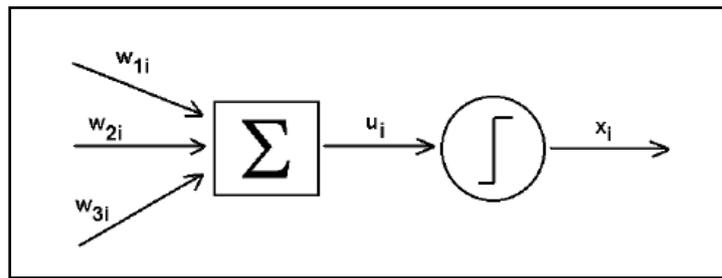


Figura 1: Esquema de la neurona de McCulloch-Pitts

En 1957 Rosenblatt, F. [58] presenta la arquitectura de capas denominada redes *feed-forward* o perceptrón, con una sola capa, denominada así porque en la entrada no se realiza ningún tipo de cálculo. Éstas constan de capas de nodos que reciben señales sólo de las previas (Figura 2).

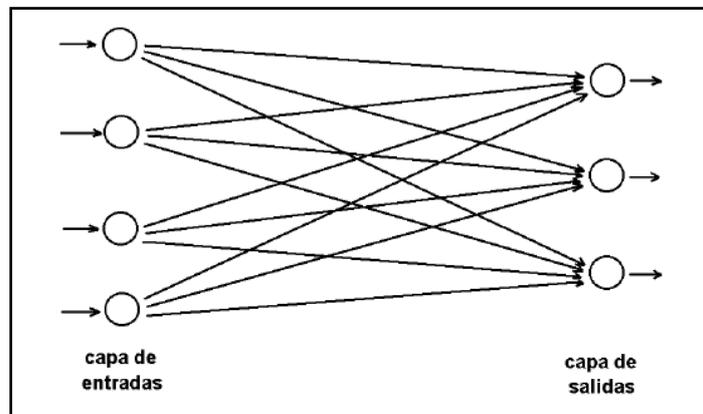


Figura 2: Feed-forward o Perceptrón

Entre 1985 y 1989 Hopfield, J.J. y Tank, D. [59] y Adeli, H. y Yeh, C. [60] fueron los primeros en aplicar las ANN a problemas de optimización combinatoria y de ingeniería civil. Ya en 1990 Aleksander, I, y Morton, H. [61] definen red neuronal como “...un procesador distribuido en paralelo que posee una propensión natural para el almacenamiento de conocimiento experimental haciéndolo disponible para su uso”. Una revisión de sus aplicaciones a la ingeniería civil hasta el año 2000 puede encontrarse en trabajos de Adeli, H. [62] de 2001. Posteriormente, en 2003 Hadi, M. [63] las ha empleado para optimizar vigas biapoyadas de hormigón armado y vigas de hormigón reforzadas con fibras y Cladera, A. [64] para estudiar la resistencia a cortante de elementos lineales fabricados con hormigón de alta resistencia. En trabajos recientes como el de Arcila Zea, J, et al (2014) [65] usan las RNA para optimizar secciones de vigas y pilares para cumplir la desviación en edificaciones de hormigón armado.

Recientemente, en 2013, Martí-Vargas et al. [66] utilizaron las RNA para predecir la longitud de transferencia del pretensado de cordones de acero de 13mm en piezas de hormigón con sección rectangular, con una base de datos cuidadosamente seleccionada con 207 casos diferentes procedentes de 18 fuentes diferentes.

## 2.2 Técnicas heurísticas

En este apartado se hace una breve descripción de las técnicas heurísticas que usaremos en este trabajo y como es su forma de actuar, y que más adelante se detallarán en profundidad.

### 2.2.1 Redes Neuronales Artificiales (RNA) - (ANN: Artificial Neural Network)

Las redes neuronales artificiales aparecieron al tratar de comprender el cerebro humano, considerándolo como un sistema de procesamiento de la información altamente complejo, no lineal y en paralelo. Estas RNA han sido aplicadas con éxito a problemas tan diversos como el reconocimiento de patrones, la optimización y la planificación.

Gozan de una gran capacidad de cálculo por presentar una estructura distribuida y paralela de procesamiento masivo y por su habilidad más importante que es el aprendizaje, que puede ser supervisado o no supervisado. Esta habilidad calcula los pesos de las conexiones en función de la información que le proporciona el entorno. Si es aprendizaje supervisado, se debe conocer la salida en función de la entrada, de modo que los pesos se adaptarán para que sean mínimos los errores entre la salida real y la deseada, este método es el empleado por las redes por capas. Cuando es aprendizaje no supervisado, no hay entrenamiento, y por tanto no se conocen las salidas deseadas. En este caso la red clasifica los vectores de entrenamiento en clases y grupos, aplicándose el concepto de similitud para el aprendizaje. También son tolerantes a fallos, pues aunque algunos enlaces se dañen, no degradan significativamente la calidad del sistema (Yepes, V. [67]).

En la figura 3, se muestra un ejemplo de red neuronal, en concreto un esquema de una red neuronal multicapa, ya que estas muestran al menos una capa oculta y pueden estar parcial o totalmente conectadas, con  $n$  neuronas de entrada,  $m$  en su capa oculta y una de salida.

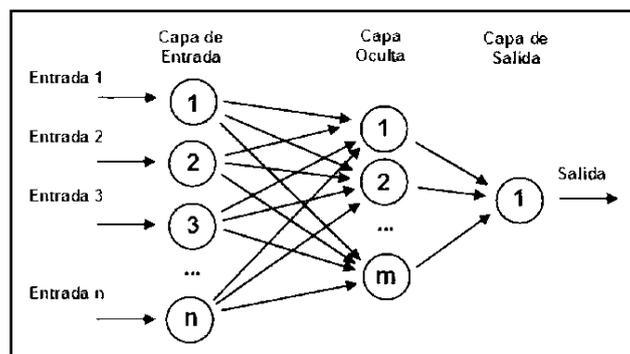


Figura 3: Red neuronal artificial

Según Rafael García Bartual las propiedades o características más útiles de las RNA (ANN) son:

- **No linealidad:** las neuronas son elementos de proceso generalmente no lineales. La interconexión de estas genera estructuras de transformación de datos donde este carácter no lineal queda distribuido a lo largo y ancho de la red. Esa característica permite modelar procesos intrínsecamente no lineales, pero complica también los métodos de análisis de las estructuras resultantes, impidiendo la aplicación de técnicas de análisis bien establecidas, como son las de los sistemas lineales.

- **Modelado de relaciones de entrada/salida:** las RNA usan un proceso de aprendizaje llamado aprendizaje supervisado, en este tipo de aprendizaje se dispone de un conjunto de muestras de la relación entrada/salida a modelar, formado por pares (entradas, salidas deseadas) que permite optimizar los pesos de la red de tal forma, que se espera que la relación de entrada/salida generada sea capaz de reproducir casos no representados en el conjunto de datos original. Esta capacidad se obtiene utilizando estructuras de aproximación funcional con capacidad de representación universal y estrategias de aprendizaje que cuidan de que no se sobrepase el límite del sobre-entrenamiento.

- **Adaptabilidad:** las RNA son estructuras adaptativas capaces de ajustar sus pesos, y por tanto su función de transferencia, a cambios en el entorno.

- **Flexibilidad:** las RNA son una herramienta muy flexible a la hora de modelar procesos verdaderamente complejos. Permiten resolver problemas de diferentes dimensiones sin tener que cambiar su estructura. Una misma estructura de red puede ser utilizada para resolver problemas totalmente diversos y los datos utilizados como entradas no tienen que cumplir ningún requisito de normalidad o independencia, como sí pasa con los modelos estadísticos.

- **Rápida construcción:** El proceso de construcción de un modelo de RNA es rápido, ya que no se necesita hacer pruebas subjetivas de las variables de entrada. Por otro lado, la ausencia de una secuencia de pasos para su construcción y la falta de procedimientos para la determinación de una red óptima, hace que sea complicada la elección de cada uno de sus elementos. No existen reglas ni procedimientos universales que ayuden a la determinación de los diferentes elementos de una red. Se suelen utilizar métodos de prueba y error o de poda "*prunning*", que ayudan a la elección de las diferentes componentes de la red.

- **Insensibilidad a datos con ruido:** Las RNA presentan una buena adaptabilidad para resolver problemas donde los datos de entrada contienen ruido. El gran problema es que, para poder disponer de una RNA tan eficaz que resuelva el problema de los ruidos, es necesario tener una gran cantidad de datos para poder entrenarla y justamente éstos son los que generalmente faltan. Es importante contar con varios modelos para resolver el mismo problema y así poder compararlos y obtener mejores resultados.

- **Computacionalmente eficaces:** La programación del algoritmo de las redes neuronales artificiales es muy simple y no cambia para diferentes problemas. La resolución de problemas muy complejos cuesta lo mismo, computacionalmente, que la de otros más sencillos.

### **2.2.2 Algoritmos genéticos (GA)**

En 1975 John Holland [68], emulando la evolución natural de las especies, desarrolló la metaheurística llamada algoritmos genéticos (Genetic Algorithms). Mediante la reproducción sexual, los individuos de una población cruzan sus genes para generar nuevos individuos y así continuar evolucionando; esta descendencia será diferente a sus progenitores pero mantendrá parte de sus características. Cada individuo de la población se enfrenta al problema de la supervivencia, ya que se compite por los recursos, por el emparejamiento, huida de depredadores y además están las condiciones del entorno que pueden dificultar dicha supervivencia. Los individuos que tienen los genes más adecuados a dichas condiciones son los que tienen mayor probabilidad de sobrevivir y reproducirse, transmitiendo sus genes a los nuevos individuos y poblaciones. También se puede dar el caso de que algunos de esos genes muten y modifiquen la información genética.

Holland lo que hizo fue asociar un individuo a una solución factible de un problema y codificarlo como un vector binario "string". Una vez realizado esto se genera una población de vectores (individuos) de partida; de esa población se seleccionan parejas de soluciones para emparejarlos y cruzarlos y para obtener vectores hijos que heredarán las cualidades de ambos. Se puede aplicar un operador de mutación que modifique ligeramente de forma aleatoria la solución. A continuación se evalúan los hijos y se seleccionan las mejores soluciones para asegurar la transmisión de las mejores cualidades a la nueva población. Para que el problema converja, finaliza después de un número concreto de poblaciones nuevas o cuando la población no sufre mejoras. Respecto a la selección de los padres, estos se eligen de forma probabilística hacia los individuos más aptos. En la actualidad en vez de usar vectores binarios se usan vectores con números enteros y los operadores de cruzamiento y mutación son más sofisticados.

### **2.2.3 Algoritmos de búsqueda por gradiente (Descent local search (DLS))**

Es un método de búsqueda donde el espacio de soluciones se recorre mediante la exploración del entorno asociado a una solución inicial. Se trata de encontrar una solución que mejore la solución actual sin admitir peores soluciones, para ello se realiza un recorrido por el espacio de soluciones en trayectorias descendentes, gradientes negativos, ya que se busca minimizar la función objetivo. La solución inicial es mejorada a medida que avanza el proceso, hasta que la mejora es poco significativa y se detiene. Hay que tener en cuenta que las soluciones tienen que ser factibles y cumplir unas comprobaciones referentes a la normativa que imponamos.

Con esta técnica se pueden alcanzar soluciones que constituyen óptimos locales del entorno de soluciones, aunque puede que estas sean óptimos de baja calidad debido a una convergencia prematura, quedando atrapado en ellos sin que se pueda salir, como se ve en la figura 4.

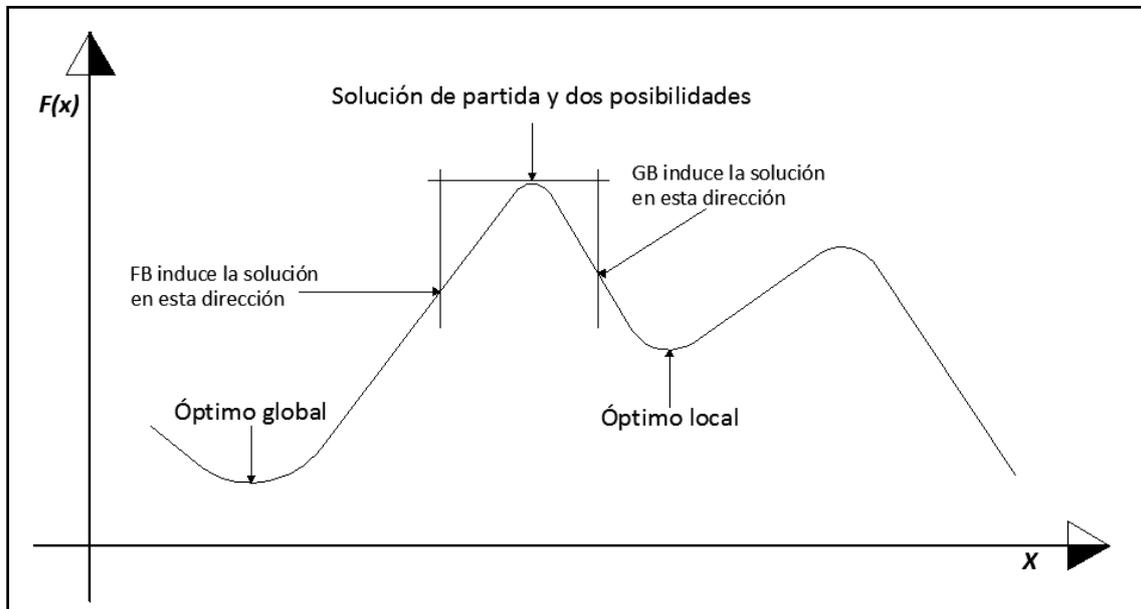


Figura 4: Gráfica de búsqueda por gradiente

Hay dos métodos para aplicar el movimiento:

- *First Best* (FB): Se aplica a la primera de las soluciones, sin analizar el resto del entorno.
- *Global Best* (GB): Se selecciona la mejor de todas las soluciones del entorno, y se aplica el movimiento.

Para resolver la convergencia prematura de soluciones de baja calidad, se pueden plantear formas que mejoran esta técnica, aceptando la degradación estratégica para salvar óptimos locales, es decir, aceptando soluciones peores o haciendo múltiples reinicios para aumentar la posibilidad de que alguna solución inicial esté cerca de la zona de óptimo de alta calidad.

## 3 Capítulo: Cloruros en el hormigón

En este capítulo se analizan trabajos, artículos y normativa, que estudian y muestran información sobre los cloruros y sus efectos sobre las estructuras de hormigón armado, además de las diferentes técnicas de determinación que se utilizan en los diferentes estudios y en la actualidad, y una explicación de cómo se utilizan las redes neuronales para predecir datos.

### **3.1 Cloruros en las estructuras de hormigón**

Hoy en día la corrosión del acero integrado en el hormigón es un serio problema porque puede provocar deficiencias estructurales y grandes repercusiones económicas. En un hormigón armado de buena calidad, el acero de refuerzo se encuentra protegido de la corrosión ya que el hormigón actúa de doble barrera física y química: evitando la entrada de agentes agresivos a su través y favoreciendo la formación de una película de óxido protector (capa pasivante). Son dos los agentes que pueden desencadenar la corrosión de las armaduras: el  $\text{CO}_2$  ambiental (y en general, cualquier agente que disminuya el pH alcalino del hormigón) y los Cloruros. En el primer caso, la corrosión de la armadura se producirá de forma generalizada; en cambio los cloruros producirán una corrosión localizada (corrosión por picaduras). La corrosión de la armadura lleva implícita la formación de óxidos de hierro, más o menos expansivos, lo que ocasionará defectos en el hormigón como las fisuras que son una vía

de entrada directa para todos los demás agentes agresivos. No obstante, se necesita la presencia de humedad y oxígeno para que la corrosión prospere.

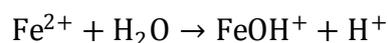
Para que los cloruros inicien su acción corrosiva, es necesario que se encuentren en una cantidad que supere la concentración umbral, que es la mínima necesaria para que actúen como agentes despasivantes de la armadura. Respecto a las diferentes procedencias de los cloruros, las principales fuentes de cloruros en el hormigón fresco son los aditivos, algunos áridos y los cementos. Los cloruros del ambiente también pueden penetrar en el hormigón endurecido y depositarse en el agua de los poros, siendo gran parte de ellos cloruros libres muy agresivos, cuyas fuentes son sales fundentes, agua de mar y el ambiente marino (Song, G. & Shayan, A. [69]).

Estos cloruros pueden estar en el hormigón combinados química o físicamente a los minerales del cemento o a los productos de hidratación, se unen a las fases de aluminato formando, por ejemplo, la sal de Friedel:  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ; o son adsorbidos en el CSH, o libres en la solución de los poros del hormigón como electrolitos.

Las fases combinadas de cloro, como la sal de Friedel, inicialmente no influyen en el proceso de corrosión de las armaduras, incluso puede retrasar el avance de los cloruros a través del recubrimiento de hormigón, pero en presencia de  $\text{CO}_2$ , estos pueden liberarse y migrar hacia los poros del hormigón, pasando a ser activos. El proceso es el siguiente: el  $\text{CO}_2$  reacciona con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Portlandita) generando  $\text{CaCO}_3$  (carbonato cálcico), proceso llamado carbonatación. Este proceso consume casi todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y hace que baje el pH, con ello se despasivan las armaduras y se descompone la sal de Friedel, liberando los cloruros (Zornoza Gómez, E. M. [70]).

Cuando una cantidad suficientemente alta de cloruros, por encima de la concentración umbral, alcanza la superficie del acero se produce una ruptura local de las condiciones de pasivación del acero, que hace que aumente significativamente la velocidad de corrosión de las armaduras. La corrosión por cloruros es localizada (*corrosión por picaduras*), y con ataques penetrantes en ese área limitada (*picadura*) rodeadas de áreas no corroídas. Sólo cuando están presentes niveles muy altos de cloruros o cuando disminuye el pH en las inmediaciones del acero puede ser destruida la capa pasivante en grandes extensiones de la armadura y por consiguiente la corrosión será generalizada.

La formación de ánodos locales en los puntos débiles del metal activo, rodeados por grandes áreas catódicas de metal pasivo, crea diferencias de potencial que atraen los cloruros presentes en el hormigón, como vemos en la figura 5. Al disminuir el contenido de oxígeno en la picadura, la superficie de acero bajo los productos sólidos de la corrosión se acidifica.



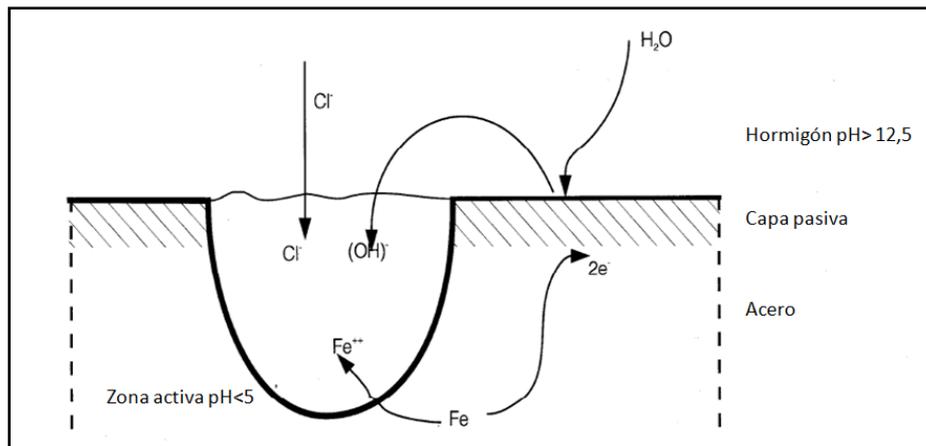
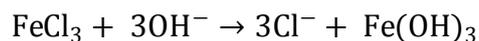
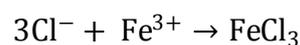
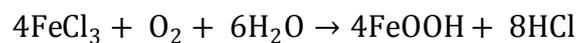


Figura 5: Esquema de corrosión del acero por picadura en el hormigón

Varios mecanismos pueden contribuir al efecto catalítico de los iones cloruro. Estos forman complejos solubles con los iones hierro, lo que favorece la disolución del óxido de hierro. Además la presencia de iones cloruro aumenta la solubilidad de la capa pasiva, lo que acelera su disolución.



Los complejos de cloro no son estables en presencia de oxígeno y el resultado es una acidificación mayor y una liberación de iones cloruro, acelerando la corrosión a causa de éstos (Sandberg, P. [71]).



La influencia del uso de adiciones, sobre la capacidad de fijación de cloruros del hormigón, hace que el contenido de cloruros fijados a la superficie del hormigón no se vea afectado por la incorporación de cenizas o escorias, pero a más profundidad de este hormigón el empleo de estas adiciones sí que supone una reducción de esta fijación. Sí se usa humo de sílice también se consigue una gran reducción de la capacidad de fijación de estos cloruros (Mangat, P.S. y Molloy, B.T. [72]).

Los mecanismos de penetración de cloruros en hormigón armado más destacados son: la permeabilidad, la capilaridad, la absorción y la difusión. Estos a su vez están influenciados por las condiciones de exposición, el contenido de humedad del hormigón y la estructura de poros. En los primeros centímetros del hormigón se produce la succión capilar pero, a profundidades mayores, predomina la difusión; si está seca la superficie se produce absorción de cloruros por microfisuras y poros vacíos, y si la superficie está húmeda la entrada es por permeabilidad y difusión.

La penetración de especies agresivas en el hormigón con frecuencia ocurre por “difusión”, que es el movimiento de las moléculas o iones bajo gradientes de concentración o potencial químico, desde una zona de alta concentración a una zona de baja concentración. El O<sub>2</sub>, el CO<sub>2</sub>, el Cl<sup>-</sup> o el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se mueven a través de los poros desde la superficie, zona de mayor concentración, hacia zonas internas donde su concentración es menor. Hay que destacar que los gases difunden mucho más rápidamente a través de los poros abiertos que a través de los que están saturados de agua, mientras que los iones cloruro o sulfato sólo difunden cuando están disueltos en el agua de los poros; la difusión de estos iones es más efectiva en poros saturados que en los parcialmente saturados.

Hay dos tipos de difusión: la difusión estacionaria es la que se realiza bajo condiciones de transferencia de masa estacionaria (unidireccional y constante), fenómeno que se describe mediante la primera ley de Fick:

$$F = -D \frac{dC}{dx} \quad (1)$$

donde:  $F$  es el flujo (kg/m<sup>2</sup>s),  $C$  es la concentración de las especies que se difunden en kg, presentes a una distancia  $x$  de la superficie, y  $D$  es el coeficiente de difusión expresado en m<sup>2</sup>/s.

La difusión no estacionaria es la que tiene lugar en la mayoría de los casos reales. Como la difusión rara vez alcanza condiciones estacionarias en estructuras de hormigón, el flujo depende del tiempo  $t$  y está gobernado por la segunda ley de Fick, que está integrada bajo los supuestos siguientes: que la concentración del ion que difunde es constante en el tiempo y es igual a  $C_s$ , que el coeficiente de difusión  $D$  no varía con el tiempo, que el hormigón es homogéneo, por lo que  $D$  no varía a través del espesor del hormigón, y que inicialmente no contiene cloruros.

La ecuación de la segunda ley de Fick de la difusión es la siguiente:

$$C_x - C_b = (C_s - C_b) \cdot \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right\} \quad (2)$$

- $C_x$  contenido en cloruros a una profundidad  $x$  (% en peso de cemento)
- $C_s$  contenido de cloruros en la superficie (% en peso de cemento)
- $C_b$  cloruros iniciales de los componentes del hormigón (% en peso de cemento)
- $D$  coeficiente de difusión efectiva de cloruros (mm<sup>2</sup>/año)
- $t$  periodo de exposición (años)
- erf función de error

El coeficiente de difusión para distintos periodos de exposición puede extrapolarse (Goltermann, P. [73]). Por otro lado, tenemos el transporte de iones dentro de una disolución bajo la acción de un campo eléctrico externo y se denomina “migración”. La velocidad del movimiento de los iones es proporcional a la intensidad del campo eléctrico y a la carga y tamaño de los iones. Los principios que se aplican a las disoluciones acuosas son, básicamente, también válidos para el hormigón, porque el

transporte de corriente eléctrica se debe al movimiento de iones en el sistema de poros rellenos de agua. Los iones positivos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) migran en la dirección de la corriente y los negativos ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) en la dirección opuesta (Zornoza Gómez, E.M. [70]).

La penetración de cloruros a través de los diferentes mecanismos de transporte sigue diferentes leyes y no sólo la de difusión; aun así, se suele aplicar esta ley para cuantificar la penetración de cloruros. Al considerar solo esta ley de difusión el coeficiente de difusión  $D$  no es el verdadero y debe ser considerado como un coeficiente de difusión aparente  $D_{app}$ . Cabe destacar que el coeficiente de difusión de cloruros es indicativo de la velocidad de difusión.

Por último, también se distingue si el método de obtención del coeficiente de difusión de cloruros en ensayos de laboratorio es:

- En régimen estacionario – la muestra de hormigón es suficientemente pequeña como para que se produzca un flujo de cloruros a través suyo ( $D_s$ ).
- En régimen no estacionario – la muestra de hormigón es suficientemente grande como para que los cloruros no lleguen a atravesarla totalmente durante el tiempo de ensayo ( $D_{ns}$ ).

### 3.2 Cloruros en la EHE-08 [74]

En el artículo 8.2.3-*Clases específicas de exposición ambiental en relación con otros procesos de degradación distintos de la corrosión*, se muestra la tabla 8.2.2 donde aparecen los ambientes en los que participan los cloruros en los procesos de corrosión, que son:

- Clase marina aérea (IIIa), en elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar y elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km), como elementos estructurales de edificaciones y puentes en las proximidades de la costa, zonas aéreas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral e instalaciones portuarias.
- Clase marina sumergida (IIIb), en elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel de bajamar, como zonas sumergidas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral y cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.
- Clase marina en zonas de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras (IIIc), en elementos de estructuras marinas situadas en esas zonas, y en concreto en zonas de los elementos situadas en el recorrido de marea de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral y zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea.

- Con cloruros de origen diferente del medio marino (IV), en instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino y en superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas, como piscinas e interiores de los edificios que las albergan, pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve y estaciones de tratamiento de agua.

En el artículo 28.7.1-*Cloruros*, se expone que el contenido en ión cloruro (Cl<sup>-</sup>) soluble en agua de los áridos grueso y fino para hormigón, determinado de conformidad con el artículo 7 de la UNE-EN 1744-1, no podrá exceder del 0,05% en masa del árido, cuando se utilice en hormigón armado u hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración, y no podrá exceder del 0,03% en masa del árido, cuando se utilice en hormigón pretensado, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 28.7.

Con respecto al contenido en los hormigones del ión cloruro, Cl<sup>-</sup>, se tendrá en cuenta lo prescrito en el artículo 31.1, que dice que los componentes del hormigón deberán cumplir las prescripciones incluidas en los Artículos 26º,27º,28º,29º y 30º. A demás, el ión cloruro total aportado por los componentes no excederá de los siguientes límites:

- Obras de hormigón pretensado – 0,2% del peso del cemento
- Obras de hormigón armado u obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir fisuración - 0,4% del peso del cemento

Por otro lado tenemos la Tabla 28.7. *Requisitos químicos*:

Sustancias perjudiciales		Cantidad máxima en % del peso total de la muestra	
		Árido fino	Árido grueso
Cloruros expresados en Cl <sup>-</sup> y referidos al árido seco, determinados con arreglo al método de ensayo indicado en el apartado 7 de UNE-EN 1744-1	Hormigón armado u en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración	0,05	0,05
	Hormigón pretensado	0,03	0,03

En el artículo 37.4.1-*Corrosión de las armaduras pasivas*, dice que además de la limitación específica del contenido de iones cloruro para los materiales componentes, de acuerdo con el apartado 31.1, se deberá cumplir que el contenido total de cloruros al final de su vida útil, sea inferior al 0,6% del peso del cemento, en el caso de obras de hormigón armado u hormigón en masa que contengan armaduras para reducir fisuración.

En el Anejo 4º, el artículo 5-*Selección del tipo de cemento en función de la clase de exposición*, los cloruros aparecen en la tabla A.4.5 donde los cementos recomendados para los ambientes con cloruros son:

III	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino	Muy adecuados los cementos CEM II/S, CEM II/V (pref. los CEMII/B-V), CEM II/P (pref. los CEM II/B-P), CEM II/A-D, CEM III, CEM IV (pref. CEMIV/A) Y CEM V/A
IV	Corrosión de las armaduras por cloruros de origen no marino	Preferentemente, los CEM I y CEM II/A y, además, los mismos que para la clase de exposición III

Por otra parte, en el Anejo 9º, el artículo 1-*Cálculos relativos al Estado límite de durabilidad*, donde se define este estado como el 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, en este caso debidos a causa de los cloruros, alcancen el grado suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada.

### 3.3 Técnicas de control de cloruros

Las técnicas de control de cloruros en hormigones en las que nos hemos basado para desarrollar este trabajo son:

- Técnicas de determinación cuantitativa de cloruros. Se realizan mediante el método volumétrico Volhard (método de referencia UNE 112010:2011-RILEM [75,76]) o mediante potenciometría (método alternativo UNE 80213 (2010) [77]).
- Técnicas para determinación del coeficiente de difusión de cloruros. Son muy variados los procedimientos seguidos para la obtención del coeficiente de difusión, pero en general, se pueden englobar en 2 grupos:
  - a) Los basados en la difusión o migración en estado estacionario ( $D_s$  o  $D_{eff}$ ).
  - b) Los basados en la difusión en estado no estacionario ( $D_{app}$  o  $D_{ns}$ ).

Los realizados en condiciones estacionarias pueden seguir el procedimiento de la difusión natural o el de migración iónica; en ambos casos, sólo se tiene en cuenta el mecanismo de transporte iónico de cloruros. Los procedimientos en estado no estacionario se realizan mediante la difusión natural o forzada mediante la aplicación de un campo eléctrico para acelerar el transporte iónico. La  $D_{ns}$  es la que se suele tener en cuenta para predecir el tiempo de iniciación de la corrosión (Castellote, M. [78]).

Por último, en el ANEXO 1 de este trabajo, están explicadas algunas de las técnicas de control de cloruros que utilizan los artículos científicos, de los que se ha recopilado información para realizar este estudio y poder elaborar la tabla 12.

### 3.4 Modelo desarrollado por FIB – Model Code 2010 [79]

Se trata de un modelo probabilístico basado en la segunda Ley de Fick, a través de la expresión:

$$C_{crit} = C(x = a, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \cdot \left( \frac{a - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app,C} \cdot t}} \right) \right) \quad (3)$$

Donde:

$C_{crit}$	Contenido crítico de cloruros (% peso de cemento).
$C(x,t)$	Contenido de cloruros a una profundidad $x$ , y un tiempo $t$ (% peso de cemento).
$C_0$	Contenido inicial de cloruros en el hormigón (% peso de cemento).
$C_{s,\Delta x}$	Contenido de cloruros a una profundidad $\Delta x$ y a un determinado tiempo $t$ (% peso de cemento).
$x$	profundidad con un contenido de cloruros correspondiente $C(x,t)$ (mm).
$a$	Recubrimiento de hormigón (mm).
$\Delta x$	Profundidad de la zona de convección (capa de hormigón, en la cual el proceso de penetración de cloruros no sigue la 2ª ley de difusión de Fick) (mm).
$D_{app,C}$	Coefficiente de difusión de cloruros aparente ( $\text{mm}^2/\text{año}$ ).
$t$	Tiempo (años).
$\operatorname{erf}$	Función error de Gauss.

El coeficiente de difusión aparente de cloruros en el hormigón se puede determinar mediante la ecuación:

$$D_{app,C} = K_e \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot A(t)$$

$K_e$  Variable de transferencia ambiental (-).

$$K_e = \exp \left[ b_e \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}} \right) \right]$$

$b_e$	Variable de la regresión (K)
$T_{ref}$	Temperatura normalizada del ensayo (293 K)
$T_{real}$	Temperatura en el elemento estructural o ambiental (K)

$D_{RCM,0}$	Coefficiente de migración de cloruros ( $\text{mm}^2/\text{año}$ )
$k_t$	Parámetro de transferencia (-)
$A(t)$	Subfunción que considera el “envejecimiento” (-).

$$A(t) = \left( \frac{t_0}{t} \right)^a$$

$a$	Exponente de envejecimiento (-)
$t_0$	Instante de tiempo de referencia (años)

$D_{RCM,0}$  se obtiene del método de Migración Rápida de Cloruros (NT Build 492 [80]). Se trata de una variable de distribución normal, cuya desviación estándar es  $\sigma = 0,2 \cdot m$  ( $m$  = media). Si no se puede obtener a través de ensayos, de forma orientativa se puede emplear la siguiente tabla 1 ( $D_{RCM,0} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ):

Tabla 1: Coeficiente de migración de cloruros

Tipo de cemento	$a/c_{eqv}^1$					
	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60
CEM I 42,5 R	n.d. <sup>2</sup>	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM I 42,5 R + FA (k=0,5)	n.d. <sup>2</sup>	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM I 42,5 R + SF (k=2)	4,4	4,8	n.d. <sup>2</sup>	n.d. <sup>2</sup>	5,3	n.d. <sup>2</sup>
CEM III/B 42,5	n.d. <sup>2</sup>	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

1. relación a/c (equivalente), considerando las cenizas volantes (FA) o el humo de sílice (SF) con su correspondiente factor de eficiencia (k). Los contenidos considerados fueron: FA= 22% y SF=5% en peso de cemento, respectivamente.
2. n.d.- el coeficiente de migración de cloruros no se ha determinado para estas dosificaciones de hormigón

Los  $D_{app,c}$  se obtienen de perfiles de cloruros recogidos de la Bibliografía y agrupados en función de la dosificación del hormigón y el ambiente de exposición. Posteriormente se realiza un ensayo de migración acelerada de cloruros con probetas de esas mismas dosificaciones y se ajustan las regresiones, para así obtener el coeficiente de envejecimiento.

El coeficiente de envejecimiento para las zonas sumergidas, carrera de mareas y de salpicadura se muestra en la siguiente tabla 2; se puede suponer igualmente válida para las zonas de salpicadura y atmosférica, del lado de la seguridad:

Tabla 2: Coeficientes de envejecimiento

Hormigón	Exponente de envejecimiento a(-)
Con cemento Portland CEM I: $0,40 \leq a/c \leq 0,60$	$\beta$ ( $m^1=0,30$ ; $s^2=0,12$ ; $a^3=0,0$ ; $b^4=1,0$ )
Con cenizas volantes $f \geq 0,2 \cdot z$ ; $k=0,50$ ; $0,40 \leq a/c_{eq} \leq 0,60$	$\beta$ ( $m^1=0,60$ ; $s^2=0,15$ ; $a^3=0,0$ ; $b^4=1,0$ )
Con escorias CEM III/B: $0,40 \leq a / c \leq 0,60$	$\beta$ ( $m^1=0,45$ ; $s^2=0,20$ ; $a^3=0,0$ ; $b^4=1,0$ )

$m^1$ : valor medio  
 $s^2$ : desviación estándar  
 $a^3$ : límite inferior  
 $b^4$ : límite superior

Para cuantificar el valor de “a”, se estableció que  $k_t = 1$ .  
El instante de tiempo de referencia se eligió a los 28 días ( $t_0=0,0767$  años).  
 $b_e$  tiene una distribución normal, con  $m = 4800$ ;  $\sigma = 700$ .

En cuanto al contenido de cloruros en superficie, aunque también depende del tiempo, en un periodo de tiempo corto ya llega al valor máximo, por lo que para predicciones a largo plazo no se incluye esta dependencia del tiempo.

La profundidad de la zona de convección ( $\Delta x$ ) depende del ambiente de exposición:

- Para zona de salpicaduras, es una función beta, con  $m= 8,9$ ;  $s= 5,6$ ;  $a= 0,0$ ;  $b=50,0$ .
- Para zona sumergida, es un parámetro constante de valor 0.
- Para zona de carrera de mareas, es una función beta en la que hay que determinar los parámetros  $m$ ,  $s$ ,  $a$  y  $b$ .

El contenido crítico de cloruros (en % en peso de cemento) es una función beta, con  $m= 0,6$ ;  $s= 0,15$ ;  $a= 0,2$ ;  $b= 2,0$ .

### 3.5 Predicción de coeficientes de difusión de cloruros mediante una red neuronal

En este apartado se comentan los pasos que se han dado para llegar a conseguir los coeficientes de difusión de cloruros en el hormigón para diferentes tipos de cementos, entre ellos el CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/B-V, CEM II/A-W, CEM II/B-M, CEM III y CEM IV. La composición de los distintos cementos se encuentra en el ANEXO 2.

En primer lugar se hizo una búsqueda exhaustiva de artículos y trabajos científicos que estudiaran los cloruros de ambientes marinos o cloruros desarrollados en laboratorio y su influencia en el hormigón. Después se buscó el tipo de cemento que utilizaba, la relación agua/cemento, la técnica de determinación de cloruros, el ambiente en el que se desarrolló el estudio, la edad de las muestras de hormigón a las que se ensayaron y los datos de difusión de cloruros que proporcionaban. Una vez extraída toda esta información, se encontró una fórmula en la tesis doctoral de Bermúdez Odriozola M.A. [1] para actualizar los coeficientes de difusión a un año según la expresión:

$$D(t) = D_1 \cdot \left(\frac{t_1}{t}\right)^{0,5}$$

donde  $D(t)$  es el coeficiente de difusión tras un tiempo de exposición y  $t$  y  $D_1$  es el coeficiente de difusión al cabo de un año, si  $t$  está expresado en años, ecuación utilizada por Goltermann en 2003 [73] y que también podemos encontrar en la EHE-08 en su “Anejo 9” apartado 1.2.2.2. Esta actualización es necesaria porque cada artículo nos proporciona resultados a diferentes edades, así conseguimos una homogeneidad de los datos y que todos estén a la misma edad.

El siguiente paso es separar los datos y agruparlos según el tipo de cemento utilizado y también según su relación agua/cemento, con el fin de poder hacer una red neuronal con cada uno de los cementos nombrados anteriormente. Para ajustar mejor la Red Neuronal Artificial se duplican los valores más fiables como hacen algunos autores, en nuestro caso, los valores elegidos para duplicar son los que en el siguiente apartado muestran los coeficientes de variación más bajos.

Se eligen las variables del tipo de cemento y la relación agua/cemento porque son las más significativas. Hay otras como la humedad, la temperatura, la cantidad de cloruros en las disoluciones y el voltaje utilizado en las pruebas de migración que no están presentes en todas las investigaciones, debido a eso y a que varían poco entre sí en las diferentes técnicas de determinación de cloruros, no se han tenido en cuenta en este trabajo.

	HR %	T <sup>a</sup> (°C)	Cloruros		Voltaje
			NaCl	NaOH	
NTB 443	-	20-25	165g/L (2,8 mol)		-
NTB 492	-	20-25	10%	0,3N	25-60
AASHTO T-277 (ASTM C1202)	-	-	3%	0,3N	12-60
CTH Rapid Test	-	-	10%	0,3N	12-30
ASTM C1152	-	20-35	-	-	-
ASTM C1218	-	25-35	16 -18 g/L		-

Estos datos se introducen en la red neuronal y se ejecuta el programa varias veces, en este caso se hizo correr el programa 5 veces con diferentes neuronas en la capa oculta, en concreto 1, 2, 3 y 4 neuronas, para posteriormente hacer la media de los resultados extraídos. Para los cementos CEM II/A-D, CEM II/A-W y CEM II/B-M se consiguieron pocos datos y por lo tanto no se realizó una red neuronal con ellos, simplemente se realizó una media de estos. Los datos utilizados se pueden consultar en el ANEXO 1 y los resultados obtenidos en el ANEXO 2.

Esquema del procedimiento para cada tipo de cemento:

- 5 ejecuciones de RN – 1 neurona – Promedio de los resultados.
- 5 ejecuciones de RN – 2 neuronas – Promedio de los resultados.
- 5 ejecuciones de RN – 3 neuronas – Promedio de los resultados.
- 5 ejecuciones de RN – 4 neuronas – Promedio de los resultados.
- Promedio de anteriores resultados.

### 3.6 Datos de coeficientes de difusión de cloruros

En este apartado se muestra un análisis de los datos extraídos de los artículos que se han ido recopilando y actualizados a un año, comenzando con una visión general de los promedios de estos y continuando con el análisis de los coeficientes de variación.

En la tabla 3 vemos el promedio de todos los datos que se han recopilado.

Tabla 3: Promedio de todos los datos								
Tipo de cemento	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	1,3	1,6	4,6	6,4	10,9	14,8	13,5	27,0
II/A-D			1,7					
II/A-V	0,3	0,4	1,5	2,1		7,4		8,1
II/B-V	0,1	0,4		1,8		2,8		4,3
II/A-W				1,5		2,5		3,2
II/B-M	1,2							
III	0,1	0,3	0,6	1,5	2,2	2,6		
IV	1,2		2,4		5,0		6,2	

Las siguientes tablas son de los dos ambientes más diferenciados, por un lado el de laboratorio (Tabla 4) y por otro el marino (Tabla 5), donde ya se puede ver que los datos extraídos de hormigones expuestos a un ambiente marino real tienden a ser más altos que los de ambientes recreados en laboratorio.

Tabla 4: Promedio de los datos del ambiente de laboratorio								
Tipo de cemento	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	1,3	0,2	4,5	4,4	4,8	5,3	13,5	4,8
II/A-D			1,0					
II/A-V	0,3	0,4	1,5	0,7		0,8		1,2
II/B-V	0,1	0,4		0,8		1,0		1,3
II/A-W				1,5		2,5		3,2
II/B-M	1,2							
III	0,1	0,3		1,4	0,6	1,8		2,1
IV	1,2		2,4					

Tipo de cemento	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	1,3	3,1	8,9	10,0	22,2	29,2		56,6
II/A-D			2,8					
II/A-V				4,9		7,4		8,1
II/B-V				2,8		3,3		5,3
II/A-W								
II/B-M								
III					5,1			
IV					5,0		6,2	

A continuación se ha procedió a realizar el coeficiente de variación de ellos, ya que este coeficiente expresa si la dispersión es alta o no y el grado de representatividad de la media. Además permite comparar coeficientes de distintas series de datos y sus respectivos niveles de dispersión. Para ello hay que obtener primero la “desviación estándar” que se calcula según:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

siendo n el número de datos y  $\bar{x}$  la media de ellos.

Después para el “Coeficiente de variación” dividimos ésta desviación entre la media de los datos:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \quad (5)$$

En la tabla 6, se observa que hay alguna serie de datos que sobrepasan de uno, esto nos indica que hay una dispersión alta y que la media tiende a ser poco representativa, mientras que otros no sobrepasan la unidad lo que nos indica lo contrario, que la dispersión es media o baja y que las medias tienden a ser más representativas. Esto es debido a la diversidad de artículos revisados y a los diferentes métodos de determinación de cloruros que usa cada uno, además del tipo de ambiente en el que se desarrolla cada estudio. Normalmente los datos recopilados de probetas que están en ambiente marino real, bien sea sumergido, aéreo, salpicaduras o carrera de mareas tienden a ser algo más elevados que los datos recopilados de probetas que se desarrollan en laboratorio, de ahí que se produzcan algunas dispersiones más altas en algunos casos que en otros.

Tabla 6: Coeficiente de Variación (Todos los datos)								
CEM	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	1,04	1,44	0,29	0,40	1,35	1,03	-	1,11
II/A-D	-	-	0,52	-	-	-	-	-
II/A-V	1,53	1,10	0,16	1,13	-	-	-	-
II/B-V	0,08	0,03	-	0,73	-	0,55	-	0,53
III	0,538	1,019	0,866	0,588	1,10	0,109	-	-
IV	0,21	-	0,23	-	0,94	-	0,13	-
II/A-W	-	-	-	1,04	-	0,31	-	0,55
II/B-M	0,13	-	-	-	-	-	-	-

$0 \leq CV \leq 0,3$	Dispersión baja	Media representativa
$0,3 \leq CV \leq 1$	Según	Según al valor al que se acerque
$CV \geq 1$	Dispersión alta	Media poco representativa

En la tabla 7 solo se toman los datos recopilados en ambientes de laboratorio, y observamos que tenemos dispersiones altas en las dosificaciones 0,3 y 0,35 para los cementos I, II/A-V, III y para la dosificación 0,45 del cemento II/A-W, mientras que todas las demás son medias y bajas.

Tabla 7: Coeficiente de Variación (Datos de laboratorio)								
CEM	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	1,64	1,46	0,21	0,47	0,61	0,61		0,69
II/A-D			0,52					
II/A-V	1,53	1,19	0,16	0,26				
II/B-V	0,09	0,03		0,35		0,00		0,00
III	0,53	1,017		0,85	0,911	0,57		
IV	0,21		0,23					
II/A-W				1,04		0,32		0,55
II/B-M	0,13							

En la tabla 8 solo se toman los datos recopilados en ambiente marino y se observa que las dispersiones generalmente son bajas salvo en la dosificación 0,5 del cemento I, que sobrepasa de la unidad.

Tabla 8: Coeficiente de Variación (Datos del ambiente marino)								
CEM	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I	0,29	0,88	0,35	0,19	1,09	0,51		0,55
II/A-D			0,20					
II/A-V								
II/B-V				0,42		0,42		0,26
III					0,33			
IV					0,94		0,13	
II/A-W								
II/B-M								

A continuación se analizan los datos según las técnicas de determinación que se han utilizado, con el fin de ver si hay dispersión entre los datos recopilados por un mismo método. Comenzando por el método NTB 443 [81], utilizado en los artículos 2º y 13º expuestos en el ANEXO 2, observamos en la tabla 9 que los coeficientes de variación son bastante bajos en todas las dosificaciones, lo que nos indica que la dispersión de los datos es baja.

		Tabla 9: Coeficiente de Variación (NTB 443)							
CEM		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I				0,03		0,29			
II/A-D				0,32					
II/A-V			0,03	0,16					
CEM III						0,34			
II/B-M		0,13							

El siguiente es el método AASHTO T-277 [82], utilizado en los artículos 3º,9º,12º y 14º (ANEXO 2), y observamos en la tabla 10 que los coeficientes de variación son bastante bajos, lo que nos indica que la dispersión es baja, salvo para la dosificación 0,65 del CEM I que tiende a tener más dispersión que las demás.

		Tabla 10: Coeficiente de Variación (AASHTO T277)							
CEM		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I			0,33				0,67		1,00
II/A-V			0,53		0,25				
II/B-V			0,03		0,36		0,52		
III					0,39				

El siguiente es el método ASTM C-1152 [83], utilizado en los artículos 5º, 7º y 14º (ANEXO 2), y observamos que en la tabla 11 los coeficientes de variación son bastante bajos, lo que nos indica que la dispersión de datos es baja, salvo la dosificación 0,5 del CEM IV que tiende también a tener más dispersión que el resto de dosificaciones.

		Tabla 11: Coeficiente de Variación (ASTM C-1152)							
CEM		0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65
I			0,36	0,62	0,20	0,10	0,58		
III						0,219			
IV						0,94		0,13	

Para las demás técnicas de determinación de cloruros, como son el CTH Rapid Test [84], ASTM C-1218 [85], ASTM C-114 [86], NTB 492 [80] y la penetración por presión, no se puede hacer una comparativa porque solo se han usado en un solo artículo, cuyos datos se pueden ver en el ANEXO 2 de este trabajo.

### 3.7 Estudios recientes sobre cloruros

Respecto a publicaciones más recientes que tratan temas de cloruros en el hormigón podemos destacar algunos estudios realizados por el Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructuras Urbanas de la Universidad de Alicante, el Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción GIQUIMA del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), de la Universidad Politécnica de Valencia y el Instituto de Ciencia de la construcción “Eduardo Torroja” de Madrid.

Garcés et al [87] se encargaron de estudiar el nivel de corrosión de las armaduras de acero embebidas en morteros de cemento Portland que contienen diferentes tipos de cenizas volantes, realizado Universidad de Alicante. Cañon et al [88] estudiaron la viabilidad de la extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado estructural utilizando una pulverización de pasta de polvo de cemento con grafito conductor como ánodo, en la Universidad Politécnica de Valencia. Andrade et al [89] que desarrollan un procedimiento para el cálculo del coeficiente de difusión y la concentración de cloruros en superficie a partir de un perfil que tiene una concentración máxima en la superficie de hormigón, en el Instituto Eduardo Torroja.

## 4 Capítulo : Descripción del problema de optimización

### 4.1 Introducción

Este apartado muestra la forma en que se comprueba una viga de hormigón armado de sección rectangular, sometida a su propio peso, a una carga permanente repartida uniformemente, a una carga repartida de posición variable, y a una carga puntual. Con ello se pretende facilitar la escritura de un programa capaz de hacer la comprobación, para posteriormente incorporarlo a un algoritmo de optimización heurística.

Es importante destacar que no se trata de describir un modo de calcular la armadura de una viga, sino de chequear si una viga totalmente definida verifica o no todos los estados límites que le son preceptivos.

En los apartados que siguen se describe el problema, especificando las variables y parámetros que definen la viga a resolver, y se formula completamente la comprobación. Se aplicarán los métodos y expresiones establecidos por la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08.

## 4.2 Descripción del problema

La viga que se va a comprobar es una viga de sección rectangular, biapoyada (figura 6), que debe soportar una carga repartida permanente,  $G$ , y dos cargas de posición variable,  $Q_1$  repartida y  $Q_2$  puntual.

Para la definición geométrica del problema es necesario determinar, además de los valores de las cargas, aquellos otros relacionados con la geometría, los materiales y las armaduras.

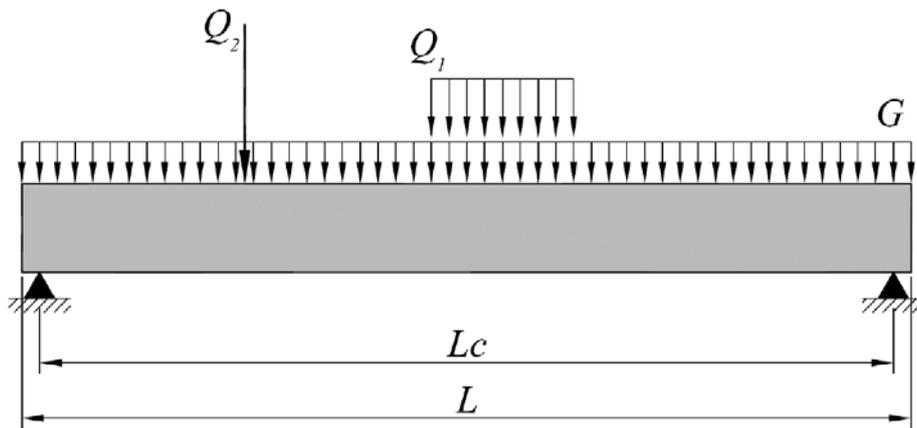


Figura 6: Cargas que debe soportar la viga a comprobar.

### 4.2.1 Definición geométrica

La geometría de la viga queda definida con cuatro variables. Las dos primeras determinan la longitud de la pieza (figura 6):

$L_c$ : Luz de cálculo de la viga (figura 6). En nuestro caso 10.000 mm

$b$ : Anchura de la sección (figura 7).

$c$ : Canto de la sección (figura 7).

### 4.2.2 Armado

La viga dispone de tres armaduras principales, una inferior de flexión, otra superior, y un armado de cortante. Para definir estas armaduras se utilizan las seis variables que se presentan en la figura 7, y que son:

$n_1$ : Número de barras en la capa inferior.

$n_2$ : Número de barras en la capa superior.

$sep_3$ : Separación entre los cercos de cortante.

$\varnothing_1$ : Diámetro de la armadura de la capa inferior.

$\varnothing_2$ : Diámetro de la armadura de la capa superior.

$\varnothing_3$ : Diámetro de la armadura de cortante.

Estos diámetros varían entre: [6-8-10-12-16-20-25-32-40]

Se requiere además de una séptima variable (*rec*) que proporciona el recubrimiento mínimo a considerar.

Es importante notar que al definir de este modo la armadura se está admitiendo de forma implícita que todas las barras de una capa son del mismo diámetro, y que el esquema de armado es el mismo a toda la viga.

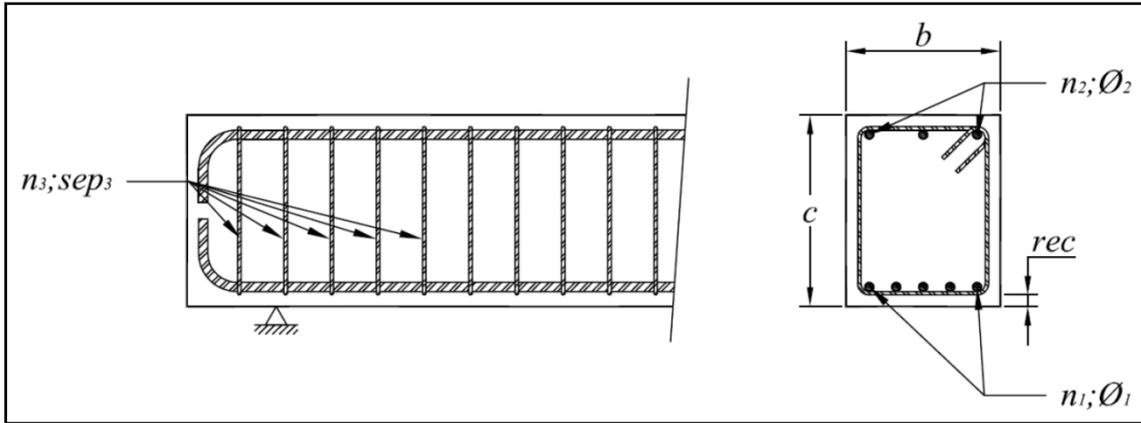


Figura 7: Variables geométricas y de armado.

### 4.2.3 Materiales

Para la construcción de la viga es necesario determinar el tipo de hormigón y de acero. Respecto a éste último en España solamente existen dos grados de acero: B-500S con un límite elástico  $f_{sk} \geq 500$  y B-400S con un límite elástico  $f_{sk} \geq 400$ , y de ellos solo se usa el primero, pues el segundo no es económicamente rentable (el ahorro de coste que conlleva su menor precio no está compensado por el ahorro de cuantía que conlleva su mayor límite elástico).

Por tanto solamente hay que considerar una variable, que defina el tipo de hormigón:  $H(f_{ck})$ , que será una entre este conjunto de posibilidades:

[30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100]

### 4.2.4 Cargas que intervienen

Las cargas que se le pueden aplicar pueden variar según las distintas condiciones de contorno, pero en nuestro caso como es una viga genérica vamos a elegir unas cargas aleatorias como son:

- G: 4 N/mm de carga repartida permanente
- Q<sub>1</sub>: 6 N/mm de carga repartida
- Q<sub>2</sub>: 5.000 N de carga puntual

### 4.3 Comprobaciones geométricas previas

La viga a comprobar procede de un algoritmo de optimización, que define una lista de valores posibles para cada variable. Si la anchura de la viga es grande, el número de barras que se pueden disponer en las capas superior e inferior de armadura longitudinal pueden ser grandes. Por ejemplo, una viga de 2,00 m de anchura puede alojar 15 barras de armadura pasiva sin problemas. Pero si por el contrario, la anchura se reduce a 0,40 m, el número máximo de barras quedaría limitado a unas pocas.

Para evitar dar por válida una solución que no pueda ser construida por este motivo la primera comprobación a realizar es que entre las barras hay anchura suficiente. Para ello lo que se puede hacer es calcular la distancia a la que quedan los centros de las barras, y verificar si es mayor que un valor mínimo que se decide de antemano.

En este caso se va a comprobar que la separación entre barras es de al menos 25 mm. La expresión que proporciona la separación entre barras de la armadura longitudinal inferior:

$$l = \frac{b-2rec-2\phi_3-\phi_i}{n_i-1} \quad (6)$$

siendo  $i = 1$  o  $i= 2$  para la comprobación de la armadura inferior o superior respectivamente.

### 4.4 Comprobaciones de cuantías mínimas

La viga es un elemento que funciona a flexión simple y cortante. Las cuantías mínimas a cumplir son las geométricas para vigas, las mecánicas por flexión y la cuantía mínima a cortante.

#### 4.4.1 Cuantía geométrica mínima (art. 42.3.5 EHE-08)

La cuantía geométrica de acero en tracción de la viga viene dada por la expresión:

Cuadro 1: Áreas nominales de redondos corrugados

$\phi$	6	8	10	12	16	20	25	32	40
Área ( $mm^2$ )	28,3	50,3	78,5	113	201	314	491	804	1260

$$\rho_1 = \frac{As_1}{b \cdot c} \quad (7)$$

donde  $As_1$  es el producto del área del redondo de diámetro  $\phi_1$  por el número de redondos  $n_1$ . En el cuadro 1 se adjuntan las áreas nominales para cada diámetro.

Esta cuantía debe ser superior al 2.8‰.

Del mismo modo la cuantía de armadura comprimida de la viga viene dada por la expresión:

$$\rho_2 = \frac{As_2}{b \cdot c} \quad (8)$$

donde  $As_2$  es el producto del área del redondo de diámetro  $\phi_2$  por el número de redondos  $n_2$ . Esta cuantía debe ser superior a la tercera parte de  $2.8 \text{‰}$ .

#### 4.4.2 Cuantía mecánica mínima (art. 42.3.2 EHE-08)

La sección de acero en tracción de la viga dada por  $As_1$  debe ser superior a la obtenida con la expresión:

$$0,04 \cdot b \cdot c \cdot \frac{H/1,5}{500/1,15}$$

#### 4.4.3 Cuantía mínima de cortante (art. 44.2.3.4.1 EHE-08)

La cantidad de acero a cortante se obtiene de la expresión:

$$A_{90} = 2 \cdot \frac{As_3}{sep_3} \quad (9)$$

Esta cantidad debe ser superior a la obtenida con la expresión:

$$\frac{f_{ct,m} \cdot b}{7,5 \cdot 400}$$

siendo  $f_{ct,m}$  la resistencia media a flexotracción, que se obtiene con la expresión:

$$f_{ct,m} = 0,3 \cdot H^{2/3} \quad (10)$$

Cuadro 2: Coeficiente de seguridad de las acciones en ELU

Acción	Efecto favorable	Efecto desfavorable
Peso propio	$\gamma_G=1,00$	$\gamma_G=1,35$
Carga permanente	$\gamma_{G^*}=1,00$	$\gamma_{G^*}=1,50$
Variable	$\gamma_Q=0,00$	$\gamma_Q=1,50$

## 4.5 Comprobaciones en Estado Límite Último

### 4.5.1 Flexión

La comprobación a flexión consiste en comprobar que el momento actuante mayorado ( $M_d$ ) es inferior al momento flector de agotamiento ( $M_u$ ). El primero se obtiene en la sección central cuando actúa la carga variable repartida a toda la viga, y la carga puntual en la sección centro-luz (ver figura 8).

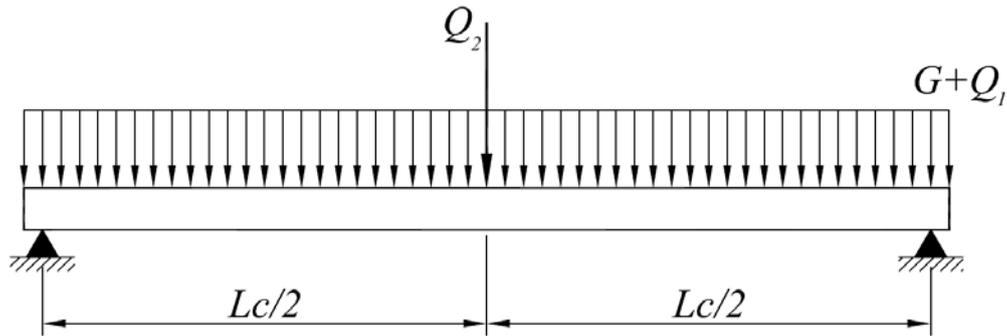


Figura 8: Estado de cargas para momento flector máximo.

Para mayorar las cargas se tienen que aplicar coeficientes de seguridad para las acciones en E.L.U. se toman los valores del cuadro 2.

El momento flector en E.L.U. se obtiene con la expresión:

$$M_d = (1,35 \cdot b \cdot c \cdot 25 \cdot 10^{-6} + 1,50 \cdot (G + Q_1)) \cdot \frac{Lc^2}{8} + 1,50 \cdot Q_2 \cdot \frac{Lc}{4}$$

Para calcular el momento de agotamiento se puede seguir el artículo 42.1.3 de la EHE-08. Al tratarse de un problema de flexión simple el momento de agotamiento se produce en el dominio 3 de deformación (ver figura 9).

Por tanto, el plano de deformación queda definido por la profundidad de la fibra neutra. Para cada plano se pueden integrar las tensiones para obtener un axil y el momento flector, teniendo en cuenta:

- Las tensiones en el hormigón la zona comprimida de la sección toman el valor de  $\eta f_{cd}$  en la parte superior hasta la profundidad  $\lambda_x$  (bloquerrectangular equivalente, art. 39.5 EHE-08).
- Las tensiones en el acero en tracción toman el valor de su límite elástico, pues la deformación es siempre superior a  $\epsilon_y$ .

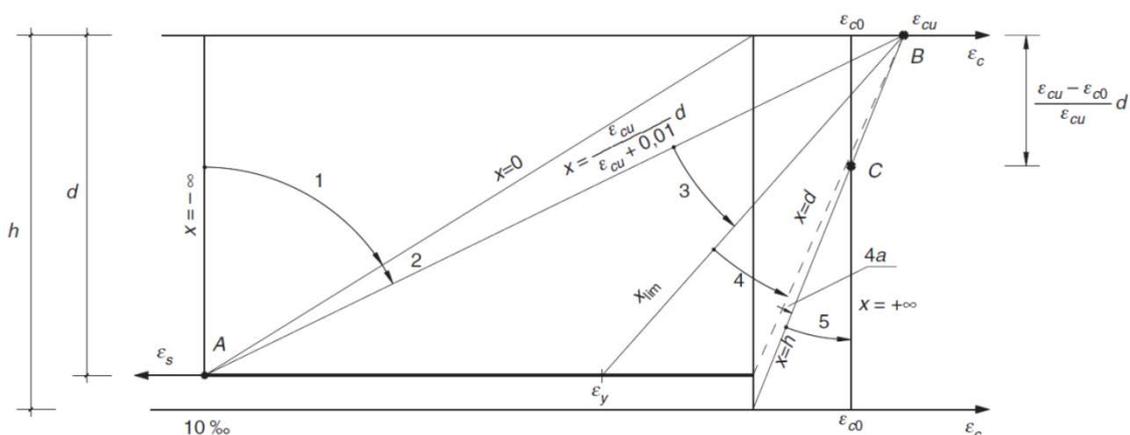


Figura 9: Dominios de deformación (fuente EHE-08)

- La tensión de la armadura de la capa superior se obtiene a partir de su deformación. La deformación de este acero se toma del plano de deformación, esto es:

$$\varepsilon'_y = \varepsilon_{cu} \frac{x - d'}{x}$$

siendo:

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035$$

si  $H \leq 50 \text{ N/mm}^2$  (art. 39.5 EHE-08); ó

$$\varepsilon_{cu} = 0,0026 + 0,0144 \cdot \left[ \frac{100 - f_{ck}}{100} \right]^4$$

en caso contrario, y siendo  $d'$  la profundidad de la armadura superior:

$$d' = rec + \phi_3 + \phi_2/2$$

Con todo ello el axil para una profundidad de fibra neutra dada  $x$  viene dado por (suponiendo positivas las compresiones):

$$N_u = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cd} - A_{s1} \cdot \frac{500}{1,15} + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon'_y$$

y el momento:

$$M_u = b \cdot \lambda \cdot x \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot \left[ d - \frac{\lambda x}{2} \right] + A_{s2} \cdot E_s \cdot \varepsilon'_y \cdot (d - d')$$

siendo  $E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$

La obtención del momento último consiste en efectuar iteraciones en la expresión 21 hasta que se encuentre la profundidad  $x$  de fibra neutra para la que el axil es nulo, y aplicar la expresión 22 con ese valor para calcular el momento.

La definición de las funciones  $\eta\lambda$  se puede ver en el artículo 39.5. de la Instrucción EHE-08:

- si  $H \leq 50 \text{ N/mm}^2$ :

$$\eta = 1$$

$$\lambda = 0,8$$

- si  $H > 50 \text{ N/mm}^2$ :

$$\eta = 1,0 - \frac{(H - 50)}{200}$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{(H - 50)}{400}$$

## 4.5.2 Cortante

De acuerdo con la Instrucción EHE-08 la verificación del E.L.U. de cortante implica dos comprobaciones.

### 4.5.2.1 Compresión oblicua del hormigón (art.44.2.3.1 EHE-08)

El agotamiento por compresión oblicua del hormigón se comprueba en el borde del apoyo de la pieza. En este caso no se puede conocer la dimensión del apoyo, por lo que se supondrá que corresponde con el extremo de la luz de cálculo. El cortante pésimo que puede actuar en ese caso se produce con toda la viga cargada, y la carga puntual actuando en la sección inmediatamente anterior a la de apoyo (ver figura 10).

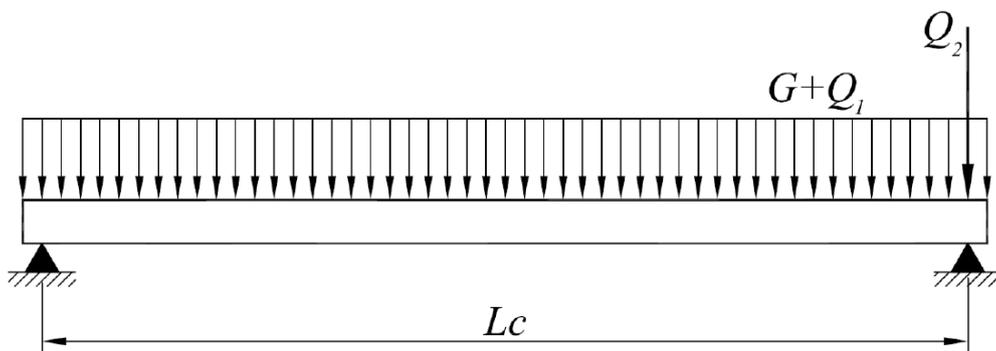


Figura 10: Estado de cargas para cortante máximo en apoyos.

Su valor es por tanto:

$$V_{rd} = (1,35 \cdot b \cdot c \cdot 25 \cdot 10^{-6} + 1,50 \cdot (G + Q_1)) \cdot \frac{Lc}{2} + 1,50 \cdot Q_2$$

El cortante de agotamiento se calcula con  $K=1,00$  (no hay pretensado) y tomando  $\cot\theta = 45^\circ$ , y  $\cot\alpha = 90^\circ$  (armadura vertical):

$$V_{u1} = f_{1cd} \cdot b \cdot d \cdot \frac{1}{2}$$

siendo:

$$f_{1cd} = 0,6 \cdot \frac{H}{1,5}$$

si  $f_{cd} \leq 60 \text{ N/mm}^2$ : ó

$$f_{1cd} = \left(0,90 - \frac{H}{200}\right) \cdot \frac{H}{1,5} \geq 0,50 \cdot \frac{H}{1,5}$$

en caso contrario.

#### 4.5.2.2 Agotamiento por tracción en el alma (art.44.2.3.2 EHE-08)

El agotamiento por tracción en el alma se comprueba a un canto útil del borde del apoyo. El cortante pésimo que puede actuar en ese caso se produce con la carga repartida actuando hasta la sección de comprobación, y la carga puntual actuando en esa sección (ver figura 11). Su valor es por tanto:

$$V_d = (1,35bc \cdot 25 \cdot 10^{-6} + 1,5G) \cdot \left(\frac{Lc}{2} - d\right) + 1,5Q_1 \cdot \frac{(Lc - d)^2}{2Lc} + 1,5Q_2 \cdot \frac{(Lc - d)}{Lc}$$

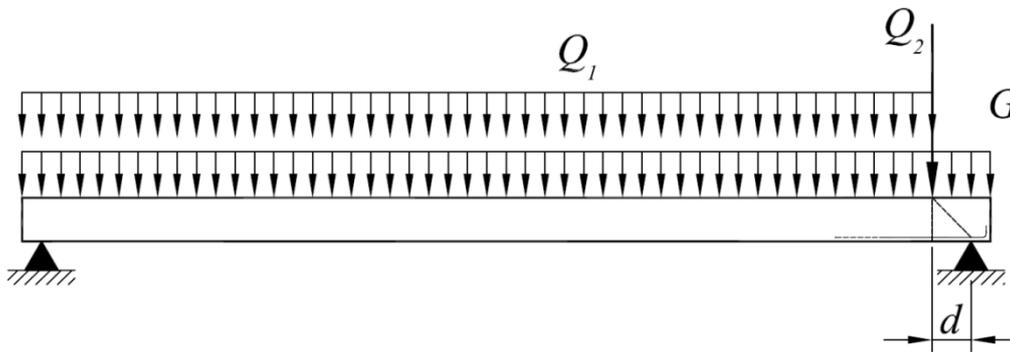


Figura 11: Estado de cargas para cortante máximo a un canto útil del apoyo

El cortante de agotamiento se calcula como la suma:  $V_{u2} = V_{cu} + V_{su}$ , siendo:

$$V_{cu} = 0,10 \cdot \left[ 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right] \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot H)^{\frac{1}{3}} \cdot b \cdot d$$

donde  $\rho_1$  toma el valor calculado en la ecuación 20; y

$$V_{su} = 0,9 \cdot d \cdot A_{90} \cdot 400$$

donde  $A_{90}$  es la cantidad unitaria de armadura de cortante que se obtiene en la ecuación 22.

## 4.6 Comprobaciones en estado límite de servicio

### 4.6.1 Verificación del estado límite de fisuración por tracción (art.49.2.3 EHE-08)

Al tratarse de un elemento de hormigón armado, la abertura de fisura se comprueba en combinación cuasipermanente. La comprobación consiste en determinar la abertura de fisura que se produce para el momento flector máximo calculado para la combinación cuasipermanente de acciones, y comprobar que es inferior al valor que la EHE-08 establece para cada ambiente de exposición. Se considerará un ambiente III y IV, cuya abertura de fisura se limita a 0.2 mm, según la tabla 5.1.1.2 de la citada normativa.

El momento flector máximo se obtiene de acuerdo con la posición de las cargas de la figura 8. Su valor es:

$$M_f = (b \cdot c \cdot 25 \cdot 10^{-6} + G + \psi_2 \cdot Q_1) \cdot \frac{Lc^2}{8} + \psi_2 \cdot Q_2 \cdot \frac{Lc}{4}$$

siendo  $\psi_2$  el coeficiente de combinación cuasipermanente, para el que puede tomarse al valor de 0.2, por ejemplo.

La fisuración se debe limitar a una región que no afecte al correcto funcionamiento o la durabilidad de la estructura, o produzca una apariencia inaceptable.

En la abertura de fisura la comprobación consiste en satisfacer la siguiente inecuación:

$$W_k \leq W_{m\acute{a}x}$$

donde:

$W_k$  Abertura característica de fisura.

$W_{m\acute{a}x}$  Abertura máxima de fisura definida en la tabla 5.1.1.2 de la instrucción EHE-08.

siendo:

$$W_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm}$$

donde:

$\beta$  Coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico y vale 1,3 para fisuración producida por acciones indirectas solamente y 1,7 para el resto de los casos.

$s_m$  Separación media de fisuras, expresada en mm:

$$s_m = 2 \cdot (rec + \phi_3 + \phi_1/2) + 0,2l + 0,05 \cdot \frac{\phi_1 \cdot A_{c,eficaz}}{A_{s1}}$$

$\varepsilon_{sm}$  Alargamiento medio de las armaduras, teniendo en cuenta la colaboración del hormigón:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\sigma_S}{E_S} \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_S} \right)^2 \right] \geq 0,4 \frac{\sigma_S}{E_S}$$

$C$  Recubrimiento de las armaduras traccionadas.

$l$  Distancia entre barras longitudinales de tracción (expresión 19).

$A_{c,eficaz}$

$$A_{c,eficaz} = b \cdot \max(\overline{rec} + \phi_3 + 8 \cdot \phi_1; c/2)$$

Para calcular las tensiones  $\sigma_s$  y  $\sigma_{sr}$  en sección fisurada se puede aplicar el método del Anejo 8 de la Instrucción EHE-08. La profundidad relativa de la fibra neutra viene dada por:

$$\frac{X}{d} = n_c \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \cdot \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{\left( 2 \cdot \left( 1 + \frac{\rho_2 \cdot d'}{\rho_1 \cdot d} \right) \right)}{\left( n_c \cdot \rho_1 \cdot \left( 1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^2 \right)}} \right]$$

donde  $n_c$  es el coeficiente de homogeneización:

$$n_c = \frac{E_s}{E_c}$$

$$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_c = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

$$\rho_1 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \quad \rho_2 = \frac{A_{s1}}{b \cdot d}$$

La inercia fisurada se obtiene como:

$$I_f = n_c \cdot A_{s1} \cdot (d - X) \cdot \left( d - \frac{X}{3} \right) + n_c \cdot A_{s2} \cdot (X - d_1) \cdot \left( \frac{X}{3} - d' \right) \quad (11)$$

con ello la tensión en el acero  $\sigma_s$  se obtiene como:

$$\sigma_s = n_c \cdot M_f \cdot \frac{(d - X)}{I_f}$$

siendo:

$$d = c - rec - \phi_3 - \phi_1/2$$

Finalmente, el cálculo de la tensión  $\sigma_{sr}$  sigue el mismo proceso, pero en lugar de usar el momento  $M_f$  se usa el momento de fisuración  $M_{fis}$ , que se puede obtener del modo siguiente. En primer lugar se determina la tensión de tracción que supone la fisuración del hormigón:

$$f_{ctm,fl} = \max\{(1,6 - c/1000)f_{ct,m}; f_{ct,m}\}$$

siendo  $f_{ctm,fl}$  el valor dado obtenido anteriormente en la expresión 23.  
La inercia homogeneizada de la sección es aproximadamente:

$$I_h = I_b + n_c \cdot \left( A_{s1} \cdot \left( d - \frac{c}{2} \right)^2 + A_{s2} \cdot \left( \frac{c}{2} - d' \right)^2 \right)$$

El momento de fisuración crítico se calcula mediante la siguiente expresión:

$$M_{fis} = \frac{f_{ctm,fl} \cdot I_h}{(c/2)} \quad (12)$$

con ello se obtiene la tensión  $\sigma_{sr}$ :

$$\sigma_{sr} = n_c \cdot M_{fis} \cdot \frac{(d - X)}{I_f}$$

Si  $M_f > M_{is}$  la sección fisurará.

#### 4.6.2 Cálculo de la flecha (art. 50.1 EHE-08)

Las limitaciones de flechas dependen del uso a que se vaya a someter a la viga. La propia Instrucción EHE-08 se remite a la normativa de referencia que para cada caso pueda existir. Se define en sus comentarios algunas limitaciones, relativas al caso de forjados de edificación y puentes de hormigón.

Para dar generalidad a las comprobaciones que siguen se ha considerado que la viga debe cumplir dos restricciones:

- Flecha activa: Bajo las acciones de uso se limita la flecha máxima a  $L_c/500$ .
- Flecha diferida: Bajo cargas permanentes la flecha total (instantánea + diferida) se limita a  $L_c/250$ .

##### 4.6.2.1 Flechas activas

La flecha activa máxima de la viga biapoyada se produce cuando la carga repartida actúa en toda la viga, y la puntual en el centro (ver figura 8). Su valor es:

$$f = \frac{5 \cdot Q_1 \cdot L_c^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e} + \frac{Q_2 \cdot L_c^3}{48 \cdot E_c \cdot I_e}$$

siendo  $E_c$  el módulo de deformación longitudinal secante del hormigón, que se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$E_c = 8500 * \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

e  $I_e$  la inercia equivalente de la sección teniendo en cuenta la fisuración (art 50.2.2.2 EHE-08):

$$I_e = \left(\frac{M_{fis}}{M_a}\right)^3 \cdot I_b + \left[1 - \left(\frac{M_{fis}}{M_a}\right)^3\right] \cdot I_f \leq I_b$$

con  $I_f$  la inercia fisurada de la expresión 24,  $M_{fis}$  es el momento de fisuración obtenido en la expresión 25,  $I_b$  la inercia bruta de la sección:

$$I_b = \frac{b \cdot c^3}{12}$$

y finalmente  $M_a$  el momento en la sección-centro luz producido por las cargas:

$$M_a = (b \cdot c \cdot 25 \cdot 10^{-6} + G + Q_1) \cdot \frac{Lc^2}{8} + Q_2 \cdot \frac{Lc}{4}$$

con todo ello se debe verificar que:

$$f_{act} \leq \frac{L_c}{500}$$

#### 4.6.2.2 Flechas diferidas

La flecha diferida se obtiene añadiendo a la flecha instantánea, ésta misma afectada por un coeficiente definido como:

$$\lambda = \frac{\xi}{1 + 50 \cdot \rho'}$$

siendo  $\xi = 2,0$  para cargas mantenidas durante 5 años o más, y  $\rho'$  la cuantía de armadura comprimida, que en este caso equivale al valor de  $\rho_2$  empleado anteriormente.

La flecha diferida por tanto será:

$$f_{dif} = (1 + \lambda) \frac{5 \cdot (b \cdot c \cdot 25 \cdot 10^{-6} + G) \cdot L_c^4}{384 \cdot E_c \cdot I_e}$$

donde  $E_c$  y  $I_e$  con los mismos empleados en el apartado anterior. Con todo ello se debe verificar que:

$$f_{dif} \leq \frac{L_c}{250}$$

### 4.6.3 Cálculo relativo al estado límite de durabilidad (Anejo 9º EHE-08)

La instrucción EHE-08 contempla un procedimiento de carácter semiprobabilista de forma análoga al adoptado para el resto de los Estados límite, donde se debe satisfacer la condición:

$$t_L > t_d$$

donde:

$t_L$  Valor estimado de la vida útil

$t_d$  Valor de cálculo de la vida útil

Se define la vida útil de cálculo, como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad:

$$t_d = \gamma_t \cdot t_g$$

siendo:

$\gamma_t$  Coeficiente de seguridad de vida útil, para cuyo valor se adoptará un valor de 1,10.

$t_g$  Vida útil de proyecto

Para nuestro trabajo elegiremos una vida útil nominal de 50 años, que corresponde a edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media, dato extraído de la Tabla 5 de la EHE-08.

Esta instrucción también nos aconseja en las tablas 37.3.2.a y 37.3.2.b la máxima relación a/c, el mínimo contenido de cemento y las resistencias mínimas recomendadas para las clases de exposición III y IV, que son:

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición			
		IIIa	IIIb	IIIc	IV
Máxima relación a/c	Armado	0,5	0,5	0,45	0,5
Mínimo contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Armado	300	325	350	325
Resistencia mínima (N/mm <sup>2</sup> )	Armado	30	30	35	30

Respecto al recubrimiento mínimo (mm) para estas clases generales de exposición, la tabla 37.2.4.1.b. de la EHE-08 nos recomienda:

Hormigón	Cemento	Vida útil de proyecto (tg)(años)	Clase general de exposición			
			IIIa	IIIb	IIIc	IV
Armado	CEMIII/A, CEMIII/B, CEMIV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%	50	25	30	35	35
		100	30	35	40	40
	Resto de cementos utilizables	50	45	40	-	-
		100	65	-	-	-

Este recubrimiento es la distancia entre la superficie exterior de la armadura (incluyendo cercos y estribos) y la superficie de hormigón más cercana.

#### 4.6.3.1 Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión

En el caso de la corrosión, tanto por carbonatación como por cloruros, el tiempo total  $t_L$  necesario para el ataque o degradación sean significativos se puede expresar como:

$$t_L = t_i + t_p \quad (13)$$

donde:

$t_i$  Período de iniciación de la corrosión, entendido como 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, tiempo de propagación de la corrosión hasta que se produzca una degradación significativa del elemento estructural.

En el caso de comprobación del Estado Límite en el caso de armaduras activas, se considerará un período de propagación,  $t_p=0$ .

En el caso de armaduras activas postesas, con trazados que sean conformes con los recubrimientos mínimos establecidos en el articulado, no suele ser necesaria la comprobación de este Estado Límite.

### 4.6.3.2 Periodo de iniciación

Tanto la carbonatación como la penetración de cloruros son procesos de difusión en el hormigón a través de sus poros, que pueden ser modelizados de acuerdo con la siguiente expresión:

$$d = K_{cl} \cdot \sqrt{t}$$

siendo:

- $d$  Profundidad de penetración del agresivo, para una edad  $t$ .  
 $K_{cl}$  Coeficiente de penetración del agresivo (cloruros).

### 4.6.3.3 Modelo de penetración de cloruros

El período de tiempo para que se produzca una concentración de cloruros  $C_{th}$  a una distancia  $d$  respecto a la superficie del hormigón puede estimarse con la siguiente expresión:

$$t = \left( \frac{d}{K_{cl}} \right)^2 \quad (14)$$

siendo:

- $d$  Profundidad, en mm.  
 $t$  Tiempo, en años.  
 $K_{cl}$  Coeficiente de penetración de cloruros, que tiene la siguiente expresión:

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

siendo:

- $\alpha$  Factor de conversión de unidades que vale 56157.  
 $D(t)$  Coeficiente de difusión efectivo de cloruros, para la edad  $t$ , expresado en  $\text{cm}^2/\text{s}$ .  
 $C_{th}$  Concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento.  
 $C_s$  Concentración de cloruros en la superficie del hormigón, expresada en % en peso de cemento. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % en peso de hormigón, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento del hormigón (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) como:

$$C_s(\% \text{ pesodecemento}) = C_s(\% \text{ pesodehormigón}) \cdot \left( \frac{2300}{\text{contendio de cemento}} \right)$$

- $C_b$  Contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del hormigón.

El coeficiente de difusión de cloruros varía con la edad del hormigón de acuerdo con la siguiente expresión:

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

donde  $D(t_0)$  es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad  $t_0$ ,  $D(t)$  el coeficiente a la edad  $t$ , y  $n$  es el factor de edad, que puede tomarse, a falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate, igual a 0,5.

Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor  $D(t_0)$  obtenido mediante ensayos específicos de difusión (en cuyo caso  $t_0$  sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la siguiente tabla A.9.4 (obtenidos para  $t_0 = 0,0767, 28$  días).

Coeficientes  $D(t_0)$  ( $\times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) (EHE-08 [74])

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

Pero en este trabajo utilizaremos una nueva tabla de coeficientes de difusión obtenida mediante la red neuronal artificial que puede verse en el apartado “5.1.1. Resultados obtenidos de la red neuronal”, denominada tabla 12.

En condiciones normales, puede adoptarse un valor de 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado límite en relación con la corrosión de las armaduras pasivas. En el caso de armaduras activas pretensas, puede adoptarse un valor límite de  $C_{th}$  de 0,3% del peso de cemento.

El valor de  $C_s$  depende de las condiciones externas, especialmente de la orografía del terreno y el régimen de vientos predominantes en la zona, en el caso de ambientes próximos a la costa. Además,  $C_s$  varía con la edad del hormigón, alcanzando su valor máximo a los 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de hormigón situadas en las proximidades, el Autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de  $C_s$  de acuerdo a la tabla A.9.4, en función de la clase general de exposición:

Concentración de cloruros en la superficie de hormigón

Clase general de exposición	IIIa		IIIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa	Hasta 500m	500m-5.000m	Cualquiera		-
$C_s$ (% peso de hormigón)	0,14	0,07	0,72	0,5	0,5

En el caso de que  $C_{th} - C_b > C_s$ , se considerará comprobado el Estado límite sin necesidad de efectuar ninguna comprobación numérica.

#### 4.6.3.4 Período de propagación

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o cuando aparecen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El período de tiempo para que se produzca puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t_p = \frac{80}{\emptyset} \cdot \frac{d}{V_{corr}} \quad (15)$$

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

A falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la tabla A.9.5 (EHE-08 [74]).

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

Clase general de exposición			$V_{corr}$ ( $\mu m/año$ )
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 del medio marino		IV	20

#### 4.6.3.5 Estimación de la vida útil debida a la corrosión de las armaduras

Por tanto, el tiempo total, suma del período de iniciación y el de propagación de la corrosión, en el caso de la corrosión por cloruros será:

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

## 4.7 Definición del problema de optimización.

En nuestro trabajo la optimización de la viga se atiende a criterios económicos y de durabilidad. Se formula como un problema matemático de optimización sujeto a restricciones, donde queremos minimizar el coste de esta y disminuir el ataque por cloruros, y por lo tanto aumentar su vida útil.

El desarrollo es el siguiente:

- Queremos encontrar:

$$x_i \in S \quad i = 1, n$$

- Para hacer mínimo:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n)$$

- Sujeto a:

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n) \leq 0 \quad j = 1, m$$

Las variables  $x_i$  corresponden a la magnitud que puede tener un valor cualquiera de los comprendidos en un conjunto y los parámetros  $p_i$  corresponden a los datos que en un conjunto de elementos sirven para identificar cada uno de ellos mediante su correspondiente valor.

Por último, para conseguir la función objetivo, la desarrollamos de la siguiente manera:

$$f(\bar{x}, \bar{p}) = \sum_{i=1, m} c_i \cdot m_i(\bar{x}, \bar{p})$$

donde  $c_i$  es el precio y  $m_i$  la medición.

## 5 Capítulo: Aplicación de las heurísticas

En este apartado se entra en profundidad a explicar las diferentes heurísticas utilizadas en este trabajo y como se desarrollan sus algoritmos. Además de discutir los datos obtenidos por la red neuronal artificial y como se diferencian de los datos de la normativa EHE-08.

### 5.1 **Redes neuronales artificiales**

Para la predicción de los datos de nuestro trabajo se ha usado Neural Network Toolbox™, que es una herramienta de Matlab que puede diseñar, entrenar, visualizar y simular redes neuronales, además apoya el aprendizaje supervisado con alimentación directa, base radial y redes dinámicas. También se puede utilizar para aplicaciones tales como ajuste de datos, reconocimiento de patrones, agrupación, predicción de series de tiempo y modelado de sistemas dinámicos y de control.

Esta herramienta usa “trainlm”, que es una función de entrenamiento de la red, que actualiza el peso de los valores y sesgo de acuerdo a la optimización de Levenberg-Marquardt. En este algoritmo la función de rendimiento tiene la forma de una suma de cuadrados como es típico en las redes feed-forward, donde la información fluye directamente de las entradas de la red a la salida o salidas.

- Algoritmo de Levenberg-Marquardt (LM)

Es un algoritmo que funciona extraordinariamente bien en la práctica. Tiene requerimientos de memoria proporcionales al cuadrado del número de pesos, por lo que no es un método apropiado para grandes redes con cientos de pesos.

Es un algoritmo de linealización, de modo que se construye sobre la hipótesis de que la función multivariada, representada globalmente por la operación de la red, es lineal. En este caso, el mínimo error puede ser hallado en una sola iteración de cálculo, este es comprobado y si el error ha disminuido, se procede a la actualización de los pesos. Si no es ese caso, se adopta un incremento (vectorial) de compromiso entre el resultado del algoritmo y la dirección de máxima pendiente. Cuanto mejor funciona la hipótesis lineal, más se refuerza esta opción en sucesivas iteraciones y lo contrario en otro caso. En cada iteración se actualiza la fórmula:

$$\Delta x = -(Z(x)^T \cdot Z(x) + \lambda I)^{-1} \cdot Z(x)^T \cdot \varepsilon(x)$$

Donde  $\varepsilon$  es el vector de los errores de entrenamiento y  $Z$  es la matriz de derivadas parciales de dichos errores respecto de los pesos:

$$(Z)_{ni} \equiv \frac{\delta \varepsilon^n}{\delta x_i}$$

En la expresión anterior, el primer término representa el incremento basado en la hipótesis lineal, y el segundo, un salto en la dirección del gradiente cambiado de signo. El parámetro  $\lambda$  es un parámetro de control que va variando a lo largo de las iteraciones, y determina la importancia de cada uno de las dos componentes. En cada paso de cálculo donde nos aproximemos al mínimo con la hipótesis lineal, el valor de  $\lambda$  disminuye consecuentemente, de manera que en la siguiente iteración se refuerza el avance basado en la hipótesis de linealidad (García Bartual, R. [56]).

El método de ajuste de Levenberg-Marquardt es en realidad una combinación de dos métodos de minimización: el método de descenso de gradiente y el método de Gauss-Newton. En el primero, la suma de los errores cuadráticos se reduce mediante la actualización de los parámetros en la dirección de la mayor reducción del objetivo de mínimos cuadrados. En el segundo, la función objetivo es aproximadamente cuadrática en los parámetros cerca de la solución óptima.

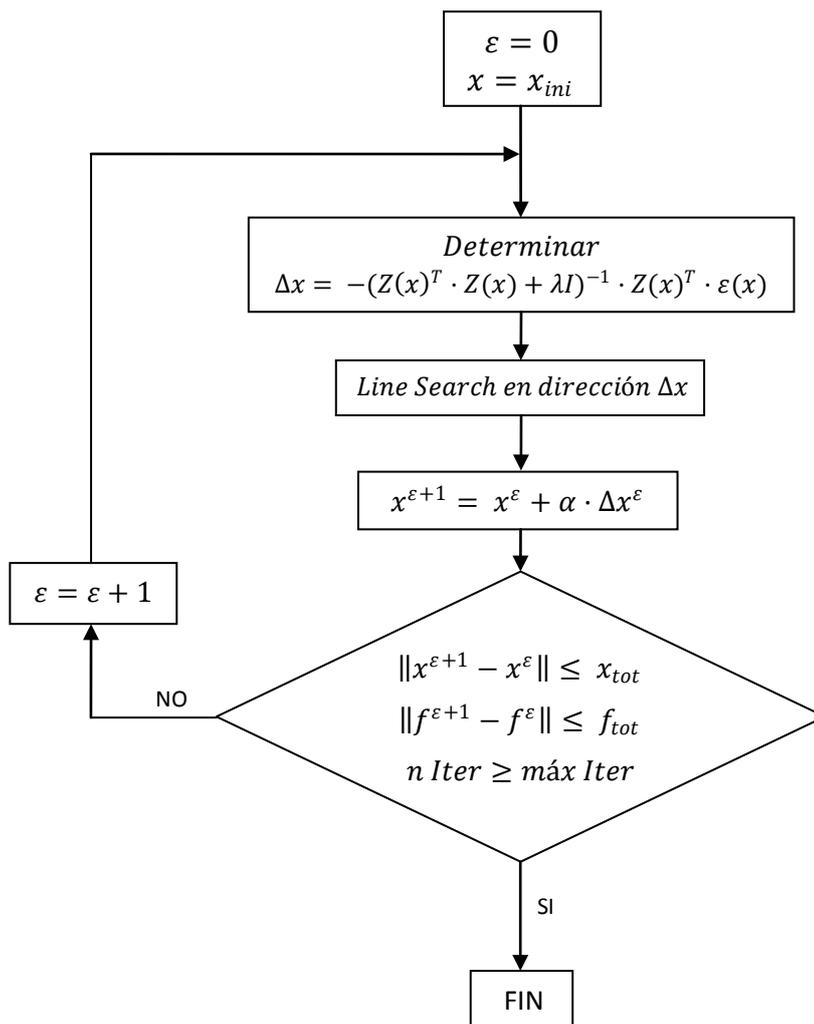


Figura 12: El diagrama de flujo del método Levenberg-Marquardt

- Perceptrón multicapa (MultiLayer Perceptron (MLP))

Este tipo de red es la que usa la herramienta de Matlab y se compone, generalmente, de varias capas de nodos. La primera capa es la de entrada, donde se recibe la información externa. Es transparente y sirve sólo para proveer de información a la red. La última, es la capa de salida, donde se obtiene el resultado del problema. Los nodos entre capas adyacentes, en general, se conectan totalmente de una capa inferior a una superior. La figura 13 es un ejemplo de una *MLP* totalmente conectada con dos capas ocultas.

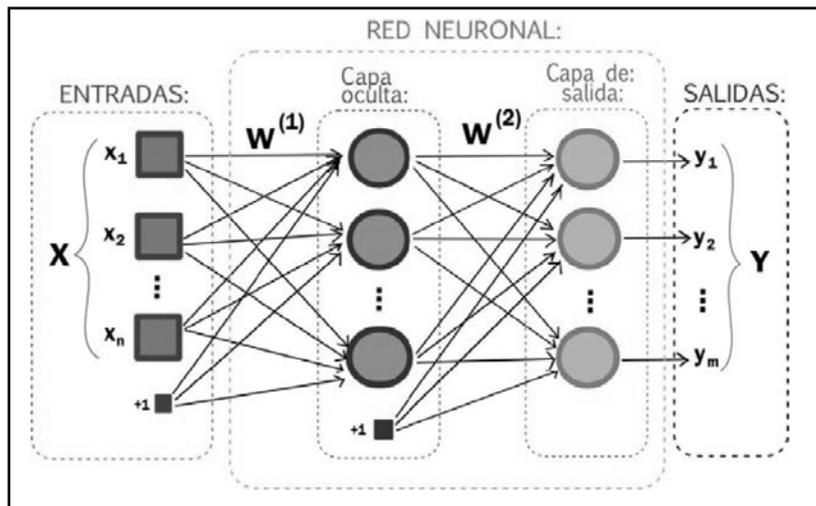


Figura 13: Estructura del Multi Layer Perceptron

El número de capas ocultas y la cantidad de nodos en cada capa se determinan usualmente por el método de prueba y error. Los nodos entre las capas adyacentes están totalmente conectados y se le asigna a cada conexión un peso sináptico que representa la fuerza relativa del nexo entre dos nodos o neuronas.

Antes de que una red desarrolle una determinada tarea, debe ser entrenada para hacerla. El conocimiento almacenado en una red está en las conexiones y nodos en forma de pesos y umbrales. Es precisamente a través de las conexiones, como una red puede realizar mapeos no lineales y complejos de los nodos de entrada a los nodos de salida. En este tipo de redes el entrenamiento es supervisado, es decir que la respuesta deseada de la red para cada conjunto de entradas siempre está disponible.

Los datos de entrada utilizados para el entrenamiento se presentan en forma de vectores, donde cada elemento del vector de entrada corresponde a un nodo de entrada a la red. Por lo tanto, la cantidad de nodos de entrada a la red es igual a la dimensión del vector de entrada. Para un problema de predicción, el número de nodos de entrada está bien definido y corresponde a la cantidad de variables independientes asociadas al problema. El total de datos disponibles se divide generalmente en tres partes:

- *Serie de calibración:* Para determinar los pesos de las conexiones y los umbrales de los nodos.
- *Serie de validación:* Mide la habilidad de generalización de la red.
- *Serie de verificación:* Es opcional y se utiliza para verificar que la red no se sobreentrene.

El proceso de entrenamiento es el siguiente: Primero, se introducen en los nodos de entrada de la red, los ejemplos de la serie de entrenamiento. Los valores de activación de los nodos de entrada se ponderan y se acumulan en cada nodo de la primera capa oculta. El total se transforma con la función de activación de la capa. Estos valores de activación, se convierten luego en las entradas a los nodos de la segunda capa oculta, y se repite este proceso hasta obtener los valores de activación de los nodos de salida.

Este tipo de arquitectura es estática, la red no tiene memoria para almacenar la información contextual del pasado. Por lo tanto, las entradas a la red deben contener toda la información contextual necesaria para representar las salidas.

Los algoritmos de entrenamiento suelen sobreentrenar las redes, por lo tanto, se deben utilizar métodos como el de parada temprana (*early stop*) para poder identificar estos problemas de entrenamiento.

### 5.1.1 Resultados obtenidos de la red neuronal

Una vez realizadas las pruebas con la red neuronal obtenemos los datos de la tabla 12, donde se muestran los coeficientes de difusión a 1 año para los diferentes cementos y sus dosificaciones, salvo para el CEM II/A-D y CEM II/B-M que directamente se ha dejado como valor el promedio de los datos, porque al no tener más datos de diferentes dosificaciones no resulta adecuado realizar pruebas.

		Tabla 12: Coeficientes de difusión $D(t_0)$ [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ] ( $t_0$ a 1 año)							
Tipo de cemento	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	
CEM I	1,2	2,3	3,8	6,6	10,3	13,5	17,6	24,0	
CEM II/A-D	-	-	1,7	-	-	-	-	-	
CEM II/A-V	0,4	0,5	1,1	2,4	4,4	6,9	7,8	8,3	
CEM II/B-V	0,2	0,5	1,0	1,8	2,4	2,8	3,4	4,5	
CEM II/A-W	-	-	1,1	1,5	2,0	2,5	2,9	3,2	
CEM II/B-M	1,2	-	-	-	-	-	-	-	
CEM III	0,3	0,5	0,8	1,5	2,3	2,8	3,2	3,5	
CEM IV	1,2	1,5	2,5	4,2	5,3	5,7	6,2	6,9	

Las siguientes gráficas muestran los datos de la anterior tabla 12, donde se ve cómo evolucionan los coeficientes de difusión a medida que la dosificación es más alta; en la primera se muestran los mismos cementos que hay en la EHE-08 y en la segunda los cementos que se han añadido nuevos, gracias a que se han podido obtener bastantes datos de los diferentes artículos. Cabe destacar que los coeficientes de correlación obtenidos para las curvas representadas son iguales o superiores a 0.947.

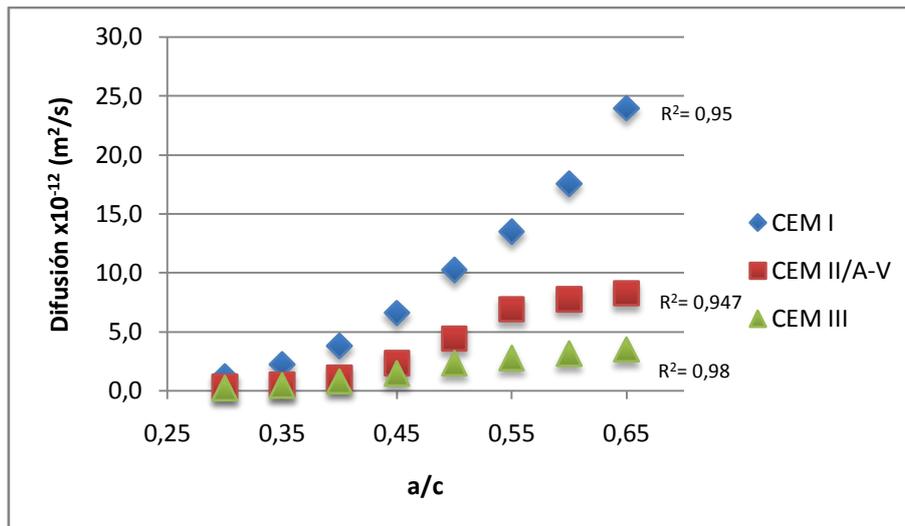


Figura 14: Coeficientes de difusión  $D(t_0)$  [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ] ( $t_0$  a 1 año).1

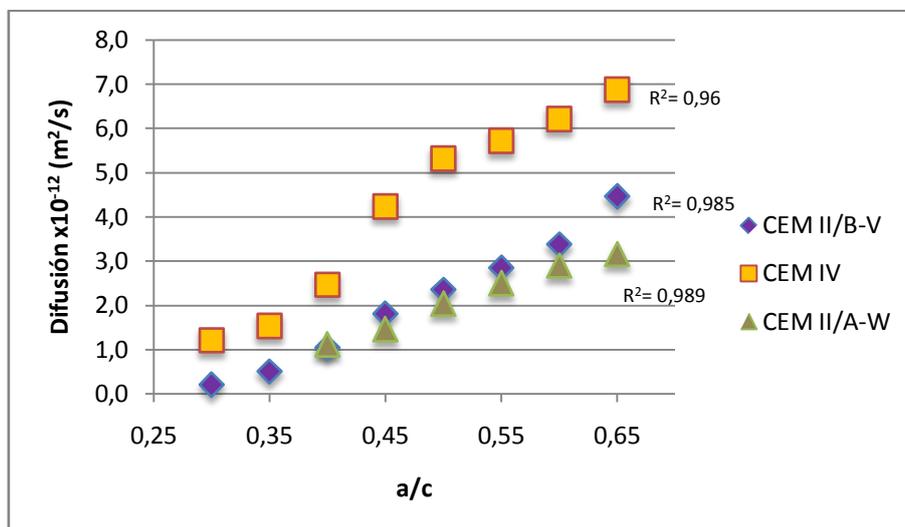


Figura 15: Coeficientes de difusión  $D(t_0)$  [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ] ( $t_0$  a 1 año).2

### 5.1.2 Diferencia de datos entre la EHE-08 y los obtenidos

Una de las diferencias de los datos obtenidos en este trabajo y los de la EHE-08, como se ha comentado anteriormente, es que los valores de la EHE-08 tienen como  $t_0$  el valor de 0,0767 (28 días) y los datos que nosotros hemos obtenido mediante la red neuronal tiene como  $t_0$  el valor de 1 año, que es la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo. De ahí que los resultados sean más bajos respecto a los de la normativa, ya que el avance de los cloruros se reduce en función del tiempo y a medida que avanzan en profundidad, además debemos tener en cuenta que la normativa EHE-08 dice que el máximo se alcanza a los 10 años.

A continuación se muestran las comparativas para los cementos I, II/A-V y III. En la figura 16 referente a los datos del cemento tipo I, vemos como los datos obtenidos por

la red neuronal siguen la misma tendencia que los de la normativa pero con un valor inferior.

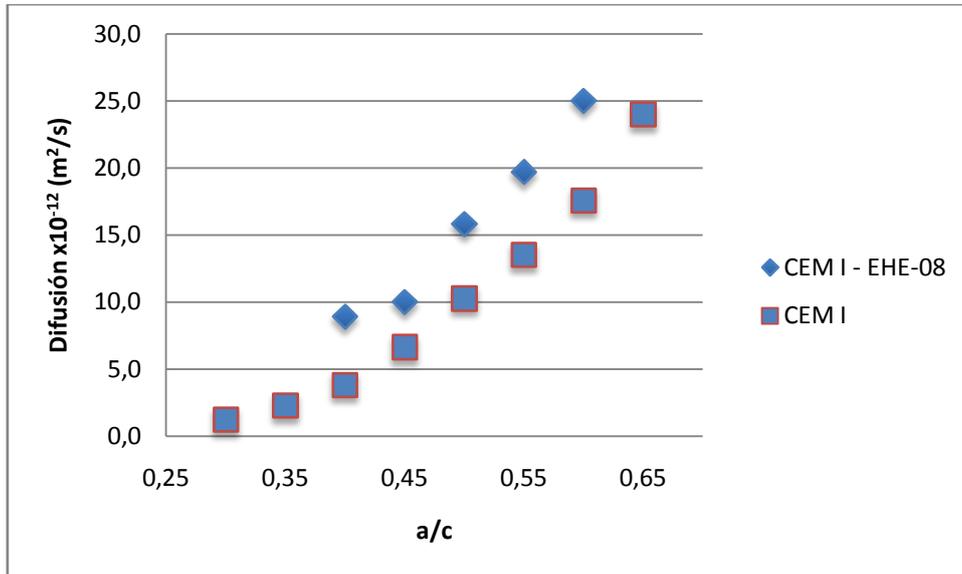


Figura 16: Comparación de los CEM I

Lo que ocurre con el cemento tipo II/A-V es que para los valores de dosificación inferiores a 0,55 sigue una tendencia parecida a los de la normativa, pero una vez que se sobrepasa esa dosificación los resultados tienden a aumentar pero de manera menos pronunciada a como lo hacen los datos de la normativa. También se observa que la diferencia de los datos encontrada es la mayor para los tres tipos de cementos comparados (Figura 17).

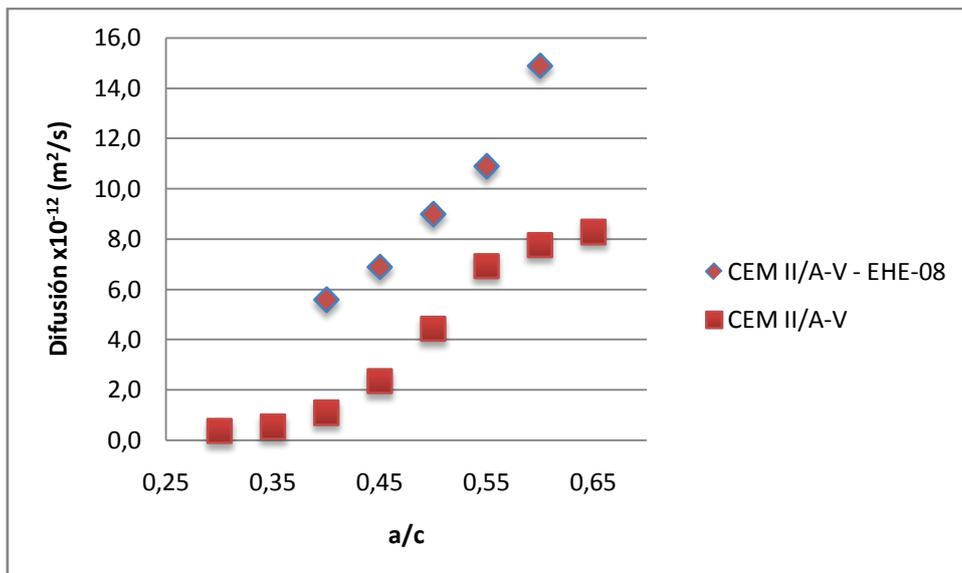


Figura 17: Comparación de los CEM II/A-V

Por último, en la figura 18 referente al cemento tipo III, observamos que la diferencia entre los valores de la normativa y los valores obtenidos es muy pequeña, siendo ligeramente inferior los valores obtenidos, y también se observa que la tendencia es la misma a lo largo de las diferentes dosificaciones.

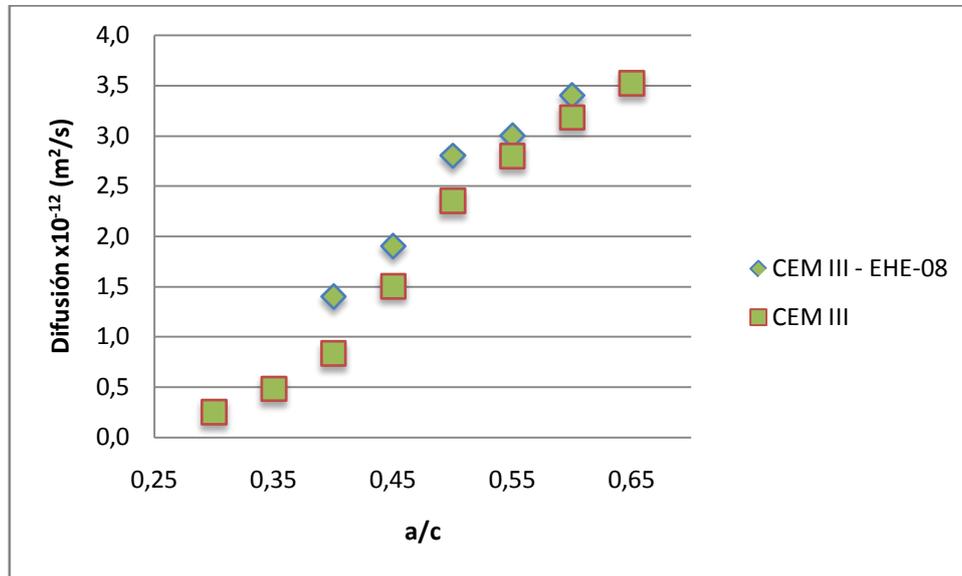


Figura 18: Comparación de los CEM III

## 5.2 Descripción del algoritmo genético

Los algoritmos genéticos (*genetic algorithms* (GA)) son poblacionales y están inspirados en la selección natural basada en la evolución de las especies. Parte con la hipótesis de que la evolución biológica sólo considera la información de la última generación. Para codificar los cromosomas, se ha aplicado la representación natural, en la que cada variable es representada por un número. Esta codificación permite que no se pierda información en el problema, ya que todas las posiciones de las variables tienen definido un valor, mientras que la codificación binaria, a veces, no se adapta al número de posibles valores de una variable dando al sistema más información de la necesaria. El cruzamiento se realiza partiendo la cadena de genes por dos puntos. La mutación se efectúa empezando con probabilidades mayores al inicio del algoritmo, que permiten una mayor exploración del espacio de soluciones, y menores conforme el proceso de cálculo avanza, intensificando la búsqueda centrada en las mejores soluciones. Se realizan ejecuciones con elitismo, de manera que una copia del mejor individuo de una generación se encuentre en la posterior. La Figura 19 muestra el diagrama de flujo básico de una ejecución del GA.

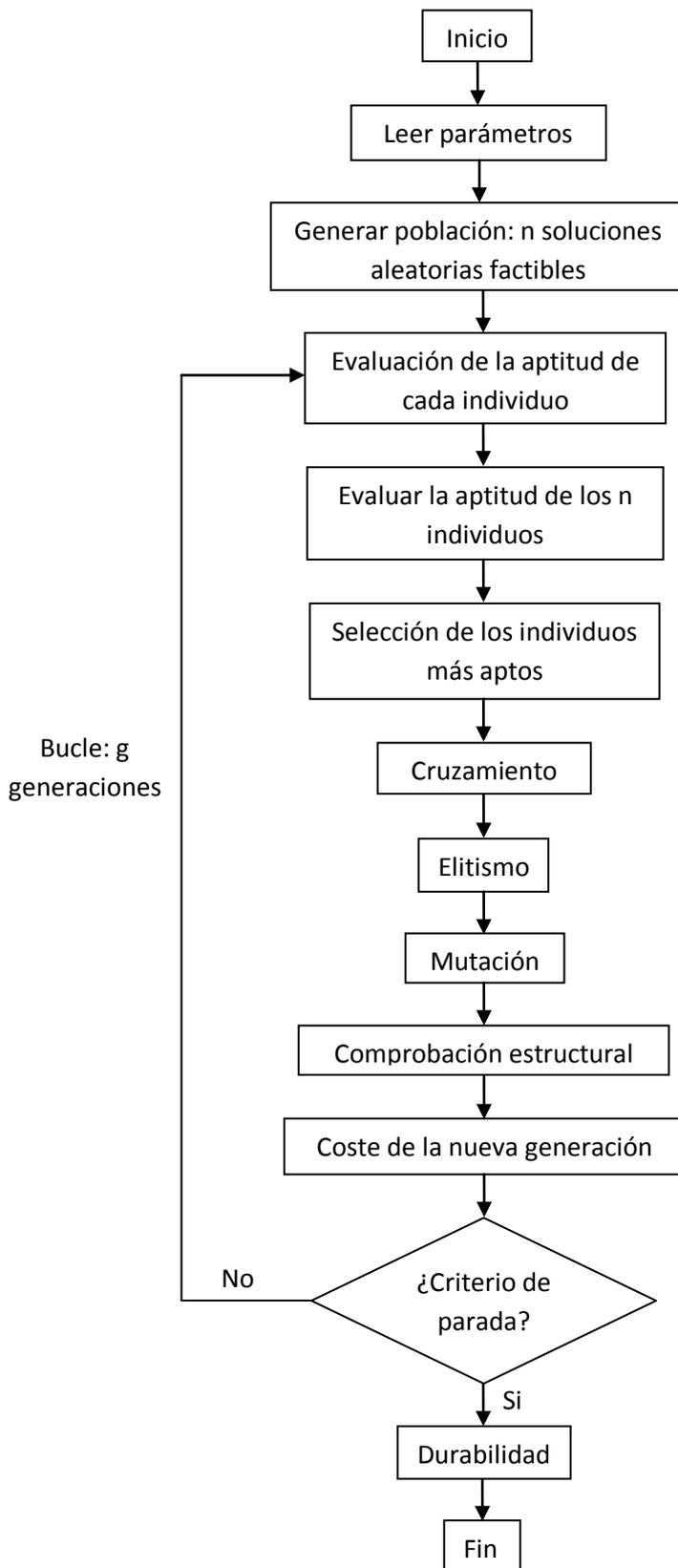


Figura 19: Diagrama de flujo del algoritmo genético

Se empieza buscando un número de soluciones factibles de manera aleatoria igual al tamaño de la población. A partir de la segunda generación las soluciones se forman mediante cruzamientos y mutaciones de la población, previa selección de éstos mediante una determinada regla. Para ejecutar el algoritmo se deben definir y ajustar los diferentes parámetros del mismo:

- Terminología genética

El modo original utilizado para codificar una solución fue “el sistema binario”, según el cual el cromosoma es la cadena de datos que contiene la información de una de las variables que definen una solución del problema; a cada posición de la cadena se le llama gen y, a su vez, un alelo es el valor que adopta cada gen, bien sea “0” ó “1”. Pero como se ha comentado anteriormente, en este trabajo se ha utilizado “la representación natural”, donde a cada variable (cromosoma) se le asignan diferentes posiciones, cada una de las cuales significa un valor determinado; esas posiciones son los genes y estos tienen un único alelo que es un número natural. En la Figura 20 se puede ver de manera esquemática:

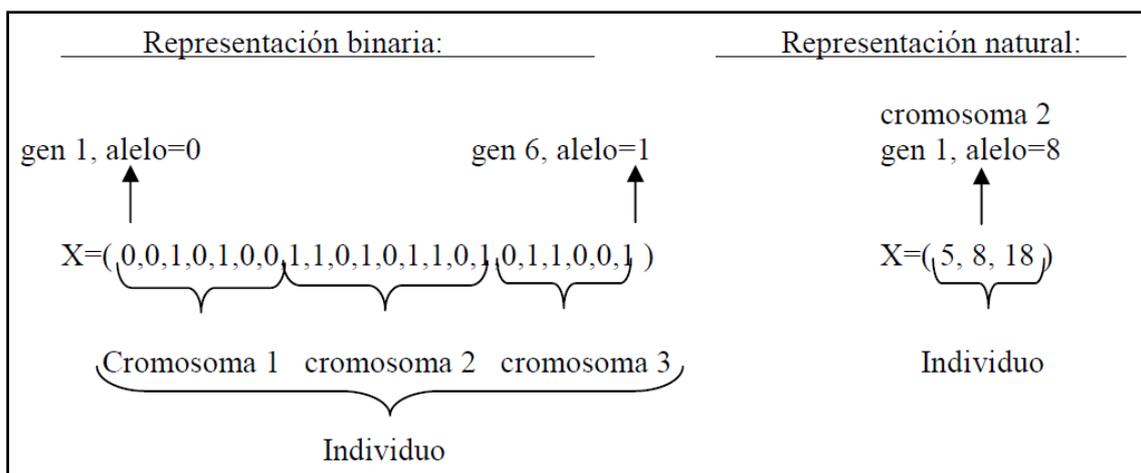


Figura 20: Representación de soluciones en GA

- Aptitud de los individuos

Una vez obtenida una generación de individuos se debe evaluar su aptitud. Para ello hay que diferenciar entre los que cumplen todos los estados límites de servicio y último y los que no satisfacen estas restricciones de la estructura, a los cuales hay que penalizarlos incrementando el valor de su coste o eliminarlos de la población.

- Evaluación de la Aptitud de un individuo

Después se evalúan los costes de todos los individuos, se escalan para ayudar a que el algoritmo pueda converger teniendo en cuenta que hay que premiar a las mejores soluciones.

- Operador “Selección”

El proceso de selección permite dirigir la búsqueda dentro del espacio de soluciones. La selección genera, a partir de una población de partida, otra intermedia reproduciendo con un mayor número de copias a los individuos más aptos y eliminando o asignando un menor número de copias a los menos aptos. Este operador no produce soluciones nuevas, sino que determina cuáles son los individuos para el cruzamiento y en definitiva los que sus cualidades van a permanecer en la generación futura.

El método de selección utilizado es el “método de la ruleta” mostrado en la Figura 21. La probabilidad de selección de un individuo será proporcional a su aptitud.

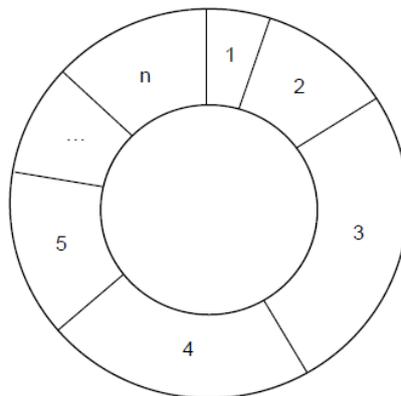


Figura 21: Ruleta empleada en la selección de individuos

- Operador “Cruzamiento”

Este operador permite el intercambio de información entre dos padres produciendo descendientes (hijos) que tendrán las cualidades de sus antecesores. La idea es que, intercambiando información de dos individuos muy aptos de la población, el resultante sea otro individuo de igual o mejor calidad. En el algoritmo de este trabajo se ha utilizado el cruzamiento de dos puntos, la figura 22 muestra el esquema con el modo de realizar el cruzamiento.

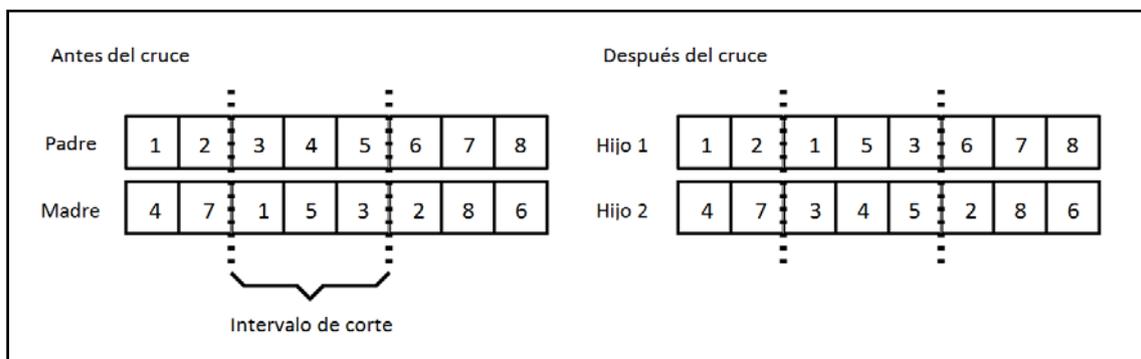


Figura 22: Cruzamiento por dos puntos

- Operador “Mutación”

La mutación es la modificación espontánea de la información genética, que puede ser debida a diversas causas como evolución de las especies, interacción con el medio ambiente, etc. En la “representación natural” si se produce mutación se modifica el valor de la posición de la variable considerada, aumentando o disminuyendo esta posición en uno. En nuestro caso, cuando nuestro programa realiza la mutación de algunas soluciones y resulta que no mejora la solución anterior, se pone en marcha un algoritmo de búsqueda por gradiente para mutar las soluciones, una variable cambia en un movimiento con una probabilidad y busca en el entorno de soluciones una solución mejor, después se comprueba y si es factible se guarda.

### **5.3 Descripción del algoritmo de búsqueda por gradiente (Descent local search (DLS))**

Como se ha comentado en el apartado anterior, una vez realizada la mutación en el algoritmo genético y al no conseguir mejores soluciones, el algoritmo DLS selecciona la mejor solución factible hasta el momento y la modifica iterativamente mediante un mecanismo apropiado. Para la aplicación de este método, es necesario seleccionar la variación (movimiento) que forme la nueva solución de trabajo, en este caso será la modificación del valor de la posición de una variable. Ese mecanismo definirá el entorno de la solución y, por lo tanto, se entenderá como entorno de una solución todas las posibles soluciones que son accesibles desde la anterior. Si tras el movimiento la nueva solución mejora a la anterior se procede a la comprobación estructural y, si esta es factible, la nueva solución la reemplazará. Este proceso continúa hasta que no se encuentra ninguna solución factible con precio inferior a la anterior después de un número determinado de intentos. Uno de los inconvenientes del DLS es que no tiene capacidad de escapar de óptimos locales, por lo que es probable que la convergencia sea prematura, a pesar de ello, no dará tiempos de ejecución cortos y no garantiza que el óptimo encontrado sea el global. Una manera de mejorar el procedimiento es ejecutar el DLS varias veces, partiendo de diferentes soluciones iniciales aleatorias y así obtener mayor número de óptimos locales, con la esperanza de que el mejor de ellos sea el óptimo global. La figura 23 muestra el diagrama de flujo básico de una ejecución del DLS.

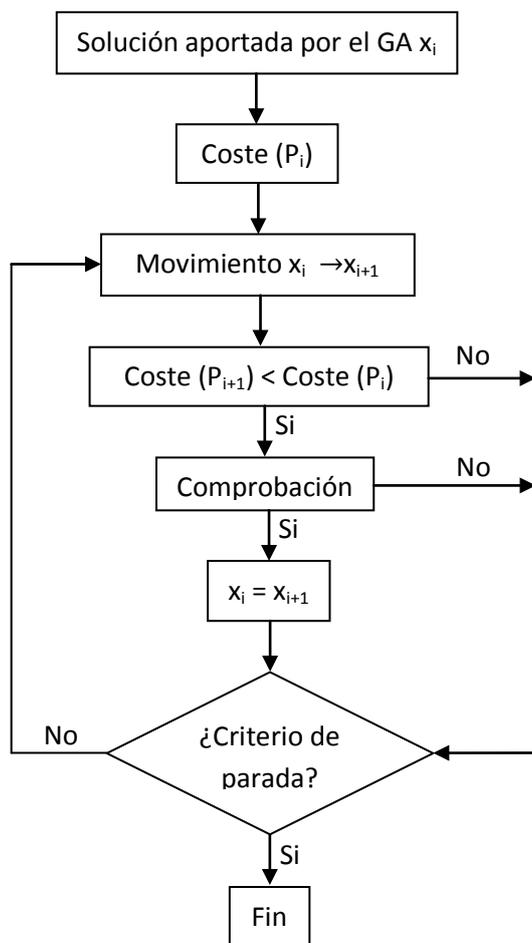


Figura 23: Diagrama de flujo de un DLS

## 6 Capítulo. Estudio paramétrico

### 6.1 Recubrimientos

Respecto a los recubrimientos hay una serie de inconvenientes que hay que reflejar, debido a que la normativa nos prescribe unos recubrimientos mínimos que para ciertas dosificaciones no nos cumplen el estado límite de durabilidad.

- En el cemento tipo I y ambiente IIIa (hasta 500m) la dosificación 0.5 necesita al menos un  $rec_{min}$  de 50mm para que se cumpla la comprobación de  $t_L > t_d$ , cuando la normativa nos prescribe 45mm.
- En el cemento tipo II/B-V y ambiente IIIa (hasta 500m) las dosificaciones 0.45 y 0.5 necesitan al menos un  $rec_{min}$  de 30 y 35mm, en el ambiente IIIc las dosificaciones 0.4 y 0.45 necesitan  $rec_{min}$  de 40 y 50mm y en el ambiente IV las dosificaciones 0.45 y 0.5 necesitan un  $rec_{min}$  de 45 y 50mm respectivamente para cumplir la comprobación de estado límite de durabilidad, cuando la normativa nos prescribe 25mm en el primer ambiente y 35mm en los otros dos.
- En el cemento tipo III y ambiente IIIa (hasta 500m) las dosificaciones 0.45 y 0.5 necesitan al menos un  $rec_{min}$  de 30 y 35mm, en el ambiente IIIc la dosificación 0.45 necesita al menos un  $rec_{min}$  de 45mm y en el ambiente IV las dosificaciones 0.45 y 0.5 necesitan un  $rec_{min}$  de 40 y 50mm, respectivamente, para cumplir la comprobación, cuando la normativa nos prescribe 25mm en el primer ambiente y 35mm en los otros dos.

- En el cemento tipo IV y ambiente IIIa (hasta 500m) las dosificaciones 0.35, 0.40, 0.45 y 0.5 necesitan al menos un  $rec_{min}$  de 30, 35, 45 y 50mm; en el ambiente IIIc las dosificaciones 0.3, 0.35, 0.4 y 0.45 necesitan al menos un  $rec_{min}$  de 45, 50, 60 y 75mm, y en el ambiente IV las dosificaciones de 0.3, 0.35, 0.4, 0.45 y 0.5 necesitan un  $rec_{min}$  de 40, 45, 50, 60 y 65mm respectivamente para cumplir la comprobación. La normativa nos prescribe 25mm en el primer ambiente y 35mm en los otros dos.

## 6.2 Variables

En los resultados obtenidos del algoritmo genético hemos procedido a sacar la moda de las variables para ver cuáles son las que más se repiten a lo largo de todas las pruebas realizadas. Se puede observar que la base de la viga que más se repite está en torno a los 325mm, el canto 445mm, la resistencia del hormigón más repetida ha sido la de 35 MPa, el diámetro de la armadura de la capa inferior de 25mm, el de la armadura de la capa superior de 8mm y el diámetro de la armadura de cortante de 8mm. Respecto al número de barras de la capa inferior y superior el dato más repetido es 4 para la capa inferior y 2 para la capa superior. Por último, la separación entre los cercos de cortante más repetida es de 275mm.

b (mm)	c (mm)	H ( $f_{ck}$ MPa)	$D_1$ (mm)	$D_2$ (mm)	$D_3$ (mm)	$n_1$	$n_2$	sep <sub>3</sub> (mm)
325	445	35	25	8	8	4	2	275

## 6.3 Tiempo total necesario para un ataque significativo

De los resultados obtenidos en las diferentes pruebas observamos que para el cemento tipo I, en los ambientes IIIa2 (entre 500 y 5000m) y IIIb, el tiempo total estimado de vida útil suele estar por encima del tiempo de cálculo, salvo para la dosificación 0.5 en el ambiente IIIa1 que el valor está algo más ajustado y como se ha mencionado en el “apartado 6.1”, el recubrimiento tiene que ser aumentado para cumplir el estado límite de durabilidad.

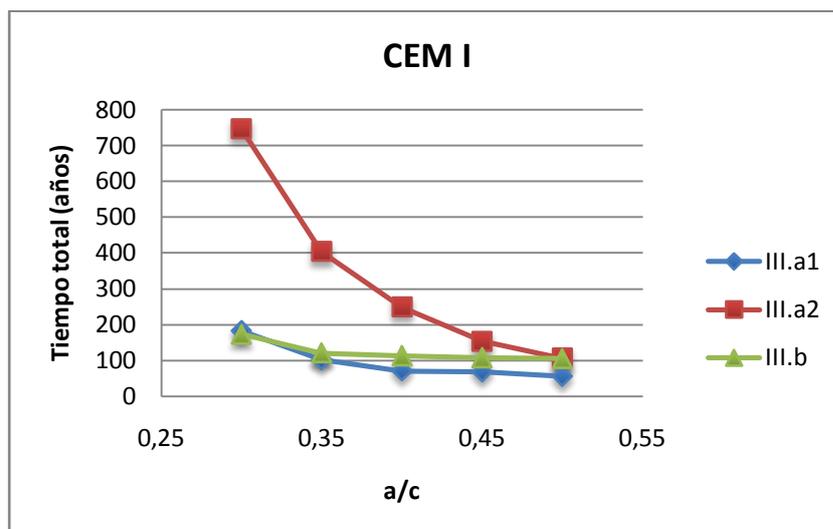


Figura 24: Resultados  $T_L$  para CEM I

En la siguiente figura podemos observar mejor como se produce un descenso a medida que la dosificación es mayor, en estructuras sumergidas (IIIb) el tiempo total tiende a estabilizarse entre 100 y 120 años, pero en estructuras cercanas a la costa (IIIa1 hasta 500m) el tiempo se reduce bastante.

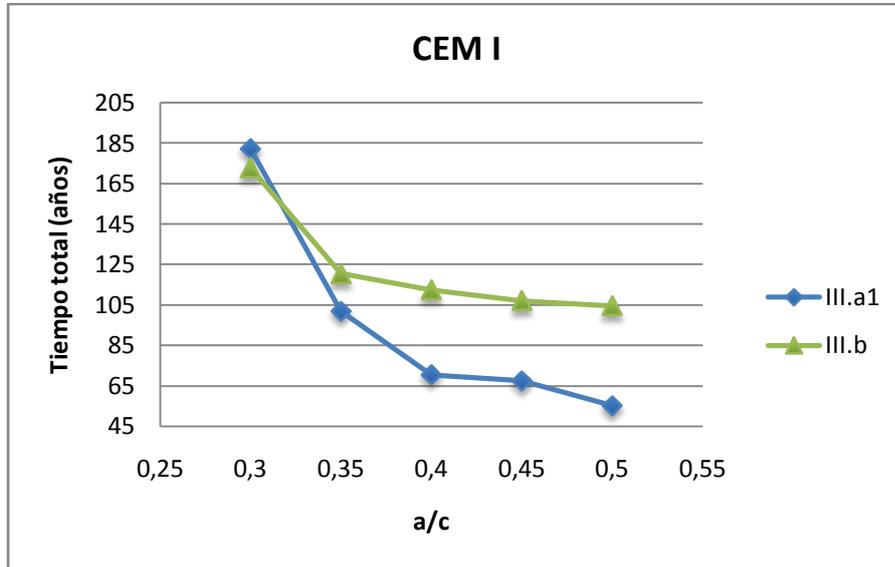


Figura 25: Ampliación de los resultados  $T_L$  para CEM I

Para el cemento tipo II/A-V el tiempo total estimado de vida útil para todos los ambientes está claramente por encima del tiempo de cálculo en todos los casos.

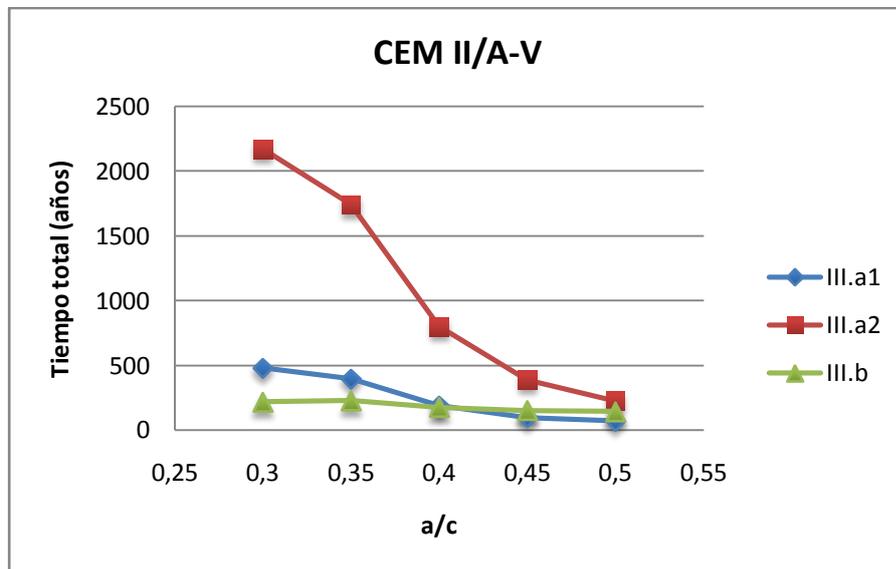


Figura 26: Resultados  $T_L$  para CEM II/A-V

En estructuras sumergidas (IIIb) el tiempo total permanece entre 140 y 220 años mientras que en estructuras cercanas a la costa tiende a descender a medida que aumentamos la dosificación pero cumpliendo sobradamente el estado límite de durabilidad.

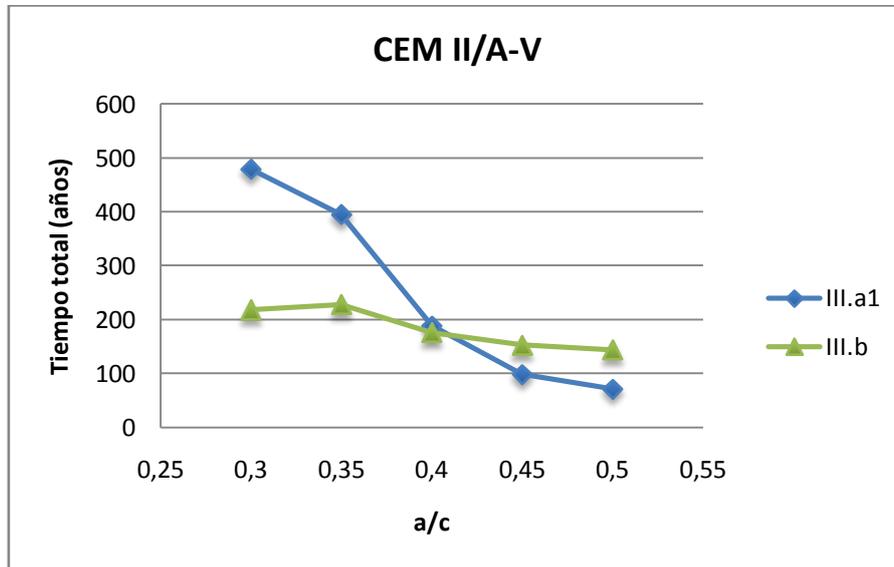


Figura 27: Ampliación de los resultados  $T_L$  para CEM II/A-V

Para el cemento tipo II/B-V, en los ambientes IIIa, IIIb, IIIc y IV, el tiempo total estimado de vida útil está por encima del tiempo de cálculo. Pero para las dosificaciones de 0,45 y 0,5 en los ambientes IIIa1, IIIc y IV los tiempos de vida útil suelen estar ajustados al tiempo de cálculo. Como se ha mencionado en el “apartado 6.1” el recubrimiento para estas dosificaciones también ha tenido que ser aumentado para cumplir el estado límite de durabilidad.

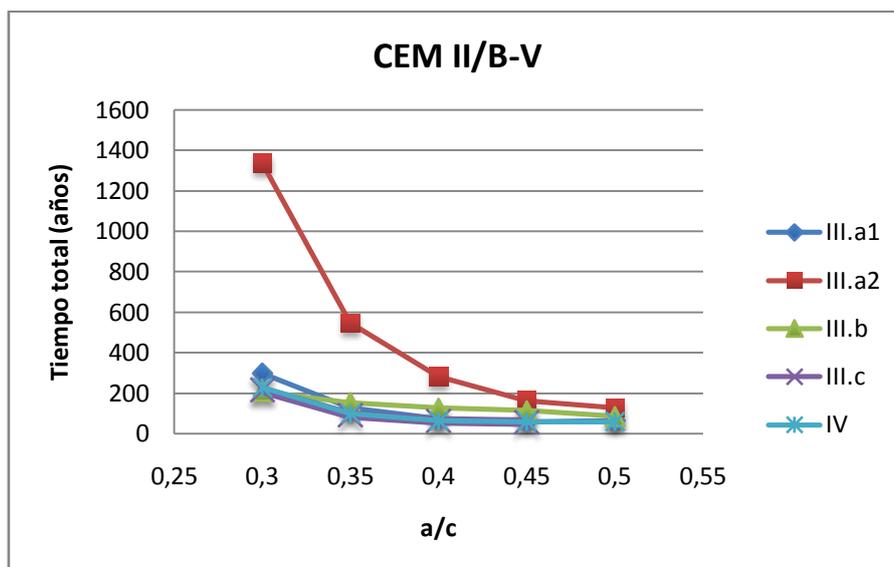


Figura 28: Resultados  $T_L$  para CEM II/B-V

En la siguiente figura se observa mejor como los ambientes IIIa1, IIIc (marea) y IV (distinto al origen marino) siguen la misma tendencia y los valores están entre 60 y 100 años para dosificaciones más comunes como 0,4, 0,45 y 0,5. Mientras que en estructuras sumergidas (IIIb) la tendencia que tiene es a disminuir a medida que aumentamos la dosificación, comportamiento distinto a los anteriores tipos de cementos donde los valores se estabilizan.

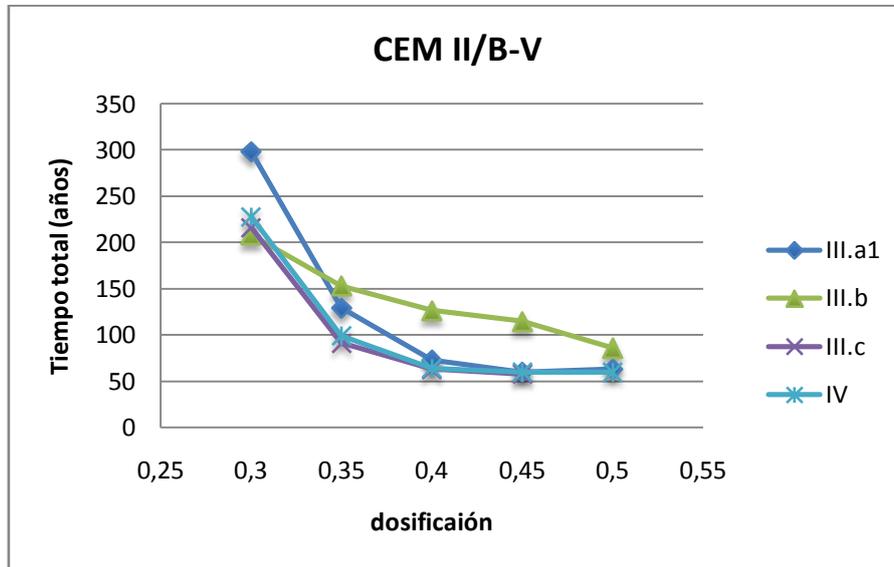


Figura 29: Ampliación de los resultados  $T_L$  para CEM II/B-V

Para el cemento tipo II/A-W, en los ambientes IIIa y IIIb, el tiempo total estimado de vida útil también está claramente por encima del tiempo de cálculo en todos los casos, como ocurre con el cemento tipo II/A-V. En estructuras alejadas de la costa el tiempo es muy superior al resto de ambientes que el tiempo total está entre 100 y 200 años.

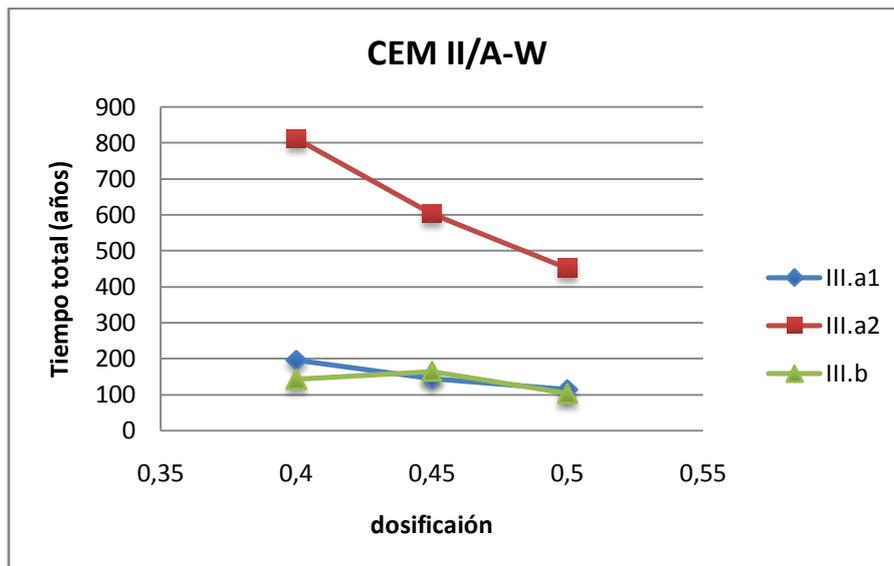


Figura 30: Resultados  $T_L$  para CEM II/A-W

Para el cemento tipo III, en los ambientes IIIa, IIIb, IIIc y IV, el tiempo total estimado de vida útil está por encima del tiempo de cálculo. Pero para las dosificaciones de 0,45 y 0,5 en los ambientes IIIa1, IIIc y IV los tiempos de vida útil suelen estar ajustados al tiempo de cálculo. Como se ha mencionado en el “apartado 6.1” el recubrimiento para estas dosificaciones también ha tenido que ser aumentado para cumplir el estado límite de durabilidad.

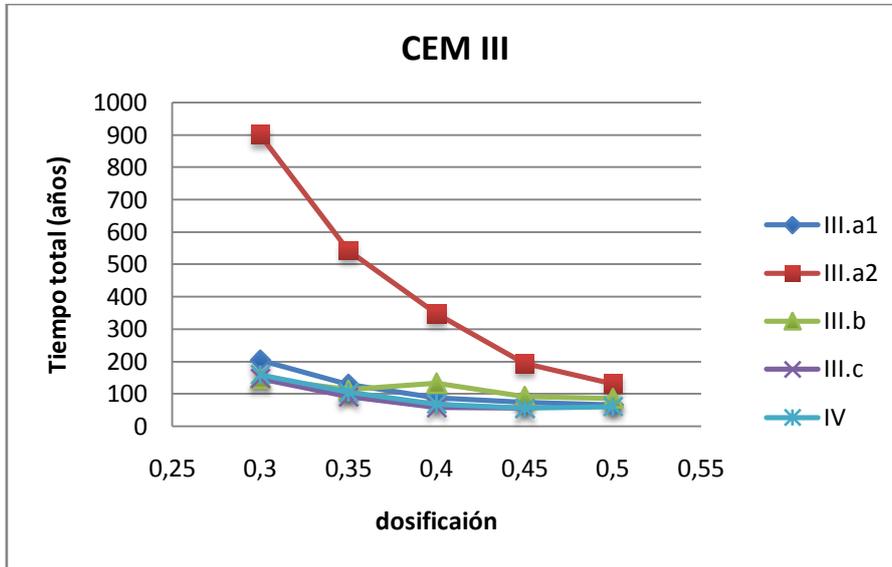


Figura 31: Resultados  $T_L$  para CEM III

En la siguiente figura se observa mejor como los ambientes IIIa1, IIIc y IV siguen la misma tendencia y los valores están entre 55 y 90 años para dosificaciones más comunes como 0,4, 0,45 y 0,5, mientras que en estructuras sumergidas la tendencia que tiene es a disminuir a medida que aumentamos la dosificación. Estos comportamientos también los hemos visto en el CEM II/B-V.

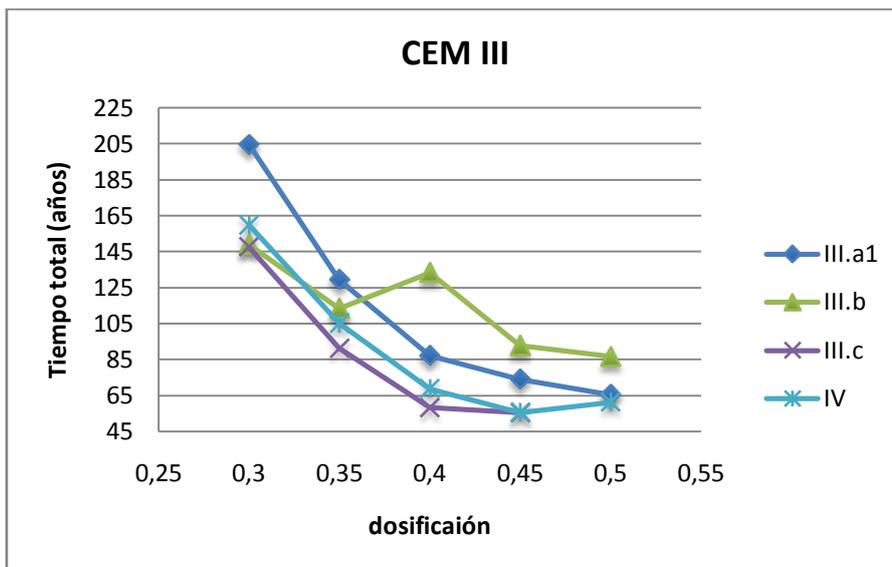


Figura 32: Ampliación de los resultados  $T_L$  para CEM III

Para el cemento tipo IV, en los ambientes IIIa, IIIb, IIIc y IV, el tiempo total estimado de vida útil suele estar ajustado para la mayoría de las dosificaciones, desde 0,3 a 0,5, excepto para los ambientes IIIa2 y IIIc que el tiempo total estimado de vida útil está claramente por encima del tiempo de cálculo. Y como ocurre en algunos casos el recubrimiento para algunas dosificaciones también ha tenido que ser aumentado para cumplir el estado límite de durabilidad.

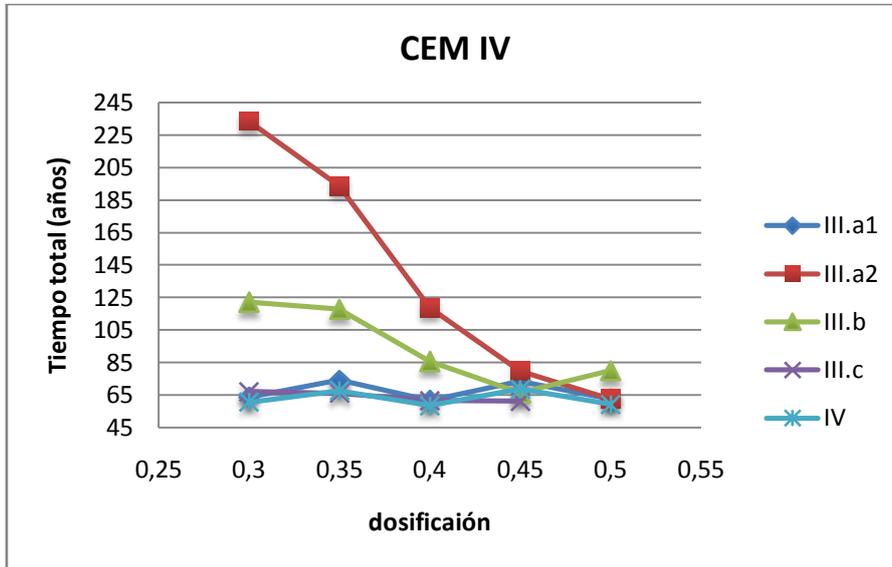


Figura 33: Resultados  $T_L$  para CEM IV

En la siguiente figura se observa como en estructuras sumergidas el tiempo total disminuye drásticamente a medida que aumentamos la dosificación. Respecto a los ambientes IIIa1, IIIc y IV vemos como el tiempo total se mantiene entre 60 y 75 años a lo largo de las dosificaciones. Destacar que las fluctuaciones producidas son a causa de la optimización, que nos proporciona diámetros distintos y de ahí la variación.

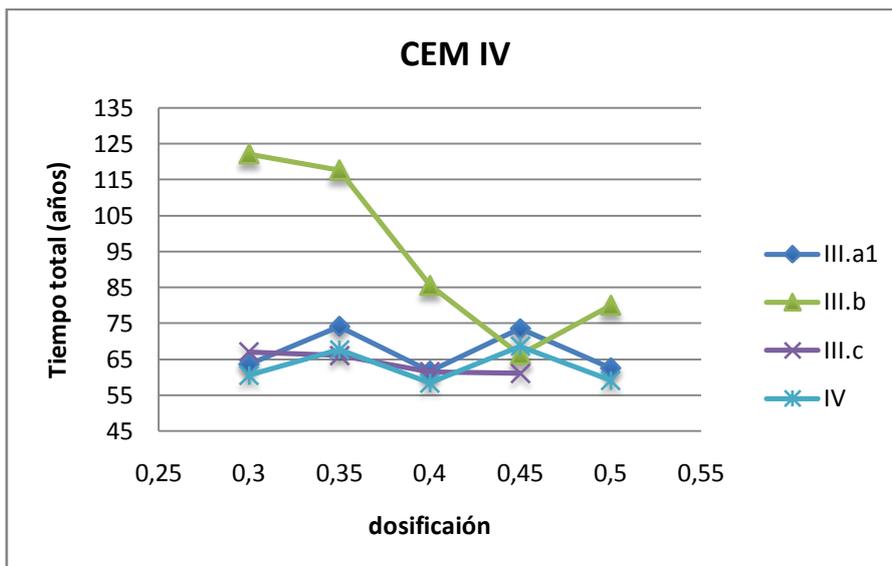


Figura 34: Ampliación de los resultados  $T_L$  para CEM IV

Por último, destacar que el mejor comportamiento encontrado en los ambientes IIIa1, IIIa2 y IIIb es el del cemento tipo II/A-V, cemento adicionado con cenizas volantes con un porcentaje de sustitución entre un 6 y 20% de cemento, donde supera el tiempo total en todas las dosificaciones a los demás tipos de cementos. En cambio, para los ambientes IIIc y IV, el mejor comportamiento lo tiene el CEM II/B-V, cemento adicionado con cenizas volantes con un porcentaje de sustitución de cemento entre 21 y 35%.

De los cementos tipo I, II/A-V y II/A-W no se han realizado pruebas para los ambientes IIIc y IV porque la normativa EHE-08 en el capítulo 7 tabla 37.2.4.1.b, nos dice que para estas situaciones obligarían a recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. Hay que destacar también que para el cemento tipo IV en estas exposiciones, se ha tenido que recurrir a estos recubrimientos excesivos para que cumpla el estado límite de durabilidad, mientras que la normativa nos dice unos recubrimientos mínimos que no cumplen para este estado límite.

Todos los datos recopilados del algoritmo genético pueden ser consultados en el ANEXO 3, donde están los resultados para cada tipo de cemento y para las diferentes relaciones a/c.

## 7 Capítulo. Conclusiones y futuras líneas de investigación

### **7.1 Conclusiones generales**

Hay que destacar el gran desarrollo, por parte del Departamento de Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil de la Universidad Politécnica de Valencia, de los trabajos realizados con los algoritmos mencionados en el “apartado 2.1.2” de este trabajo y su gran implicación con la optimización medioambiental.

#### **7.1.1 Cloruros y heurísticas**

Tras realizar la revisión bibliográfica, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Al consultar las numerosas publicaciones y artículos referentes a la determinación de cloruros en el hormigón encontramos inconvenientes como la gran cantidad de métodos de control de cloruros utilizados. La falta de información en muchos casos de las condiciones de medida y la escasa coincidencia en la técnica usada impiden la obtención de datos.

- En el código modelo 2010, desarrollado por el FIB, podemos observar que la tabla de coeficientes de migración de cloruros obtenida mediante el método de Migración Rápida de Cloruros (NT Build 492) es muy similar a la “Tabla A.9.4” de coeficientes de difusión de cloruros utilizada por la EHE-08. También destacar que en muchos casos prácticos, se toman como semejantes los valores de migración iónica (bajo acción de campo eléctrico) y de la difusión natural.
- Respecto al uso de técnicas heurísticas, hay que resaltar la gran aplicación y uso de algoritmos genéticos (GA), la búsqueda por gradiente (DLS) y de la cristalización simulada (SA) en los diferentes trabajos realizados hasta la actualidad. También destacar la gran aplicación de los algoritmos usados recientemente para la optimización de estructuras como la colonia de hormigas (Ant Colony), el “Harmony search” y el enjambre de luciérnagas (Glowworm Swarm) híbrido.
- El uso de las redes neuronales en el ámbito de la ingeniería estructural ha sido principalmente para optimizar estructuras como vigas biapoyadas, elementos lineales fabricados con hormigón de alta resistencia y secciones de vigas y pilares. Actualmente se han desarrollado estudios para predecir la longitud de transferencia del pretensado de cordones de acero en piezas de hormigón.
- Por otro lado, debido a la creciente concienciación por el medio ambiente ha surgido la llamada optimización medioambiental. Estas nuevas investigaciones muestran como son posibles soluciones respetuosas con el medio ambiente a cambio de incrementos de costes no muy elevados.
- A pesar de las limitaciones, los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos en este trabajo, mediante el uso de la heurística RNA, han sido útiles para conseguir un mayor número de resultados de vida útil y para ver cómo se comportan nuevos tipos de cemento, que no aparecen en la tabla A.9.4 de la EHE-08, en los diferentes ambientes estudiados.

### **7.1.2 Optimización heurística**

A la hora de utilizar los datos en la red neuronal artificial (RNA), sólo se ha tenido en cuenta el tipo de cemento y la relación a/c, variables como la humedad relativa, el contenido de humedad del hormigón o la estructura de poros (que pueden llegar a influir en los mecanismos de penetración como la permeabilidad, la succión capilar o la difusión) no se han incluido en el estudio por falta de datos en la bibliografía.

Otro problema encontrado sobre los coeficientes de difusión de cloruros es la dispersión de los datos recopilados, ya que para que una red neuronal artificial haga predicciones buenas necesita una gran cantidad de ellos, pero a pesar de esto se ha conseguido lograr un ajuste por mínimos cuadrados ( $R^2$ ) entre 0,7 y 0,9. Esto determina que el porcentaje de variabilidad explicada por el modelo en este caso es bueno.

El algoritmo utilizado para la optimización es un algoritmo genético “genetic algorithm (GA)” complementado con un algoritmo de búsqueda por gradiente “descent local search (DLS)” para mutar las soluciones, el cual ha corrido con una población de 500 individuos y realizado 50 iteraciones, lo que nos da un tiempo de ejecución entre 25 y 30 minutos en la mayoría de los casos. Se han elegido estos datos para poder ejecutar el máximo de pruebas y para poder abarcar todas las dosificaciones en un periodo tiempo aceptable. Si se usa una población menor y menos iteraciones no se consiguen resultados tan buenos como los obtenidos en este trabajo y si se usa una población mayor y más iteraciones el tiempo de ejecución es mucho mayor pero la mejora es inapreciable.

En las estructuras, el acero de refuerzo más expuesto es el de los estribos, por lo tanto los primeros en sufrir el ataque de los cloruros. A la hora de introducir la comprobación del estado límite de durabilidad en la optimización, el problema nos conduce a utilizar diámetros de los estribos entre  $\varnothing 6$  y  $\varnothing 8$ mm, para que el tiempo en iniciación y propagación sea elevado y por lo tanto la vida útil de la estructura sea mayor. Otro aspecto a tener en cuenta son los recubrimientos, porque no todos los que nos proporcionan la EHE-08 hacen cumplir este Estado límite y dependiendo de ellos aumentaremos o disminuirémos el tiempo total ( $T_L$ ).

De lo anteriormente citado podemos extraer la conclusión de que a medida que aumentamos el diámetro por encima de  $\varnothing 8$ mm el tiempo de vida útil tiende a reducirse progresivamente y además aumentando con ello el coste de nuestra estructura debido al encarecimiento del acero. Respecto al recubrimiento, también a medida que aumentamos el recubrimiento aumentamos la vida útil de la estructura pero tenemos que tener cuidado porque los recubrimientos excesivos son desaconsejables para la ejecución de los elementos estructurales.

Respecto al coste de realización de nuestra estructura conseguimos precios promedio entre 800 y 860 unidades monetarias, un precio bajo ya que la realización de esta estructura no optimizada tendría un precio por encima de las 1000 unidades monetarias. Esto es gracias a que el acero utilizado tiene diámetros inferiores a  $\varnothing 8$ mm y por consiguiente un menor uso de cantidad de este, y a que normalmente en todas las pruebas se usan un tipo de hormigón que está por debajo de 45MPa, que son de los más baratos.

La conclusión final del trabajo, es que la metodología propuesta ha sido muy útil para valorar nuestra estructura y ver su comportamiento en distintos ambientes. Hay que tener en cuenta las propiedades de los hormigones para poder contemplar como los coeficientes de difusión de cloruros afectan a la durabilidad de la estructura. Por último, la mejor solución será aquella que teniendo una vida útil mayor que la mínima exigida presente un coste menor al de realización de la estructura sin optimizar.

Por último, hay que destacar que los objetivos marcados para este trabajo se han cumplido satisfactoriamente. Uno era conseguir aumentar la tabla A.9.4 de de la EHE-08 y se ha conseguido obtener más resultados de coeficientes de difusión de cloruros, incluir nuevos tipos de cementos y ampliar los ya existentes. El otro era desarrollar un programa de optimización de una viga biapoyada y comprobar que se reducen los costes y que el estado límite de durabilidad cumplía y también se ha conseguido.

## **7.2 Futuras líneas de investigación**

Como se ha comentado a lo largo de este trabajo, hay una gran cantidad de artículos relacionados con el efecto de los cloruros, los cuales nos proporcionan numerosos datos en ambiente de laboratorio y en ambiente marino real, además de usar distintas técnicas de determinación. Estos datos al unificarlos todos se generan coeficientes de variación altos, por lo que en futuras investigaciones se podría extraer de la “Tabla 6” de este trabajo los coeficientes de variación más altos y realizar ensayos para los diferentes cementos y diferentes dosificaciones e intentar reducir este coeficiente y así tener la certeza de que los datos son lo más idóneos posibles.

Los cementos CEM II/A-D y CEM II/B-M sólo tienen datos de difusión de cloruros de una relación a/c concreta, se propone realizar nuevas pruebas con el fin de ampliar la tabla 12 o buscar nuevos cementos que no estén en esta también.

También se podrían implementar futuros trabajos de optimización con una triple vía de criterios: económicos, de durabilidad y de sostenibilidad. Sobre todo para estructuras expuestas a ambientes agresivos, ya que la mayoría de los trabajos encontrados se basan en criterios económicos, de sostenibilidad o eficiencia energética, pero no se trata en profundidad el tema de durabilidad, que a la larga influirá en el criterio económico.

En caso de que la documentación existente lo permita, sería recomendable realizar trabajos de optimización para cada uno de los métodos seguidos para determinar el coeficiente de difusión de cloruros, incluyendo variables como la humedad, la temperatura y otras como la huella de carbono, distintos tipos de matrices cementantes y nuevas adiciones distintas a las estudiadas.

## 8 Capítulo: Referencias bibliográficas

- [1] Bermúdez Odriozola, M. A.; “Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida”, Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. (2007)
- [2] Maxwell, J. C.; *Scientific Papers*, 2, Dover Publications, New York, (1952): pp. 175-177. (1869)
- [3] Levy, M.M.; “La statique graphique et ses applications aux constructions”. Gauthier-Villars, París. (1874)
- [4] Mitchell, A.G.M.; “The Limits of Economy of Material in Frame Structures”. *Philosophical Magazine*, Series 6, 8(47): pp. 589-597. (1904)
- [5] Navarrina Martínez, F. L. “Una metodología general para optimización estructural en diseño asistido por ordenador”. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. (1987)
- [6] Klein, B.; “Direct use of extremal principles in solving certain optimization problems involving inequalities”. *Journal of the Operations Research Society of America*, 3: 168-175. (1955)

- [7] Schmit, L. A.; "Structural design by systematic synthesis". Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE. New York, pp. 105-132. (1960)
- [8] Karush, W.; "Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraints". M.Sc. Dissertation. Dept. of Mathematics, Univ. of Chicago, Chicago, Illinois. (1939)
- [9] Kuhn, H. W.; Tucker, A. W.; "Nonlinear programming". Proceedings of 2nd Berkeley Symposium. University of California Press, Berkeley. (1951)
- [10] Moragues, J. "Diseño óptimo de estructuras aporticadas de hormigón armado". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. (1980)
- [11] Arenas, J.; Villegas, L.; "Análisis en teoría de segundo orden de las pilas del viaducto de Cruzul" *Hormigón y Acero* 171: 35-55. (1989)
- [12] Gasch, M.S. "Optimización de estructuras de forjados reticulares". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. (1991)
- [13] Cohn, M.Z.; Dinovitzer, A.S.; "Application of structural optimization". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(2): 617-650. (1994)
- [14] Balling, R.; Yao, X. "Optimization of reinforced concrete frames". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 123 (2): 193-202. (1997)
- [15] Torrano, M.; "Diseño óptimo de secciones y elementos estructurales de hormigón armado". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. (2003)
- [16] Rodrigues Junior, S.; Eloy Vaz, L.; Barbosa Guimaraes, G.; "Optimum design of tall buildings in reinforced concrete subjected to wind forces". Proc. of the 6th Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization. Rio de Janeiro. (2005)
- [17] Chakrabarty, B.K. "A model for optimal design of reinforced concrete beam", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(1), 3238-3242. (1992)
- [18] Rajeev, S.; Krishnamoorthy C.S.; "Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 13:63-74. (1998)
- [19] Govindaraj, V.; Ramasamy, J.V.; "Optimum detailed design of reinforced concrete continuous beams using Genetic Algorithms", *Computers and Structures*, Vol. 84, 34-48. (2005)

- [20] Srinivas, V.; Ramanjaneyulu, K.; "An integrated approach for optimum design of bridge decks using genetic algorithms and artificial neural networks". *Advances in Engineering Software*, 38: 475-487. (2007)
- [21] Coello, C.A.; Christiansen, A. D.; Hernández, F.S. "A simple Genetic Algorithm for the Design of Reinforced Concrete Beams", *Engineering with Computers*, Vol. 13, 185-196. (1997)
- [22] Camp, C.V.; Pezeshk, S.; Hansson, H. "Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126: 105-115. (2003)
- [23] Rafiq, M.Y.; Southcombe, C.; "Genetic algorithms in optimal design and detailing of reinforced concrete columns supported by a declarative approach for capacity checking". *Computers and Structures* 69: 443-457. (1998)
- [24] Leps, M.; Sejnoha, M.; "New approach to optimization of reinforced concrete beams". *Computers and Structures*, Volume 81, Number 18: 1957-1966. (2003)
- [25] Sahab, M. G.; Ashour, A. F.; Toropov, V. V.; "A hybrid genetic algorithm for reinforced concrete slab buildings". *Computers & Structures*, 83: 551-559. (2005)
- [26] Sahab, M. G.; Ashour, A. F.; Toropov, V. V.; "Cost optimization of reinforced concrete flat buildings". *Engineering Structures*, 27(3): 313-322. (2005)
- [27] Philipp Geyer; "Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design". *Advanced Engineering Informatics*, 23; 12–31. (2009)
- [28] Atabay, Ş.; "Cost optimization of three-dimensional beamless reinforced concrete shear-wall systems via genetic algorithm". *Expert systems with Applications* 36: 3555-3561. (2009)
- [29] Perea de Dios, C.; "Heuristic optimization of reinforced concrete frame bridges". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Dpto. Ingeniería de la Construcción, 202 pp. (2007)
- [30] Perea de Dios, C.; "Heuristic optimization of reinforced concrete road box frames", Informe interno CST/GPRC-03, Universidad Politécnica de Valencia, Dep. Ingeniería de la Construcción, 308 pp., (julio 2004). Premio tesina fin de carrera Fundación Friedrich-Wilhelm, Universidad RWTH Aachen (Alemania).

- [31] Perea, C.; "Optimización heurística de marcos de carretera de hormigón armado", Informe interno CST/GPRC-07, Universidad. (2006)
- [32] Perea, C., Alcalá, J., Martínez, F.J., Yepes, V. y González-Vidoso, F.; "Optimum design of the box frame tunnel of the Underground Line Palma - UIB", Proceedings X International Conference on Project Engineering, Valencia, 12-15. (Septiembre 2006)
- [33] Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidoso, F. y Hospitaler, A.; "Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization", *Advances in Engineering Software*. 39(8): 676-688. ISSN: 0965-9978. (2007)
- [34] Perea, C.; Yepes, V.; Alcalá, J.; Hospitaler, A.; González-Vidoso, F.; "A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance". *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 17(6):427-437. (2010).
- [35] Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., González-Vidoso, F.; "A Parametric Study of Optimum Earth Retaining Walls by Simulated Annealing". *Engineering Structures*, 30(3): 821-830. ISSN: 0141-0296. (2008)
- [36] Yepes, V.; González Vidoso, F.; ALCALÁ, J.; Villalba, P.; "CO<sub>2</sub>-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy". *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE*, 26 (3):378-386. (2012)
- [37] Yepes, V.; García-Segura, T.; Moreno-Jiménez, J.M.; (2015). "A cognitive approach for the multi-objective optimization of RC structural problems". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, (accepted, in press).
- [38] Yepes, V.; Martí, J.V.; García-Segura, T.; (2015). "Cost and CO<sub>2</sub> emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm". *Automation in Construction*, 49:123-134.
- [39] Payá, I.; Yepes, V.; González-Vidoso, F.; Hospitaler, A.; "Multiobjective Optimization of Reinforced Concrete Building Frames by Simulated Annealing". *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8): 596-610. ISSN: 1093-9687. (2008).
- [40] Martínez-Martín, F.J.; González-Vidoso, F.; Hospitaler, A.; Yepes, V.; "Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections". *Computers & Structures* 88, 375-386. ISSN: 0045-7949. (2010)

- [41] Martínez-Martin, F.J.; González Vidosa, F.; Hospitaler, A.; Yepes, V.; “Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms”. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 13(6):420-432. (2012)
- [42] Carbonell, A.; Yepes, V.; González-Vidosa, F.; “Búsqueda exhaustiva por entornos aplicada al diseño económico de bóvedas de hormigón armado”. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(3):227-235. (2011)
- [43] Carbonell, A.; González-Vidosa, F.; Yepes, V.; “Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization”. *Advances in Engineering Software*, 42(4): 151-159. (2011)
- [44] Carbonell, A.; Yepes, V.; González Vidosa, F.; “Automatic design of concrete vaults using iterated local search and extreme value estimation”. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 9(6):675-689. (2012)
- [45] Torres-Machí, C.; Yepes, V.; Alcalá, J.; Pellicer, E.; “Optimization of high-performance concrete structures by variable neighborhood search”. *International Journal of Civil Engineering*, 11(2):90-99. ISSN: 1735-0522. (2013)
- [46] Martí, J.V.; González-Vidosa, F.; Yepes, V.; Alcalá, J.; “Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing”. *Engineering Structures*, 48:342-352. (2013)
- [47] Martí, J.V.; Yepes, V.; González-Vidosa, F.; Luz, A.; “Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos”. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(3), 145-154. (2014)
- [48] Martí, J.V.; Yepes, V.; González-Vidosa, F.; “A memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement”. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 141(2): 04014114. (2015)
- [49] García-Segura, T.; Yepes, V.; Martí, J.V.; Alcalá, J.; “Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm”. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(7):1190 – 1205. (2014)
- [50] García-Segura, T.; Yepes, V.; Alcalá, J.; “Life-cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1):3-12. DOI 10.1007/s11367-013-0614-0. (2014)

- [51] García-Segura, T.; Yepes, V.; Alcalá, J.; Pérez-López, E.; "Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges". *Engineering Structures*, 92:112-122. (2015)
- [52] Lee, C.; Ahn, J.; "Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm". *ASCE Journal of Structural Engineering* 129: 762-774. (2003)
- [53] Chau, K. W.; Albermani, F.; "Knowledge-based system on optimum design of liquid retaining structures with Genetic Algorithms". *ASCE Journal of Structural Engineering* 129 (10): 1312-1321. (2003)
- [54] Kong, J.; "Optimal drift design of tall reinforced concrete buildings using genetic algorithms". *Proc. Computational Mechanics*. WCCM VI in conjunction with APCOM'04. Beijing, China. (2004)
- [55] Miyamoto, A.; Nakamura, H.; Kruszka, L. "Application of the improved immune algorithm to structural design support system". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130: 108-119. (2004)
- [56] García Bartual, R.; "Redes neuronales artificiales en Ingeniería hidráulica y medioambiental". Universidad Politécnica de Valencia. (2005)
- [57] McCulloch, W.; Pitts, W.; "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous System". *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5: pp. 115-133. (1943)
- [58] Rosenblatt, F.; "Principles of neurodynamics: Perceptrons and the theory of mechanism". *Neural Computation*, 2: pp. 25-34. (1957)
- [59] Hopfield, J.J.; Tank, D.; "Neural computation of decisions in optimization problems". *Biological Cybernetics*, 52: pp. 141-152. (1985)
- [60] Adeli, H; Yeh, C.; "Perceptron learning in engineering design". *Microcomputers in Civil Engineering* 4: pp. 247-256. (1989)
- [61] Aleksander, I.; Morton, H.; "An Introduction to Neural Computing". *Chapman & Hall*. Londres. (1990)
- [62] Adeli H. "Neuronal Networks in Civil Engineering: 1989-2000". *Computer-Aided Civil and Infrastructural Engineering*, vol. 16: pp. 126-142. (2001)
- [63] Hadi, M.; "Neural networks applications in concrete structures". *Computers and Structures*: vol. 81: pp. 373-381. (2003)
- [64] Cladera, A.; "Shear design of high strength concrete beams". Tesis Doctoral. (2003)

- [65] Arcila Zea, J.; Riveros Jerez, C. A.; and Rivero Jerez, J. E.; "Optimización de secciones de vigas y columnas para el cumplimiento de la deriva en edificaciones de concreto reforzado mediante Redes Neuronales Artificiales," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, pp. 34–44. (2014)
- [66] Martí-Vargas, J.R.; Ferri, F.J.; Yepes, V.; "Prediction of the transfer length of prestressing strands with neural networks". *Computers and Concrete*, 12(2), pp. 187-209. (2013)
- [67] Yepes Piqueras, V.; "Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW," Universidad Politécnica de Valencia, Tesis doctoral. (2002)
- [68] Holland, J. "Adaptation in Natural and Artificial Systems", The University of Michigan Press, Ann Arbour. (1975)
- [69] Song, G.; Shayan, A.; "Corrosion of steel in concrete: causes, detection and prediction". ARRB Transport Research Ltd., Review Report 4. (1998)
- [70] Zornoza Gómez, E. M.; "El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón", Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. (2007)
- [71] Sandberg, P.; "Chloride initiated reinforcement corrosion in marine concrete". Report TVBM-1015. Lund, Suecia: Lund Institute of Technology, Division of Building Materials. (1998)
- [72] Mangat, P.S.; Molloy, B.T.; "Chloride binding in concrete containing pfa, gbs or silica fume under water exposure". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 47, nº 171, pp.129-141. (1995)
- [73] Goltermann, P.; "Chloride ingress in concrete structures: extrapolation of observations". *ACI Materials Journal*, March-April, 114-119. (2003)
- [74] EHE-08, *Instrucción de hormigón estructural*. AENOR. (2008)
- [75] UNE 112010:2011, "Corrosión en armaduras - Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio", AENOR. (2011)
- [76] RILEM TC 178-TMC: "Testing and modeling chloride penetration in concrete". *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 35, pp. 583-585. (2002)

- [77] UNE 80213: "Métodos de ensayo de cementos - Determinación potenciométrica de cloruros", AENOR. (2010)
- [78] Castellote, M.; Andrade, C.; Alonso, C.; "Measurement of the steady and non-steady chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests". *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1411–1420. (2001)
- [79] FIB-CEB, Model code 2010.
- [80] NT BUILD 492, Nordtest method, pp. 1–8. (1999)
- [81] NT BUILD 443, Nordtest method, pp. 1–5. (1995)
- [82] T277-93, "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A. (1983)
- [83] ASTM. "Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete. Standard C-1152-97". *Annual book of ASTM Standards*, Vol. 04.02. Philadelphia: Ed. American Society for Testing and Materials. (2002)
- [84] P. Spiesz, P.; Brouwers, H.J.H.; "Analysis of the theoretical model of the Rapid Chloride Migration test. (CTH Rapid Test)," *8th fib PhD Symposium in Kgs.*, pp. 6–11. (2010)
- [85] ASTM. "Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete. Standard C-1218-99". *Annual book of ASTM Standards*, Vol. 04.02. Ed. American Society for Testing and Materials. (2008)
- [86] ASTM. "Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement. Standard C-114-15". *Annual book of ASTM Standards*, Vol. 04.02. Ed. American Society for Testing and Materials. (2015)
- [87] Garcés, P.; Andión, L.G.; Zornoza E.; Bonilla, M.; Payá J.; "The effect of processed fly ashes on the durability and the corrosion of steel rebars embedded in cement-modified fly ash mortars," *Cement and Concrete Composites*, vol. 32, pp. 204–210. (2010)
- [88] Cañón, A.; Garcés, P.; Climent, M.A.; Carmona, J.; Zornoza, E.; "Feasibility of electrochemical chloride extraction from structural reinforced concrete using a sprayed conductive graphite powder-cement paste as anode," *Corrosion Science*, vol. 77, pp. 128–134. (2013)

- [89] Andrade, C.; Climent, M.A.; G. de Vera; "Procedure for calculating the chloride diffusion coefficient and surface concentration from a profile having a maximum beyond the concrete surface," *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 863–869, (2015)
- [90] T259-80, "Standard Method of Test for Resistance of Concrete to Chloride Ion Penetration", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., U.S.A., (1980)
- [91] Feldman, R.F.; "Diffusion Measurements in Cement paste By Water Replacement Using Propan-2-ol", *Cement and Concrete Research*, Vol. 17, pp. 602-612. (1987)
- [92] Sharif, A., Loughlin, K. F., Azad, A.K., Navaz, C. M., "Determination of the Effective Chloride Diffusion Coefficient in Concrete via a Gas Diffusion Technique", *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 3, pp. 227-233. (1997)
- [93] Costa, A.; Appleton, J.; "Chloride penetration into concrete in marine environment-Part I: Main parameters affecting chloride penetration", *Materials and Structures*, vol. 32, no. 5, pp. 252–259. (1999)
- [94] Tang, L.; Sorensen, H. E.; "Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete", *Materials and Structures*, vol. 34, no. 242, pp. 479–485. (2005)
- [95] Ampadu, K. O.; Torii, K.; Kawamura, M.; "Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, no. 4, pp. 585–590. (1999)
- [96] Leng, F.; Feng, N.; Lu, X.; "An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, pp. 8–11. (2000)
- [97] Vedalakshmi, R.; Saraswathy, V.; Song, H. W.; Palaniswamy, N.; "Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient", *Corrosion Science*, vol. 51, no. 6, pp. 1299–1307. (2009)
- [98] Cheewaket, T.; Jaturapitakkul, C.; Chalee, W.; "Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine site", *Materials and Structures*, pp. 1501–1511. (2013)

- [99] Valipour, M.; Pargar, F.; Shekarchi, M.; Khani, S.; Moradian, M.; "In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment", *Construction and Building Materials*, vol. 46, pp. 63–70. (2013)
- [100] Audenaert, K.; Yuan, Q.; De Schutter, G.; "On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete", *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 3, pp. 396–402. (2010)
- [101] Zhang, W. M.; Ba, H. J.; Chen, S. J.; "Effect of fly ash and repeated loading on diffusion coefficient in chloride migration test", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 5, pp. 2269–2274. (2011)
- [102] Oh, B. H.; Jang, S. Y.; "Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations", *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 3, pp. 463–480. (2004)
- [103] Thomas, M.D.A.; Bamforth P.B.; "Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag", *Cement and Concrete Research*, vol. 29, nº 4, pp. 487–495. (1999)
- [104] Nokken, M.; Boddy, A.; Hooton, R. D.; Thomas, M.D.A.; "Time dependent diffusion in concrete-three laboratory studies", *Cement and Concrete Research*, vol. 36, nº 1, pp. 200–207. (2006)
- [105] Sánchez, I.; López, M.P.; Ortega, J.M.; Climent, M.Á.; "Impedance spectroscopy: An efficient tool to determine the non-steady-state chloride diffusion coefficient in building materials", *Materials and corrosion*, vol. 62, nº 2, pp. 139–145. (2011)
- [106] Guimarães, A.T.C.; Climent, M.A.; De Vera, G.; Vicente, F.J.; Rodrigues, F.T.; Andrade, C.; "Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure", *Construction and Building Materials*, vol. 25, nº 2, pp. 785–790. (2011)

ANEXO 1: Técnicas de control de los  
cloruros

- **UNE 112010: 2011 Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio, [75].**

Este método consiste en la determinación de cloruros totales (solubles y no solubles en agua) de hormigones endurecidos y puestos en servicio, por el método volumétrico Volhard.

La muestra de hormigón se ataca con ácido nítrico diluido en ebullición. Los sulfuros se oxidan a sulfato y no interfieren. Los cloruros disueltos se precipitan añadiendo una cantidad conocida de una disolución patrón de nitrato de plata. Después de la ebullición, el precipitado se lava con ácido nítrico diluido y se desecha. El filtrado y las aguas de lavado se enfrían por debajo de 25 °C y el nitrato de plata en exceso se valora con una disolución patrón de tiocianato de amonio en presencia de una sal de hierro (III) utilizada como indicador.

El contenido de cloruros, en tanto por ciento en peso, con relación al peso de la muestra de hormigón utilizada, se debe calcular mediante la siguiente fórmula:

$$Cl^{-}(\% \text{ en peso}) = \frac{1,773}{1000} \cdot (V_2 - V_1) \cdot \frac{100}{m_1} = \frac{0,1773 \cdot (V_2 - V_1)}{m_1} \quad (16)$$

donde

$m_1$  es la masa de la muestra de ensayo de hormigón (g).

$V_1$  es el volumen de la disolución de tiocianato de amonio 0,05M requerido para la valoración de la disolución de ensayo (ml).

$V_2$  es el volumen de la disolución de tiocianato de amonio 0,05M requerido para la valoración en blanco (ml).

Este procedimiento es el recomendado por el RILEM TC 178-TMC: “*Testing and modeling chloride penetration in concrete*”, [76].

- **AASHTO T-259: Método estándar del test de Resistencia del hormigón a la penetración del ión cloruro, [90].**

La prueba AASHTO T259 (comúnmente conocida como la prueba de encharcamiento de sal) es una prueba a largo plazo para la medición de la penetración de cloruros en el hormigón. La prueba requiere tres losas de al menos 75 mm de espesor y que tenga una superficie de 300 mm de lado. Estas losas son curadas en ambiente húmedo durante 14 días y luego almacenadas en una sala de secado a una humedad relativa del 50% durante 28 días. Los lados de las losas están sellados, pero la parte inferior y la cara superior no. Después del periodo de acondicionamiento, una solución de 3% de NaCl se deja estancada en la superficie superior durante 90 días, mientras que la cara inferior se deja expuesto al ambiente de secado (véase la figura 35).

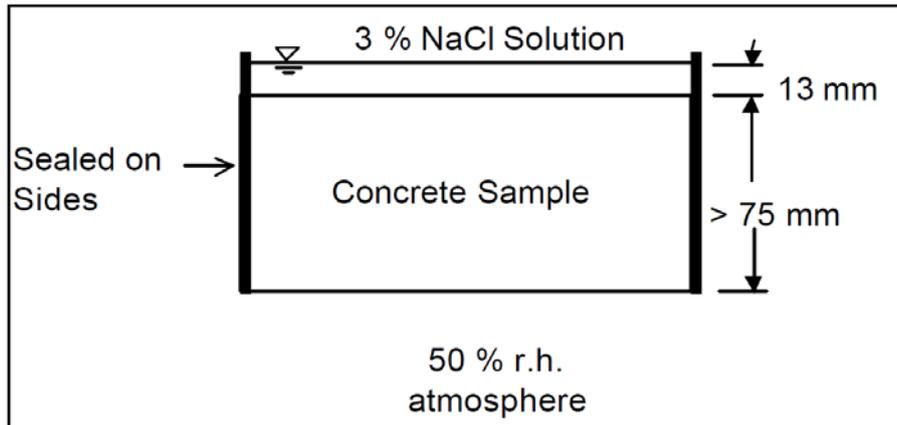


Figura 35: AASHTO T-259

Al final de este periodo, las placas se retiran del entorno de secado y se determina la concentración de cloruros de rodajas de 1,3cm. Normalmente, 2 o 3 se toman a profundidades progresivas. Sólo se determina la concentración media de cloruros en cada rodaja, no la variación real de la concentración de cloruros más allá de esos 1,3cm. Destacar que en los especímenes que se han dejado secar durante 28 días hay un efecto de absorción inicial cuando las losas se exponen a la solución y esta se sumerge rápidamente en los poros. Además hay transmisión de vapor desde el frente húmedo en el hormigón a la atmósfera más seca en la cara externa, provocando más demanda de agua para elaborar el hormigón y trayendo iones cloruro con él. La cantidad de cloruros que se introduce en el hormigón por absorción capilar en comparación con la cantidad que entra por difusión será mayor cuando la prueba sea de 90 días, sin embargo el efecto es contrario durante la vida de una estructura.

- **NordTest NTBuild 443, [81].**

Esta prueba ha sido desarrollada para superar algunas de las deficiencias de la prueba de encharcamiento de sal para medir la difusión. Aunque no es la primera prueba de desarrollo similar, la Nordtest es la primera versión estandarizada formalmente de la prueba "bulk diffusion". La primera diferencia en el procedimiento de esta prueba frente a la prueba de encharcamiento de sal es la condición de humedad inicial de la muestra. En lugar de ser secada durante 28 días como con la prueba de encharcamiento de sal, la muestra de ensayo se satura con agua de cal. Esto evita cualquier efecto inicial de absorción cuando se introduce en la solución de cloruros. Además, en lugar de recubrir sólo los lados de la muestra y dejando una cara expuesta al aire, la única cara que se deja descubierta es la que se expone a una solución de NaCl con una concentración de  $165g \pm 1g$  por  $dm^3$ , (Figura 36). Se deja de esta manera durante un mínimo de 35 días antes de la evaluación.

Para evaluar la muestra, el perfil de cloruros del hormigón se determina mediante el montaje de la muestra, ya sea en un molino o torno con un poco de punta de diamante. La muestra debe estar nivelada de modo que el eje de avance de la broca sea perpendicular a la superficie de la muestra. Se hacen perforaciones a distintas

profundidades (en incrementos de profundidad del orden de 0,5 mm) y se muele la muestra de hormigón.

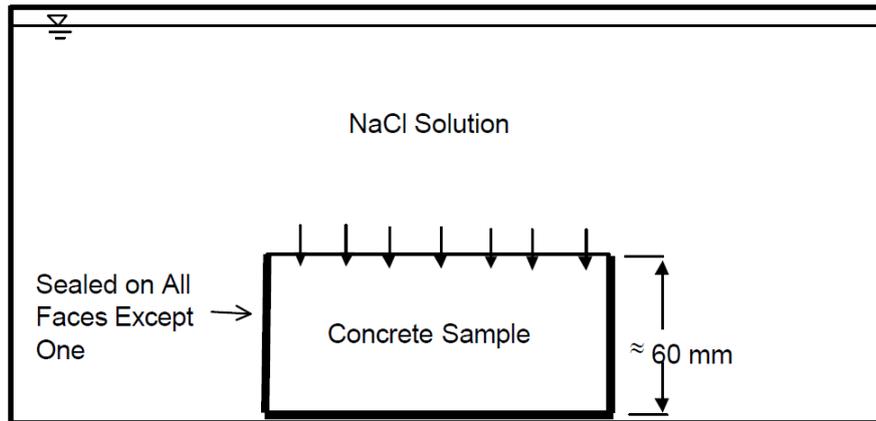


Figura 36: Nordtest, NTBuild 443

El contenido de cloruros de la muestra de hormigón en polvo es determinado de acuerdo con AASHTO T-260. La solución de la función de error de la segunda ley de Fick se ajusta a la curva y se determina un valor de difusión y la concentración de cloruros de la superficie.

El Nordtest es capaz de modelar la difusión de cloruros en el hormigón, pero es una prueba de larga duración. Para hormigones de baja calidad, el periodo mínimo de exposición es de 35 días. Para hormigones de mayor calidad, sin embargo, este periodo debe ampliarse a 90 días o más, al igual que para la prueba de encharcamiento sal.

- **AASHTO T-277: Indicación eléctrica de la capacidad del hormigón para resistir la penetración de iones de cloruro, [82].**

En la prueba AASHTO T-277 (ASTM C-1202), con agua saturada, una probeta de hormigón de 50mm de espesor y 100 mm de diámetro se somete a un potencial de 60V aplicados con corriente continua, durante 6 horas, utilizando el aparato mostrado en la Figura 37. En un depósito se coloca una solución de 3,0% de NaCl y en el otro depósito se coloca una solución 0,3M de NaOH. La carga total que pasa es determinada y ésta se utiliza para calificar el hormigón de acuerdo con los criterios incluidos en la Tabla 13. Esta prueba es comúnmente referida como el "Rapid Chloride Permeability Test" (RCPT), aunque este nombre es incorrecto, ya que no es la permeabilidad la que se está midiendo sino el movimiento iónico. Además, el movimiento de todos los iones, no sólo afecta a los iones cloruro, afecta al resultado de la prueba (la carga total atravesada).

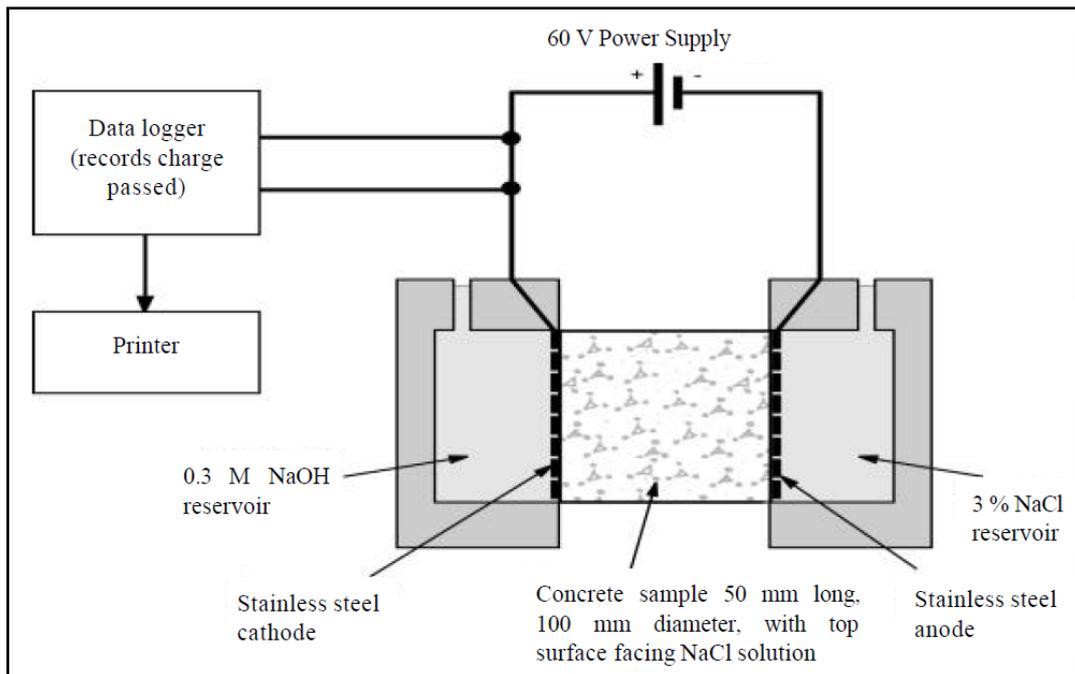


Figura 37: AASHTO T-277 (ASTM C-1202)

Charge passed (coulombs)	Chloride Ion Penetrability
>4.000	High
2.000-4.000	Moderate
1.000-2.000	Low
1.00-1.000	Very Low
<100	Negligible

Tabla 13: Clasificación RCPT (ASTM C1202)

Hay una serie de críticas a esta técnica, aunque ha sido adoptada como una prueba estándar y se utiliza ampliamente en la literatura por diferentes autores, además se ha utilizado para limitar la permeabilidad en la "Canadian Standards Association *Parking Structures-Structural Design*". Las principales críticas son: (I) la corriente que pasa tiene que ver con todos los iones en la solución de los poros no sólo iones cloruro, (II) las mediciones se realizan antes de que se logre la migración de estado estacionario, y (III) la alta tensión aplicada conduce a un aumento de la temperatura, especialmente para hormigones de baja calidad, lo que aumenta aún más la carga que pasa. Cuanto menor es la calidad del hormigón, mayor es la corriente a una tensión dada y por lo tanto mayor energía debido al calor producido. Este calentamiento conduce a un aumento adicional de la carga que pasa, más de lo que se obtendría si la temperatura se mantuviese constante. Por lo tanto, para hormigones de baja calidad, el resultado por esta técnica está sobredimensionado.

Todas estas objeciones conducen a una pérdida de confianza en esta técnica para medir la penetración de iones cloruro y además también conducen a una pérdida de precisión. La declaración del American Society for Testing and Materials (ASTMC1202) sobre la precisión, indica que para minimizar la variación, se ensayan normalmente tres muestras y se realiza el valor promedio. Sin embargo, también se da una declaración de precisión para este tipo de prueba y se indica que el promedio de tres muestras no debe diferir en más de 29% entre los dos laboratorios independientes.

Otra dificultad con la prueba de RCPT, es que depende de la conductividad del hormigón, de alguna manera relacionada con la penetrabilidad de iones cloruro. Por lo tanto, cualquier material conductor presente en el hormigón muestra voluntad de alterar los resultados, haciendo que sea demasiado alta. Este sería el caso si cualquier acero de refuerzo está presente, si se utilizan las fibras conductoras (por ejemplo, carbono o acero), o si está presente en los poros una solución de conductora altamente iónica.

- **Técnicas de migración eléctricas**

A menudo, el movimiento de cloruros se acelera mediante el uso de un campo eléctrico que es de una intensidad menor que la utilizada en la RCPT. Los datos también se pueden recoger de manera diferente para evaluar mejor el movimiento real de iones cloruro (en lugar de simplemente la medición de la carga que pasa).

El movimiento de iones en una solución bajo un campo eléctrico se rige por la ecuación de Nernst-Planck:

$$-J_i = D_i \cdot \frac{\partial C_i(X)}{\partial X} + \frac{z_i F}{RT} \cdot DC_i \cdot \frac{\partial E(X)}{\partial X} + C_i \cdot v_i(X) \quad (17)$$

donde  $J_i$  es el flujo de la especie iónica  $i$ ,  $D_i$  es el coeficiente de difusión de la especie iónica  $i$ ,  $C_i(x)$  es la concentración de especies iónicas  $i$  como una función de la ubicación  $x$ ,  $z_i$  es la valencia de especies iónicas  $i$ ,  $F$  es la constante de Faraday,  $R$  es la constante universal de los gases,  $T$  es la temperatura,  $E(x)$  es el potencial eléctrico aplicado como una función de  $x$  y  $v_i(x)$  es la velocidad de convección de  $i$ .

Conceptualmente, este puede ser dividido en:

Flujo = difusión pura + migración eléctrica + convección

Teniendo en cuenta la situación en la que no hay convección (es decir, no hay gradientes de presión o de humedad) y suponiendo que la porción de difusión pura es insignificante en comparación con el efecto de la migración eléctrica, que es razonable para un voltaje aplicado suficientemente fuerte (por lo menos 10-15 V), la ecuación 4 se convierte en:

$$J = \frac{Z_i F D C_i}{RT} \cdot \frac{\partial E(X)}{\partial X}$$

Esto permite que la solución para D, una vez que el flujo de iones cloruro se determina suponiendo también que la caída de voltaje a través de la célula, sea lineal. También, se debe suponer que la concentración de cloruro es constante en la celda con la concentración más alta, que se han alcanzado condiciones de estado estacionario y que el calentamiento de la solución y el hormigón es despreciable.

Otro método de determinación de D es aplicar la ecuación de Nernst-Einstein:

$$D_i = \frac{RT\sigma_i}{z_i^2 F^2 C_i} \quad (18)$$

donde  $\sigma_i$  es la conductividad específica, y los otros términos se definen como antes. Una vez que se conoce la conductividad específica, entonces se puede determinar el coeficiente de difusión. Para determinar  $\sigma_i$ , saber que:

$$\sigma_i = t_i \cdot \sigma$$

donde  $\sigma$  es la conductividad total y:

$$t_i = \frac{Q_i}{Q} = \frac{I_i}{I}$$

donde  $t_i$  se llama el número de transferencia y se relaciona la cantidad eléctrica (Q) o corriente (I) llevado por la especie i a la cantidad total de electricidad o corriente. Se ha sugerido que tomar el valor de t como 1 como un enfoque simple y adecuado, aunque se admite que esto no es totalmente correcto.

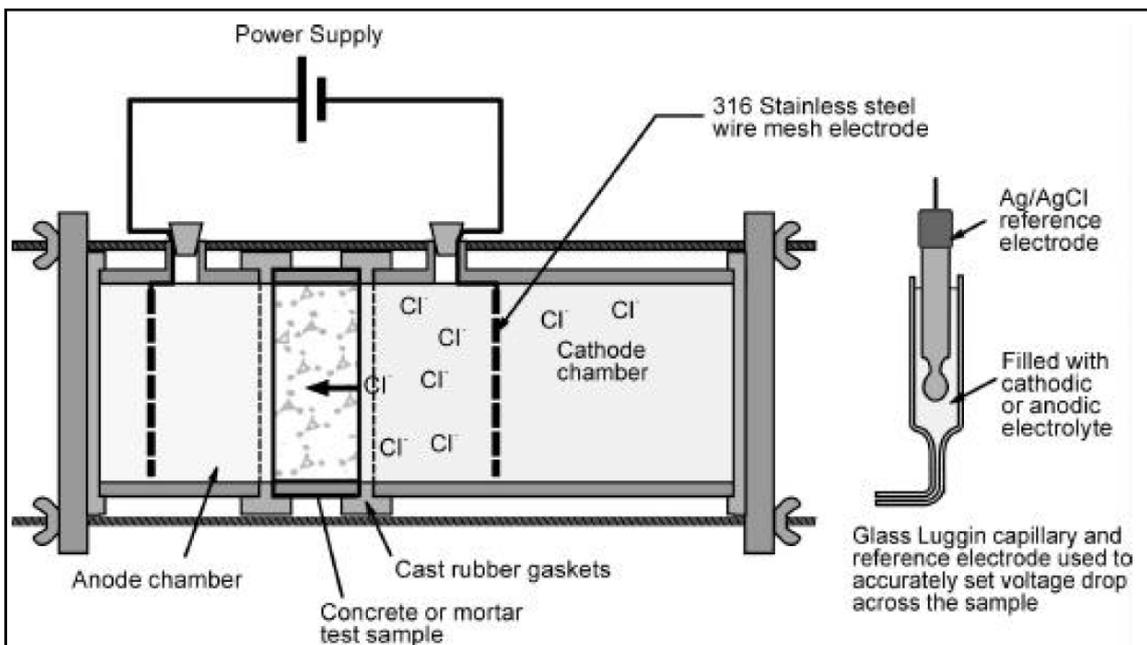


Figura 38: Celda de migración de cloruros.

Las pruebas de migración eléctrica se realizan en una celda de dos cámaras con la muestra de hormigón como la división entre las dos cámaras, como se muestra en la Figura 38. La muestra de hormigón normalmente es un disco de 100 mm de diámetro y longitud sobre 15 a 50 mm. Inicialmente, la cámara catódica contiene iones cloruro y la cámara anódica está libre de ellos. La solución de acogida varía, pero normalmente suele ser agua destilada o solución de cal. A continuación se aplica un voltaje para conducir los iones cloruro a través del hormigón mientras que la concentración de cloruros de la solución (cámara anódica) es controlada. En la cámara con la concentración más baja mediante la eliminación periódica de pequeñas partículas se determina la concentración de cloruros de estas muestras. Por último el cambio de concentración de cloruro con el tiempo permite el cálculo de los coeficientes de difusión.

La diferencia más obvia e importante que pueda surgir entre los distintos métodos es la tensión que se aplica. Se requiere una tensión suficientemente baja para evitar el calentamiento de la muestra, pero lo suficientemente alta como para asegurar una duración suficientemente corta. Voltajes de 10-12V evitan el problema del calentamiento de la muestra pero requieren exposiciones largas.

- **NordTest NTBuild 492: Coeficiente de migración de cloruros de experimentos de migración en estado no estacionario, [80].**

Este método es aplicable a muestras endurecidas realizadas en laboratorio o perforadas de estructuras. El coeficiente de migración de cloruros determinado por este método es una medida de la resistencia del material ensayado a la penetración de cloruros. El método requiere muestras cilíndricas con un diámetro de 100 mm y un espesor de 50 mm, cortada en cilindros o núcleos perforados con una longitud mínima de 100 mm.

Después de aserrar, cepillar y lavar las rebabas de las superficies de la muestra, se limpia el exceso de agua de la superficie. Cuando las probetas están superficialmente secas, se colocan en el recipiente para el tratamiento de vacío. Se mantiene el vacío durante tres horas y, a continuación, con la bomba de vacío aún en marcha, se llena el recipiente con una solución saturada de  $\text{Ca(OH)}_2$  a fin de sumergir todas las probetas. Después se mantiene el vacío durante una hora más antes de permitir que el aire vuelva a entrar en el recipiente. Por último se mantienen las muestras en la solución durante 18 horas aproximadamente.

La solución de catódica es 10% de NaCl en masa de agua (100g de NaCl en 900g de agua, aproximadamente 2N) y la solución de anódica es 0,3N NaOH en agua destilada o desionizada (aproximadamente 12g de NaOH en 1 litro de agua).

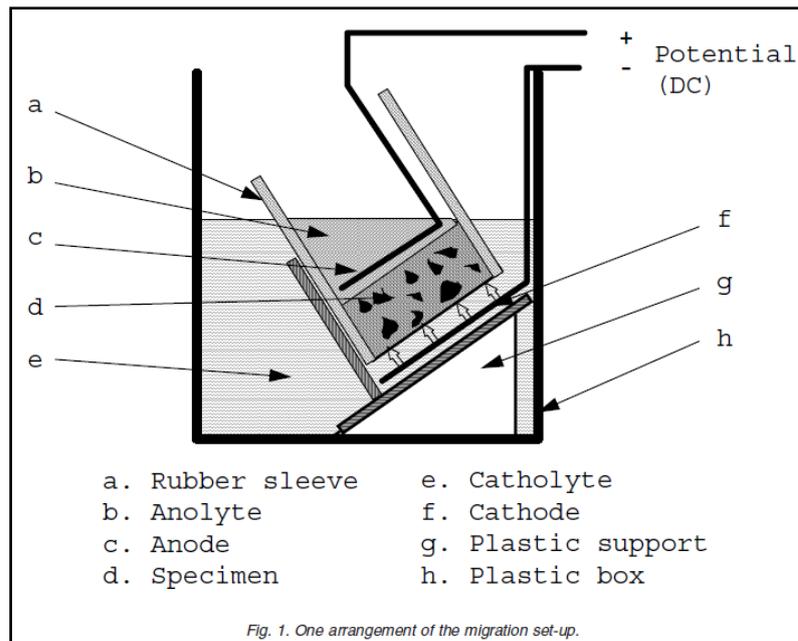


Figura 39: Una disposición de la configuración de migración.

Para la medición de la profundidad de penetración de cloruros, hay que desmontar la muestra del soporte, lavarla con agua y limpiar el exceso de agua de la superficie. Se divide la muestra axialmente en dos pedazos y se rocía la sección recién dividida con una solución de nitrato de plata 0,1M. Cuando el cloruro de plata blanco precipite sobre la superficie dividida se verá claramente, se mide la profundidad de penetración, con la ayuda de una regla adecuada, desde el centro hacia ambos bordes a intervalos de 10mm.

Para calcular el coeficiente de migración de estado no estacionario se utiliza la ecuación (6):

$$D_{nssm} = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (19)$$

- **CTH Test: Test de migración rápida, [84].**

Es una variación de la migración celular convencional. La célula de migración está configurada con un espécimen de 50 mm de espesor y 100 mm de diámetro, y una tensión aplicada de 30 V, como se muestra en la figura 40.

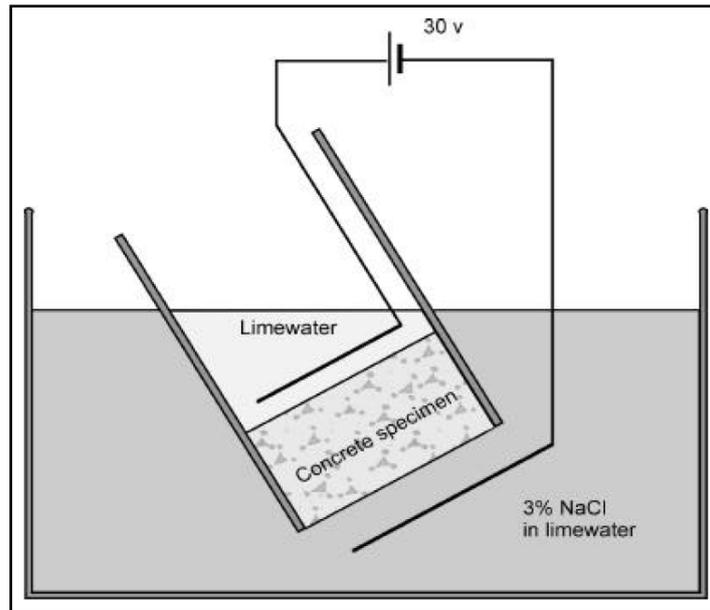


Figura 40: Migración celular de Tang y Nilsson

El experimento se basa en una prueba de migración eléctrica, pero la concentración de cloruros de la solución del depósito con la concentración más baja no se supervisa. En lugar de ello, después de una duración especificada (8 horas aproximadamente) las muestras se retiran y se cortan, y la profundidad de penetración de cloruros se determina en promedio de la muestra usando una técnica colorimétrica en la que una solución de nitrato de plata se utiliza como indicador. Se produce una reacción química donde los cloruros se unen con la plata para producir cloruro de plata, una sustancia blanquecina.

La profundidad de penetración se puede utilizar para determinar un coeficiente de difusión de iones cloruro. Usando la siguiente ecuación derivada de la ecuación de Nernst-Einstein (ecuación 5):

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{x_f}{t} \quad (20)$$

donde  $x_f$  es el punto de los perfiles de iones cloruro que necesita ser relacionado con la profundidad dada por la técnica colorimétrica. Además la profundidad de penetración en sí también puede ser un parámetro útil.

- **Técnicas de resistividad**

Las técnicas de resistividad son otro método para evaluar la capacidad de los cloruros de penetrar en el hormigón. La resistividad es la resistencia eléctrica de una sustancia y la conductividad es la inversa de la resistividad. La conductividad de un medio poroso saturado está determinada principalmente por la conductividad de la solución del poro. Un número llamado Factor Formación (FF) se puede entonces definir:

$$FF = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

donde  $\sigma$  es la conductividad del material poroso y  $\sigma_0$  es la conductividad de la solución de los poros. Ahora, tanto la conductividad y la difusión en un medio poroso están relacionados con los mismos factores, la tortuosidad, tamaño de poro y la conectividad. Por lo tanto, también se puede afirmar que:

$$FF = \frac{D}{D_0}$$

donde  $D$  es la difusión del medio poroso (el factor de interés) y  $D_0$  es la difusión de cloruros en la solución de los poros.

Hay dos tipos de pruebas que se pueden hacer para determinar un valor de resistividad, con la participación de corriente continua (DC) o con corriente alterna (CA).

La resistividad de la corriente continua se puede medir mediante la aplicación de un voltaje entre dos electrodos con el hormigón intercalado entre ellos, como se muestra en la figura 41. Sin embargo, debido a que el hormigón conduce la electricidad como un electrolito, se desarrolla una polarización. Esto hace que la tensión real provoque que la corriente se reduzca en una cantidad desconocida. Si se supone que este efecto de polarización es constante a diferentes voltajes aplicados, este efecto se puede explicar mediante la adopción de medidas de corriente a dos voltajes. La determinación de la resistencia DC es, pues, a partir de la ecuación:

$$R = \frac{E_{a1} \cdot I_2 - E_{a2} \cdot I_1}{I_1 - I_2} \quad (21)$$

donde  $R$  es la resistencia,  $E_{a1}$  y  $E_{a2}$  son los dos voltajes aplicados y  $I_1$  e  $I_2$  son las corrientes relevantes. Esto se puede convertir en una resistividad usando la ecuación:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \quad (22)$$

donde  $\rho$  es la resistividad,  $A$  es el área de sección transversal y  $L$  es la longitud de la probeta.

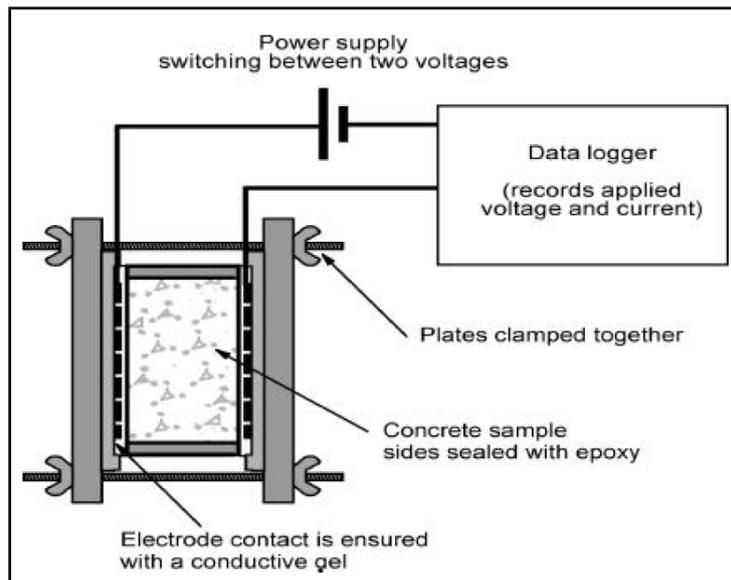


Figura 41: Dispositivo de medición de resistividad DC.

El sondeo de la matriz de Wenner es una técnica para la determinación de la resistividad en el hormigón in situ, sin la eliminación de núcleos para colocar entre las placas. Se compone de un conjunto de cuatro puntos, cada una a una distancia constante  $a$ . Los dos puntos exteriores son donde se aplica la corriente, mientras que los dos puntos interiores miden el potencial, véase la figura 42. Esto tiene la ventaja de eliminar la influencia de la polarización al medir el potencial real a través de una región interior. Para una región semi-infinita (donde el grosor es mucho mayor que la distancia entre los puntos) la resistividad se puede calcular como:

$$\rho = 2\pi a \cdot \frac{P}{I} \quad (23)$$

donde  $\rho$  es la resistividad,  $a$  es la distancia entre puntos,  $P$  es el potencial medido, e  $I$  es la corriente aplicada. Si el espesor no es mucho mayor que la distancia entre dos puntos, a continuación, se deben aplicar unos factores de corrección.

Las técnicas de resistividad tienen la ventaja de la velocidad, también proporcionan un valor que puede ser útil al determinar las tasas de corrosión en el hormigón, a saber, la resistividad del hormigón y evitan el calentamiento del hormigón, debido a que la tensión es baja, en el rango de 10 V o inferior y sólo se aplica para tiempos cortos. Sin embargo, hay algunas dificultades que pueden surgir a la hora de determinar la conductividad de la solución de los poros. Cualquier solución en los poros debe ser retirada del hormigón para permitir la determinación de su resistividad o el hormigón debe estar presaturado con una solución de conductividad conocida.

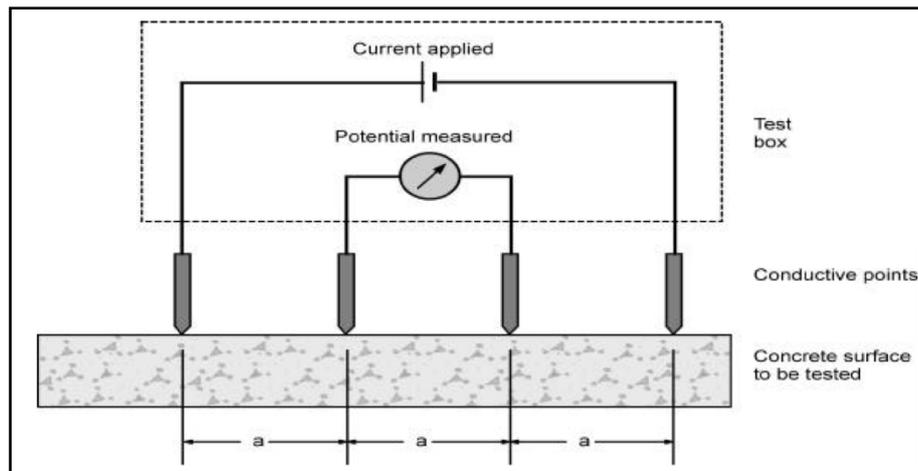


Figura 42: Sondeo de matriz de Wenner

La presaturación del hormigón con una solución de conductividad conocida requiere que primero se seque la muestra. Dependiendo del hormigón y de la técnica de secado, este puede conducir a daños de la estructura de poros debido a la microfisuración y por lo tanto puede causar un aumento de la difusión. También puede ser difícil conseguir que la solución en el hormigón sea uniforme, normalmente se usan técnicas de saturación al vacío, pero incluso estas pueden no saturar completamente el hormigón de alta calidad. La solución de los poros del hormigón contiene normalmente una amplia gama de iones (principalmente hidróxidos alcalinos), algunos de los cuales precipitarán cuando se seque el hormigón. Cuando una solución entra en el hormigón, los iones precipitados luego vuelven a la solución y por lo tanto pueden afectar a su conductividad. Por lo tanto, se utilizará normalmente una solución altamente conductora, por ejemplo NaCl 5M. Esta técnica tiene la ventaja de asegurar condiciones de estado estacionario alcanzados desde el inicio del procedimiento de la prueba.

La determinación de la conductividad de la solución de los poros después de la prueba también tiene inconvenientes. Es poco probable que sean alcanzadas las condiciones de estado estacionario, lo que requiere un análisis más complicado, para los hormigones de alta calidad puede que sea difícil extraer la solución de los poros de una muestra. Por último, las técnicas de resistividad se basan en medidas eléctricas y la inclusión de materiales conductores seguirá siendo un problema.

- **Técnicas de penetración por presión**

Otro método para acelerar el flujo de iones cloruro en el hormigón es mediante la exposición de una cara del hormigón a una solución que contiene cloruros y que esté bajo presión. Esto servirá para conducir los cloruros en el hormigón tanto en virtud de convección y difusión, y se rige por la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} \quad (24)$$

donde  $v$  es la velocidad lineal promedio del flujo, determinada mediante:

$$v = - \frac{k \partial h}{n \partial x} \quad (25)$$

donde  $k$  es la permeabilidad hidráulica,  $n$  es la porosidad y  $h$  es la altura de presión aplicada. La solución a esta ecuación diferencial es:

$$\frac{C_{x,t}}{C_s} = 0,5 \left[ \operatorname{erfc} \left( \frac{x-vt}{2\sqrt{Dt}} \right) + \exp \left( \frac{vx}{D} \right) \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] \quad (26)$$

Esto permite la determinación de los coeficientes de difusión de cloruros, si el perfil de cloruros se conoce en un momento específico.

La prueba del hormigón para la penetrabilidad de cloruros utilizando un método de penetración a presión es similar a la determinación de la permeabilidad al agua usando una célula de presión (Figura 43). La muestra de hormigón se presatura con agua y se coloca en una celda de permeabilidad. Se tiene especial cuidado para asegurar un sello adecuado alrededor de los lados de la célula y evitar fugas. Una solución que contiene cloruros se coloca en una de las caras del hormigón y se aplica una presión. Esta presión se mantiene durante un período de tiempo dado, después del cual se retira la muestra de hormigón de la célula y se realiza la prueba de cloruros que se describe a continuación.

Este método puede ser utilizado de dos maneras. En primer lugar, la solución de la ecuación diferencial se puede montar a un perfil de cloruros, aunque este concepto tiene la desventaja de requerir el perfil cloruros y una gran complejidad numérica. La alternativa es determinar la profundidad de penetración de una concentración conocida de cloruros en un momento específico. Esta profundidad de penetración puede ser determinada usando una técnica colorimétrica, como el procedimiento de pulverización de nitrato de plata descrito anteriormente en "The Rapid Migration Test (CTH Test)" o en "NordTest NTBuild 492". Este valor también puede ser usado para determinar la permeabilidad al agua usando la ecuación de Valenta:

$$k = \frac{nlx_d}{th} \quad (27)$$

donde  $k$  es la conductividad hidráulica,  $n$  es la porosidad,  $l$  es la longitud de la muestra,  $x_d$  es la profundidad de penetración de cloruros,  $t$  es el tiempo durante el cual se aplicó presión y  $h$  es la cabeza aplicada.

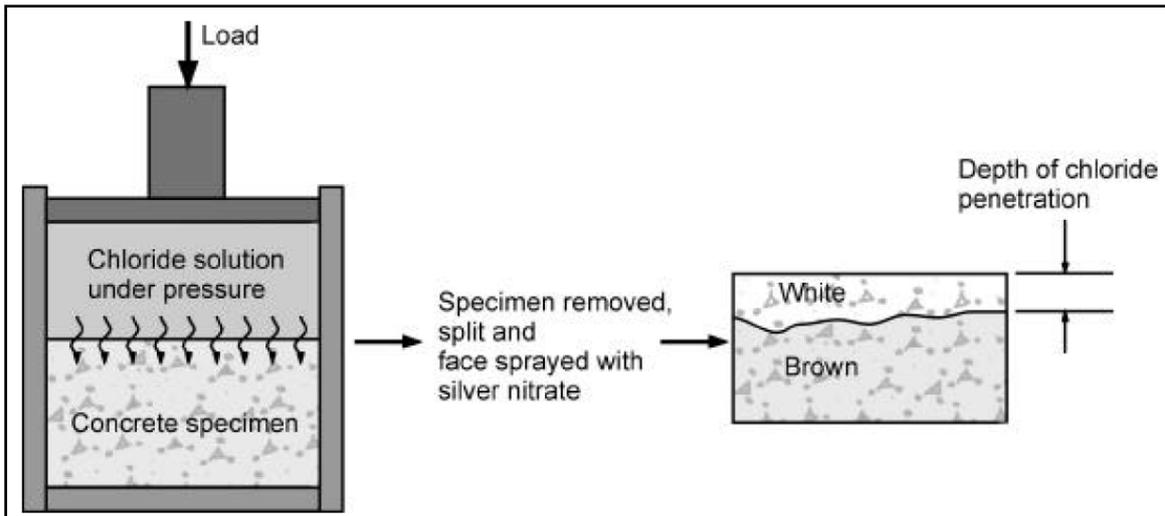


Figura 43: Prueba de penetración por presión

- **Técnicas de medición indirectas**

La permeabilidad del hormigón ha sido una propiedad de interés durante mucho tiempo. Ha habido muchos métodos utilizados para evaluar tanto la permeabilidad al agua como del gas y la mayoría de ellos se basan en consideraciones de flujo de Darcy.

La permeabilidad a los líquidos (normalmente agua) se mide generalmente en una de estas dos maneras: la profundidad de penetración en un tiempo dado o con la tasa de entrada o salida, además la variación de la tasa de entrada o salida con el tiempo también se puede medir. Esta información permite el cálculo de coeficientes de permeabilidad utilizando la ecuación de Darcy (usando entrada o salida) o la ecuación Valenta (profundidad de penetración). La permeabilidad calculada depende de la viscosidad del fluido que se utiliza para medir.

La medición de la permeabilidad del hormigón a los gases utiliza una técnica similar, aunque la fórmula para calcular también incluye el efecto de la presión, ya que la permeabilidad de un gas es fuertemente dependiente de la presión a la que se mide.

Aunque se han desarrollado muchas técnicas que son capaces de medir la permeabilidad del hormigón a gases o líquidos, estas no son adecuadas para evaluar la capacidad de hormigón para resistir la penetración de cloruros.

- Absorción

La capacidad de absorción del hormigón es una magnitud que mide el flujo no saturado de líquidos en el hormigón, es una medida de las fuerzas capilares ejercidas por la estructura de poros provocando que los líquidos se atraigan al cuerpo del material. Aunque teóricamente es posible considerar el flujo de cualquier geometría, es demasiado compleja matemáticamente para ser de alguna utilidad práctica, excepto cuando hay unas condiciones de flujo dimensionales.

Por un flujo dimensional, se puede afirmar que:

$$i = S \cdot t^{1/2} \quad (28)$$

donde  $i$  es la absorción de agua acumulada por unidad de área de superficie de entrada,  $S$  es la capacidad de absorción y  $t$  es el tiempo transcurrido. En una situación de laboratorio donde la muestra de hormigón se puede secar de manera consistente y las condiciones de flujo pueden estar bien definidas, es relativamente fácil de conseguir una buena línea de ajuste mediante regresión de mínimos cuadrados al trazar  $i$  con la raíz cuadrada del tiempo.

La determinación de la capacidad de absorción de una muestra en el laboratorio es una técnica de tecnología simple, ilustrada en la figura 44. De acuerdo con la norma ASTM, lo único que se requiere es una escala, un cronómetro y un recipiente poco profundo de agua. La muestra se acondiciona previamente a una cierta condición de humedad, ya sea por secado de la muestra durante 7 días en un horno de 50°C o por secado durante 4 días a 50°C y luego se deja enfriar en un recipiente sellado durante tres días, con los lados sellados de la muestra de hormigón.

Se toma la masa inicial de la muestra y en el tiempo 0 se sumerge a una profundidad de 5-10mm en el agua. En tiempos seleccionados (normalmente 1, 2, 3, 4, 5, 9, 12, 16, 20 y 25 minutos) la muestra se retira del agua, el cronómetro se detiene, el exceso de agua se transfiere a una toalla de papel húmeda y se pesa la muestra, así hasta terminar las pruebas. El aumento de la masa por unidad de área sobre la densidad del agua se representa frente a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido. La pendiente de la línea de mejor ajuste de estos puntos (ignorando el origen) se describe como la capacidad de absorción.

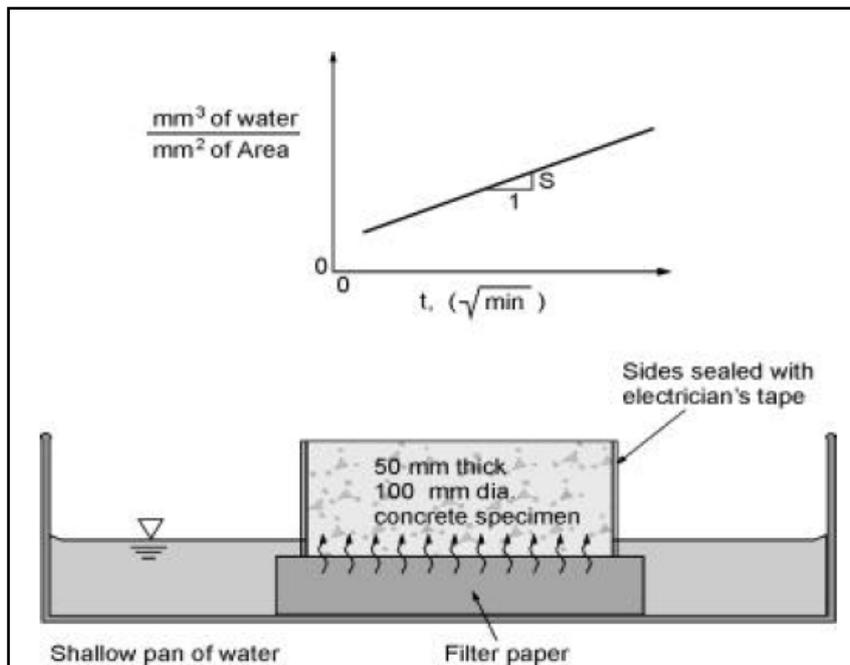


Figura 44: Técnica de absorción en laboratorio

En la Universidad de Toronto se desarrolló un método para determinar la capacidad de absorción de los hormigones en el campo. El aparato usado se muestra en la figura 45, dicho dispositivo consiste en un anillo de protección exterior que se sujeta a la superficie a ensayar mediante vacío. Este anillo define una región de la prueba y satura el hormigón alrededor de esta para proporcionar un flujo unidireccional. Una placa interior a través de la cual el agua puede ser suministrada se une al hormigón (ilustración inferior de la ilustración). La cantidad de agua que fluye en el hormigón se determina a diversos intervalos de tiempo con una pipeta graduada (parte superior de la ilustración). El contenido de humedad del hormigón también se determina en el momento de la prueba para permitir un ajuste a una condición estándar.

Las pruebas de absorción son capaces de evaluar hormigones que contienen materiales conductores pero tiene sus limitaciones: sólo es capaz de evaluar la superficie del hormigón, la capacidad de absorción del hormigón se ve afectada sólo por las condiciones de la superficie y los resultados de estas pruebas pueden ser útiles si el acero es muy superficial pero para profundidades típicas de acero utilizadas para el alto rendimiento en estructuras durables esto no suele ser el caso.

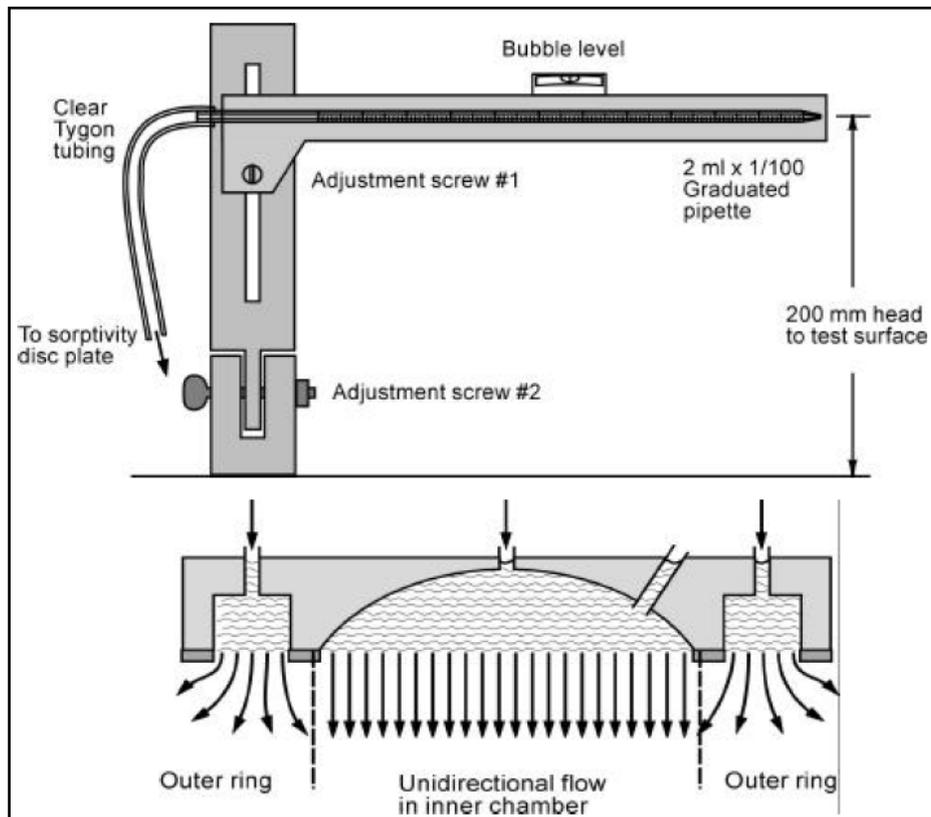


Figura 45. Aparato de absorción

Otra dificultad es la dependencia de la capacidad de absorción en el contenido de humedad de la muestra. Este no es un problema en una situación de laboratorio, pero para una prueba de campo el contenido de humedad variable podría alterar drásticamente los resultados. Cuando una muestra se expone inicialmente al agua, que absorbe el agua a raíz de la relación anterior con alguna capacidad de absorción inicial, se denomina  $S_i$ . Después de algún tiempo, sin embargo, habrá un cambio de este valor y luego la absorción adicional seguirá la misma relación con otra capacidad de

absorción, denominada  $S_f$ . Este cambio se ha atribuido a la dominación inicial de los poros capilares más grandes que resulta en un valor de absorción mayor hasta que se llenan, después del cual los poros del gel más pequeños dominan con sus efectos más bajos de absorción.

- Otros métodos

Hay otros dos métodos de ensayo para la determinación de la difusión de cloruros en el hormigón. Estos métodos utilizan otra sustancia para que se difunda en el hormigón y relacionar los valores obtenidos para conseguir la difusión de los iones cloruro.

El primer método, propuesto por Feldman, R.F. [91], usa la medición de la difusión de propan-2-ol en una pasta de cemento saturada. Se controla el cambio de peso de una pasta saturada de agua inicialmente sumergiéndola en propan-2-ol. Las probetas utilizadas (pastas de 0.3 a 1.0, y 1.14 mm de espesor) se controlaron de 3 a 7 días. La monitorización del cambio de peso permite la determinación de la difusión de propan-2-ol en la pasta de cemento, que afirma que es similar a la de los iones de cloruro.

Sharif et al. [92] propusieron un método relativo a la difusión de un gas a través del hormigón y a la penetración de cloruros en él. Proponen el uso de una plataforma de pruebas de dos cámaras con una muestra de hormigón como pared divisoria. Una cámara se llena con gas nitrógeno mientras que la otra cámara se llena con gas helio a una presión específica. Las concentraciones de ambos gases son monitoreadas en cada célula y cualquier presencia de otro gas en una célula es debido a la difusión del gas a través del hormigón. La relación de la porosidad del hormigón con la tortuosidad de este se puede calcular y esta relación se considera que es independiente del material que pasa a través de la estructura de poros. Por lo tanto, la difusión de cloruros a través del hormigón y la difusión de cloruros en el agua es una función de esta relación. Los valores mostrados en su artículo comparan los coeficientes de difusión determinados a partir de encharcamiento con cloruros y los determinados por la difusión del gas y revelan una correlación excelente.

La técnica de reemplazo de propan-2-ol sólo se ha realizado en pastas de cemento muy delgadas y puede que no sea posible llevar a cabo esta técnica en muestras de hormigón representativas en un período realista. En la técnica de difusión de gas, puede ser difícil sellar adecuadamente los lados del hormigón y otra dificultad añadida es que las matemáticas involucradas en la determinación de valores útiles son complejas, además el concepto de que la porción de pasta de cemento de hormigón presenta los mismos valores de porosidad a muy diferentes iones (por ejemplo, helio, nitrógeno, cloruro) es cuestionable. Finalmente, ninguna de estas técnicas en modo alguno considera los efectos de la unión de cloruros.

Tabla 14: Resumen de los diferentes métodos de determinación

Test Method		Consideran iones cloruro en movimiento	Temp. Cte.	Se ve afectado por conductores en hormigón	Duración aproximada de la prueba
Larga duración	AASHTO T259	SI	SI	NO	90 días después del curado y acondicionamiento
	Nordtest NTB 443	SI	SI	NO	40 - 120 días después del curado y acondicionamiento
	UNE 112010: 2011	NO	SI	NO	90 días después del curado
Corta duración	RCPT T277	NO	NO	SI	6 Horas
	Migración eléctrica	SI	SI	SI	Depende del voltaje y del hormigón
	Nordtest NTB 492	SI	SI	SI	6 - 96 horas dependiendo del voltaje
	Rapid Migration (CTH)	SI	SI	SI	8 horas
	Resistividad	NO	SI	SI	30 minutos
	Penetración por presión	SI	SI	NO	Depende de la presión y del hormigón
Otros	Absorción-Lab	NO	SI	NO	1 semana incluyendo acondicionamiento
	Absorción-Campo	NO	SI	NO	30 minutos
	Propan-2-ol	NO	SI	NO	14 días
	Difusión de gas	NO	SI	NO	2 - 3 horas

ANEXO 2: Recopilación de artículos para  
la predicción de datos

### **ARTÍCULO-1º [93]**

**Nombre del artículo:** Chloride penetration into concrete in marine environment - Part I: Main parameters affecting chloride penetration.

**Autor:** A. Costa and J. Appleton.

**Técnica de determinación de cloruros:** Contenido total de cloruros y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland) 32.5.

**Relaciones agua/cemento:** C1 (0,5) – C2 (0,3) – C3(0,35).

**Ambiente:** Salpicaduras, Marea, Humedad atmosférica, Astillero 20 (22 ciclos llenado/vaciado) y Astillero 21 (120 ciclos llenado/vaciado).

Tabla 1: Coeficientes de difusión				
Mezcla de hormigón		C1	C2	C3
Condiciones de exposición	Tiempo (MESES)	D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]
A- Salpicaduras	6	4,83	2,34	2,08
	9	3,65	1,7	1,52
	12	2,75	1,48	1,24
	15	2,63	1,45	1,33
	18	2,66	1,42	1,01
	24	2,3	1,2	1,15
	30	1,92	1,02	0,92
	36	1,87	1,05	0,88
B- Marea	6	9,45	-	-
	9	5,36	-	-
	12	4,98	-	-
	15	4,17	-	-
	18	4,57	-	-
	24	3,8	-	-
	30	2,92	-	-
	36	2,82	-	-
C- Humedad atmos.	12	1,23	-	-
	15	1,03	-	-
	18	1,06	0,65	-
	24	0,97	0,64	0,5
	30	0,75	0,53	0,48
	36	0,76	0,55	0,43
	42	0,74	0,48	0,4
	48	0,68	0,47	0,39

D- 22 ciclos	6	4,44	-	-
	9	3,32	-	-
	12	2,82	1,41	-
	15	2,89	1,12	0,87
	18	2,24	1,06	0,74
	24	2,43	0,94	0,7
	30	2,15	0,99	0,59
	36	1,82	0,79	0,57
	42	1,68	0,76	0,58
	48	1,7	0,78	0,55
E- 120 ciclos	10	-	-	4,12
	18	-	-	2,2
	21	-	-	2
	24	-	-	1,91
	27	-	-	1,95
	30	-	-	1,84
	36	-	-	1,69
	42	-	-	1,46
	48	-	-	1,32
	54	-	-	1,36
	60	-	-	1,29

Chemical composition	%
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	19.58
Aluminium trioxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.04
Ferric trioxid (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.10
Calcium oxide (CaO)	60.53
Magnesium oxide (MgO)	3.06
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	1.89
Free lime (CaO)	1.76
Mineral composition	%
C <sub>3</sub> S	53.86
C <sub>2</sub> S	15.58
C <sub>3</sub> A	8.12
C <sub>4</sub> AF	9.42
Physical properties	
Specific surface (blaine)	3170 cm <sup>2</sup> /g
Specific density	3.14 g/cm <sup>3</sup>

Mix type	C1	C2	C3
Cement, kg/m <sup>3</sup>	300	425	500
Sand, kg/m <sup>3</sup>	822	677	
Aggregate I, kg/m <sup>3</sup>	500	481	
Aggregate II, kg/m <sup>3</sup>	631	750	
Aggregate III, kg/m <sup>3</sup>			1704
Microsilica, kg/m <sup>3</sup>			21.5
Superplasticiser, kg/m <sup>3</sup>		10.2	
W/C ratio	0.5	0.3	0.35*
Slump, mm	70	170	
Dry density, kg/dm <sup>3</sup>	2.33	2.41	2.32
Compressive strength, MPa	34	54	66

Tabla 1.2: Coeficientes de difusión $D_1[x10^{-12} m^2/s]$ 1 Año (Media)				
	Condiciones de exposición	Mezcla de hormigón	Valor $D_1$	A/C
CEM I 32.5	Salpicaduras	C1	3,13	0,5
		C2	1,64	0,3
		C3	1,42	0,35
	Marea	C1	5,18	0,5
	Humedad atmosférica	C1	1,29	0,5
		C2	0,89	0,3
		C3	0,75	0,35
	Astillero 20, 22 ciclos	C1	3,13	0,5
		C2	1,40	0,3
		C3	1,00	0,35
	Astillero 21, 120 ciclos	C3	2,88	0,35

#### ARTÍCULO-2º [94]

**Nombre del artículo:** Precision of the Nordic test methods for measuring the chloride diffusion/migration coefficients of concrete.

**Autor:** L. Tang and H. E. Sorensen.

**Técnica de determinación de cloruros:** NT BUILD 355, NT BUILD 443 y CTH Rapid Test.

**Tipo de cemento:** A (CEM II/A-D), B(CEM I (Portland)), C (CEM III/B).

**Relaciones agua/cemento:** A (0,4) – B (0,5) – C (0,5).

**Ambiente:** Laboratorio.

NT BUILD 355	28 días
NT BUILD 443	35 días
CTH Rapid Test	60 días

Mix	Binder type	Water-binder ratio	Binder content	Aggregate content	Admixture wt% of binder	Compr. Strength* MPa
A	92%(wt) SRPC + 8%(wt) silica fume (slurry) corresp. to CEM II/A-D	0.4	420	1860	0.8 (Cementa 92M)	82.6
B	100% SRPC corresp. to CEM I	0.5	380	1860	0	63.2
C	Dutch slag cement containing ~70%(wt) slag, corresp. to CEM III/B	0.5	390	1860	0	45.1

\* At the age 28 days according to the Swedish Standard SS 13 72 10.

El cemento utilizado es un cemento portland resistente a sulfatos (SRPC) y en este artículo intervienen 9 tipos de laboratorios.

Tabla 2: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]									
Lab. No.	NT BUILD 355			NT BUILD 443			The CTH Rapid Test		
	MIX A	MIX B	MIX C	MIX A	MIX B	MIX C	MIX A	MIX B	MIX C
1	-	-	-	2,9	18	1,7	2,7	20	2,9
	-	-	-	2,9	13	1,9	2,8	19	2,5
	-	-	-	2,4	16	1,8	2,7	19	2,8
2	-	-	-	-	12	-	-	-	-
	-	-	-	-	15	-	-	-	-
	-	-	-	-	13	-	-	-	-
3	-	-	-	-	8,1	-	-	-	-
	-	-	-	-	10	-	-	-	-
	-	-	-	-	14	-	-	-	-
4	0,25	1,6	0,084	4,4	34	2,1	3	20	2,9
	0,24	1,4	0,083	6,4	16	2,3	2,8	19	2,4
	0,2	1,7	0,086	3,4	19	2,5	2,9	20	2,4
5	0,067	1,1	0,041	-	19	-	-	-	-
	0,054	1,3	0,037	-	19	-	-	-	-
	0,069	1,1	0,036	-	17	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	3,6	19	3
	-	-	-	-	-	-	2,8	16	2,8
	-	-	-	-	-	-	2,6	16	2,5
7	0,051	1,5	-	-	17	-	3,4	19	3,4
	0,028	1,5	-	-	14	-	3	18	3,3
	0,023	1,6	-	-	15	-	3,6	18	3,5
8	-	-	-	-	-	-	3,3	16	1,8
	-	-	-	-	-	-	3,2	15	1,8
	-	-	-	-	-	-	3	15	2
9	-	-	-	-	-	-	3,7	23	1,9
	-	-	-	-	-	-	3,6	22	1,7
	-	-	-	-	-	-	3,3	21	2,2
Media	0,11	1,42	0,06	3,73	16,06	2,05	3,11	18,61	2,54

Tabla 2.1: Coeficientes de difusión D <sub>1</sub> [x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s] 1 Año									
Tipo	CEM II/A-D	CEM I	CEM III/B	CEM II/A-D	CEM I	CEM III/B	CEM II/A-D	CEM I	CEM III/B
A/C	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
D <sub>1</sub>	0,03	0,39	0,02	1,16	4,97	0,63	1,26	7,55	1,03

He decidido quitar los resultados de la prueba de NTB 355 porque difieren bastante de los resultados de las otras pruebas.

### ARTÍCULO-3º [95]

**Nombre del artículo:** Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste.

**Autor:** K.O. Ampadu, K. Torii y M. Kawamura.

**Técnica de determinación de cloruros:** AASHTO T277, ASTM C-1202 (Rapid Chloride Permeability test).

0,3N NaOH – 3% NaCl – 12V.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/A-V y CEM II/B-V.

**Relaciones agua/cemento:** 0,35 – 0,45 – 0,55 – 0,65.

**Ambiente:** Laboratorio.

Table 1  
Chemical compositions of OPC and fly ash (%)

Type	Ig. loss	Insol	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total
OPC	1.6	0.3	21.7	5.3	2.9	63.7	1.2	2.1	0.33	0.54	99.67
Fly ash	1.49	63.14	28.75	2.59	1.08	0.63	<0.01	0.55	0.39	1.04	99.66

Tabla 3: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]							
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad			
				7 DÍAS	28 DÍAS	91 DÍAS	365 DÍAS
1	I	-	0,35	0,304	-	-	-
2	I	-	0,45	0,747	1,04	0,861	2,586
3	I	-	0,55	3,198	2,737	0,8989	3,703
4	I	-	0,65	4,663	3,166	2,662	6,336
5	II/A-V	20	0,35	1,546	-	-	-
6	II/A-V	20	0,45	4,08	2,445	1,395	0,5073
7	II/A-V	20	0,55	5,17	3,731	1,801	0,6462
8	II/A-V	20	0,65	5,486	4,812	2,114	1,732
9	II/B-V	40	0,35	3,101	-	-	-
10	II/B-V	40	0,45	6,278	2,977	1,35	0,4069
11	II/B-V	40	0,55	11,19	4,861	1,652	0,3695
12	II/B-V	40	0,65	17,13	5,848	1,727	0,5085

En este artículo he tenido que pasar el coeficiente de difusión a m<sup>2</sup>/s porque el artículo nos lo proporciona en cm<sup>2</sup>/s, ya que en casi todos los artículos nos los proporcionan así.

Tabla 3.2: Coeficientes de difusión $D_1$ [ $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ] 1 Año (Media)				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
1	I	-	0,35	0,042
2	I	-	0,45	0,852
3	I	-	0,55	1,338
4	I	-	0,65	2,297
5	II/A-V	20	0,35	0,214
6	II/A-V	20	0,45	0,612
7	II/A-V	20	0,55	0,824
8	II/A-V	20	0,65	1,220
9	II/B-V	40	0,35	0,429
10	II/B-V	40	0,45	0,694
11	II/B-V	40	0,55	1,023
12	II/B-V	40	0,65	1,341

#### ARTÍCULO-4º [96]

**Nombre del artículo:** An experimental study on the properties of resistance to diffusion of chloride ions of fly ash and blast furnace slag concrete.

**Autor:** Faguang Leng, Naiqian Feng y Xinying Lu.

**Técnica de determinación de cloruros:** Ecuación de Nernst-Einstein.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/A-V y CEM III/A.

**Relaciones agua/cemento:** 0,34 – 0,3 – 0,26.

**Ambiente:** Laboratorio (28 días).

Table 1  
Chemical composition of cement and additives (%)

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Cement	62.48	24.36	5.40	2.44	0.33	0.92	0.14	/	/	3.63	0.21
Fly ash	3.87	57.57	21.91	1.68	1.54	2.51	0.41	/	0.16	9.56	0.91
Blast furnace slag	40.39	33.56	11.40	11.20	0.57	0.57	/	0.09	0.05	0.33	/

Physical properties of cement and additives

	Cement	Fly ash	Blast furnace slag
Density (kg/m <sup>3</sup> )	3110	2300	2910
Specific surface area (m <sup>2</sup> /kg)	360	580	410

Mix proportion of concrete (the first part)

No.	W/C	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Additive (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (%)	Notes
1-1	0.34	500	/	170	640	1150	1.0	control
1-2		400	100					fly ash
1-3		350	150					blast furnace slag
2-1	0.30	550	/	165	640	1120	1.5	control
2-2		440	110					fly ash
2-3		385	165					blast furnace slag
3-1	0.26	660	/	156	620	1100	1.8	control
3-2		480	120					fly ash
3-3		120	180					blast furnace slag

Mix proportion of concrete (the second part)

No.	W/C	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Additive (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (%)	Notes
2-2-1	0.30	495	55	165	640	1120	1.5	fly ash
2-2-3		385	165					
2-2-4		330	220					
2-3-1		495	55					blast furnace slag
2-3-2		440	110					
2-3-4	330	220						
2-3-5	275	275						

Tabla 4: Coeficientes de difusión D[x10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s]

Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Datos
1	I	-	0,34	0,536
2	I	-	0,3	0,261
3	I	-	0,26	0,2441
4	II/A-V	20	0,34	0,3137
5	II/A-V	20	0,3	0,227
6	II/A-V	20	0,26	0,217
7	III/A	30	0,34	0,2819
8	III/A	30	0,3	0,147
9	III/A	30	0,26	0,128

Tabla 4.1: Coeficientes de difusión D[x10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s]

Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Datos
1	II/A-V	10	0,3	0,383
2	II/B-V	30	0,3	0,359
3	II/B-V	40	0,3	0,316
4	III/A	10	0,3	0,415
5	III/A	20	0,3	0,228
6	III/A	40	0,3	0,159
7	III/A	50	0,3	0,145

Tabla 4.1: Coeficientes de difusión  $D_1$  [ $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ] 1 Año

Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
1	I	-	0,34	0,148
2	I	-	0,3	0,072
3	I	-	0,26	0,068
4	II/A-V	20	0,34	0,087
5	II/A-V	20	0,3	0,063
6	II/A-V	20	0,26	0,060
7	III/A	30	0,34	0,078
8	III/A	30	0,3	0,041
9	III/A	30	0,26	0,035

Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
1	II/A-V	10	0,3	0,106
2	II/B-V	30	0,3	0,099
3	II/B-V	40	0,3	0,088
4	III/A	10	0,3	0,115
5	III/A	20	0,3	0,063
6	III/A	40	0,3	0,044
7	III/A	50	0,3	0,040

#### **ARTÍCULO-5º [97]**

**Nombre del artículo:** Determination of diffusion coefficient of chloride in concrete using Warburg diffusion coefficient.

**Autor:** R. Vedalakshmi, V. Saraswathy, Ha-Won Song y N. Palaniswamy.

**Técnica de determinación de cloruros:** Electrochemical Impedance Spectroscopy Technique (EIS) Warburg Impedance, ASTM C-1152 y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/A-W y CEM III/A.

**Relaciones agua/cemento:** 0,67 – 0,54 – 0,42.

**Ambiente:** Laboratorio, agua de mar sintética realizada según ASTM D 1141.

**Table 2**  
Chemical composition and physical properties of three types of cement.

Compound	Ordinary Portland cement (wt%)	Portland Pozzolana cement (wt%)	Portland slag cement (wt%)
Silicon-di-Oxide (SiO <sub>2</sub> )	20–21	28–32	26–30
Aluminium Oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5.2–5.6	7.0–10.0	9.0–11.0
Ferric Oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	4.4–4.8	4.9–6.0	2.5–3.0
Calcium oxide (CaO)	62–63	41–43	44–46
Magnesium oxide (MgO)	0.5–0.7	1.0–2.0	3.5–4.0
Sulphur-tri-Oxide (SO <sub>3</sub> )	2.4–2.8	2.4–2.8	2.4–2.8
Loss on ignition	1.5–2.5	3.0–3.5	1.5–2.5
<i>Bogue compound composition:</i>			
Tricalcium Silicate (C <sub>3</sub> S)	42–45	Not applicable	Not applicable
Dicalcium Silicate (C <sub>2</sub> S)	20–30	-do-	-do-
Tricalcium Aluminate (C <sub>3</sub> A)	7.0–9.0	-do-	-do-
Tetra Calcium Alumino Ferrite (C <sub>4</sub> AF)	11–13	-do-	-do-
<i>Physical Properties:</i>			
Pozzalanic Material used	–	Fly ash 20 wt%	GGBS 50 wt%
28 Day Compressive Strength (MPa)	62	48	53
Fineness (m <sup>2</sup> kg <sup>-3</sup> )	295	363	385

Details of concrete mix proportion.

Grade	Type of cement	w/c ratio	Cement (kg m <sup>-3</sup> )	Fine aggregate (kg m <sup>-3</sup> )	Coarse aggregate (kg m <sup>-3</sup> )	Characteristic compressive strength (MPa)
20 MPa	OPC	0.67	284	770	1026	27
	PPC	0.67	284	770	1026	23
	PSC	0.67	284	770	1026	28
30 MPa	OPC	0.54	352	739	1026	37
	PPC	0.54	352	739	1026	31
	PSC	0.54	352	739	1026	39
40 MPa	OPC	0.42	452	655	1026	54
	PPC	0.42	452	655	1026	42
	PSC	0.42	452	655	1026	48

20% Fly ash
50% GGBF

Tabla 5: Coeficientes de difusión $D[x10^{-12}m^2/s]$					
	Mezcla	CEM	A/C	$D_{wI}$	$D_{FL}$
20 MPa	OPC	I	0,67	4,84	2
	PPC	II/A-W	0,67	2,92	1,05
	PSC	III/A	0,67	1,21	1,2
30 MPa	OPC	I	0,54	3,67	1,45
	PPC	II/A-W	0,54	2	1,65
	PSC	III/A	0,54	1,46	0,62
40 MPa	OPC	I	0,42	2,23	1,5
	PPC	II/A-W	0,42	0,094	1,81
	PSC	III/A	0,42	0,141	0,59

En este caso la ceniza volante es calcárea, distinta a la ceniza volante que usa la normativa que es sílicea, por lo que no las podemos comparar y por lo tanto usamos para ampliar nuestra tabla.

Tabla 5.1: Coeficientes de difusión $D_1[x10^{-12}m^2/s]$ 1 Año					
Hormigón	Mezcla	CEM	A/C	$D_{wI}$	$D_{FL}$
20 MPa	OPC	I	0,67	8,53	3,53
	PPC	II/A-W	0,67	5,15	1,85
	PSC	III/A	0,67	2,13	2,12
30 MPa	OPC	I	0,54	6,47	2,56
	PPC	II/A-W	0,54	3,53	2,91
	PSC	III/A	0,54	2,57	1,09
40 MPa	OPC	I	0,42	3,93	2,65
	PPC	II/A-W	0,42	0,17	3,19
	PSC	III/A	0,42	0,25	1,04

## ARTÍCULO-6º [98]

**Nombre del artículo:** Concrete durability presented by acceptable chloride level and chloride diffusion coefficient in concrete: 10-year results in marine site.

**Autor:** T. Cheewaket, C. Jaturapitakkul y W. Chalee.

**Técnica de determinación de cloruros:** ASTM C-1218 y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/A-V y CEM II/B-V.

**Relaciones agua/cemento:** 0,45-0,55-0,65.

**Ambiente:** Marea.

**Table 1** Chemical composition of Portland cement and fly ash

Chemical compositions by weight (%)	Sample	
	Cement type I	Fly ash (FA)
Silicon dioxide, SiO <sub>2</sub>	20.80	44.95
Aluminum oxide, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.50	23.70
Iron oxide, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.16	10.80
Calcium oxide, CaO	64.97	13.80
Magnesium oxide, MgO	1.06	3.47
Sodium oxide, Na <sub>2</sub> O	0.08	0.07
Potassium oxide, K <sub>2</sub> O	0.55	2.38
Sulfur trioxide, SO <sub>3</sub>	2.96	1.31
Loss on ignition, LOI	2.89	0.52
Tricalcium silicate, C <sub>3</sub> S	56.50	–
Dicalcium silicate, C <sub>2</sub> S	17.01	–
Tricalcium aluminate, C <sub>3</sub> A	9.23	–
Tetracalcium aluminoferrite, C <sub>4</sub> AF	9.62	–

Mix	Mixture proportions of concretes (kg/m <sup>3</sup> )					W/B
	Cement type I	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	
I45	478	–	639	1,024	215	0.45
I55	478	–	639	971	262	0.55
I65	478	–	639	922	311	0.65
I45FA 15	406	72	639	1,004	215	0.45
I45 FA 25	359	119	639	990	215	0.45
I45 FA 35	311	167	639	977	215	0.45
I45 FA 50	239	239	639	957	215	0.45
I55 FA 15	406	72	639	948	262	0.55
I55 FA 25	359	119	639	933	262	0.55
I55 FA 35	311	167	639	918	262	0.55
I55 FA 50	239	239	639	897	262	0.55
I65 FA 15	406	72	639	898	311	0.65
I65 FA 25	359	119	639	881	311	0.65
I65 FA 35	311	167	639	864	311	0.65
I65 FA 50	239	239	639	840	311	0.65

Tabla 6: Coeficientes de difusión $D[x10^{-12}m^2/s]$				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad
				120 Meses
I45	I	-	0,45	3,65
I55	I	-	0,55	6,08
I65	I	-	0,65	7,33
I45 FA15	II/A-V	15	0,45	1,55
I45 FA25	II/B-V	25	0,45	1,25
I45 FA35	II/B-V	35	0,45	0,95
I45 FA50	II/B-V	50	0,45	0,5
I55 FA15	II/A-V	15	0,55	2,34
I55 FA25	II/B-V	25	0,55	1,56
I55 FA35	II/B-V	35	0,55	1,23
I55 FA50	II/B-V	50	0,55	0,65
I65 FA15	II/A-V	15	0,65	2,55
I65 FA25	II/B-V	25	0,65	2,07
I65 FA35	II/B-V	35	0,65	1,75
I65 FA50	II/B-V	50	0,65	1,22

En este caso el problema que tenemos es que los resultados son a los 10 años, lo que se diferencia mucho de la EHE-08, donde los resultados están tomados a 28 días.

Tabla 6.1: Coeficientes de difusión $D_1[x10^{-12}m^2/s]$ 1 Año				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
I45	I	-	0,45	11,54
I55	I	-	0,55	19,23
I65	I	-	0,65	23,18
I45 FA15	II/A-V	15	0,45	4,90
I45 FA25	II/B-V	25	0,45	3,95
I45 FA35	II/B-V	35	0,45	3,00
I45 FA50	II/B-V	50	0,45	1,58
I55 FA15	II/A-V	15	0,55	7,40
I55 FA25	II/B-V	25	0,55	4,93
I55 FA35	II/B-V	35	0,55	3,89
I55 FA50	II/B-V	50	0,55	2,06
I65 FA15	II/A-V	15	0,65	8,06
I65 FA25	II/B-V	25	0,65	6,55
I65 FA35	II/B-V	35	0,65	5,53
I65 FA50	II/B-V	50	0,65	3,86

**ARTÍCULO-7º [99]**

**Nombre del artículo:** In situ study of chloride ingress in concretes containing natural zeolite, metakaolin and silica fume exposed to various exposure conditions in a harsh marine environment.

**Autor:** Mahdi Valipour , Farhad Pargar, Mohammad Shekarchi, Sara Khani y Masoud Moradian.

**Técnica de determinación de cloruros:** ASTM C-114, C-1152 y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland) y CEM II/A-V.

**Relaciones agua/cemento:** 0,35 – 0,4 – 0,45 – 0,5.

**Ambiente:** Marea y salpicadura.

Composition of cement, silica fume, metakaolin and zeolite (%).

	Cement	Silica fume	Metakaolin	Zeolite
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> )	21	93.16	51.58	67.79
Aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5	1.13	43.87	13.66
Ferric oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	3.5	0.72	0.99	1.44
Calcium oxide (CaO)	63	-	0.2	1.68
Magnesium oxide (MgO)	1.8	1.6	0.18	1.2
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0.5	-	0.01	2.04
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0.6	-	0.12	1.42
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> )	1.6	0.05	-	0.5
Loss on ignition	2	1.58	0.57	10.32

Details of the concrete mixtures.

Code	w/b	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Binder (kg/m <sup>3</sup> )				Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Slump (cm)
			Cement	SF	MK	NZ		
C1	0.35	140	400	-	-	-	0.35	8
C2	0.40	140	400	-	-	-	0.2	7
C3	0.45	140	400	-	-	-	0.1	15
C4	0.50	140	400	-	-	-	0	18
SF5	0.40	140	380	20	-	-	1.2	6
MK5	0.40	160	380	-	20	-	0.8	5
ZE10	0.40	160	360	-	-	40	4	6

Tabla 7: Coeficientes de difusión D<sub>1</sub> [x10<sup>-12</sup>m<sup>2</sup>/s]

Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad 1 Año	
				Zona de marea	Zona de salpicadura
				C1	I
C2	I	-	0,4	11,07	6,66
C3	I	-	0,45	10,51	7,88
C4	I	-	0,5	16,25	11,18
SF5	II/A-D	20	0,4	2,39	3,16

## ARTÍCULO-8º [100]

**Nombre del artículo:** On the time dependency of the chloride migration coefficient in concrete.

**Autor:** K. Audenaert, Q. Yuan y G. De Schutter.

**Técnica de determinación de cloruros:** NT BUILD 492. 10% NaCl – 0,3N NaOH.

**Tipo de cemento:** CEM I 42,5 R, CEM I 52,5, CEM III/A 42,5 LA y CEM I 52,5 HSR.

**Relaciones agua/cemento:** 0,37 - 0,4 – 0,41 – 0,46 – 0,48 – 0,49 - 0,55 – 0,6.

**Ambiente:** Laboratorio.

Mix composition.

	CEM I 42.5 R (kg/m <sup>3</sup> )	CEM I 52.5 (kg/m <sup>3</sup> )	CEM III/A 42.5 LA (kg/m <sup>3</sup> )	CEM I 52.5 HSR (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone filler S (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone filler P2 (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/ m <sup>3</sup> )	Water (kg/ m <sup>3</sup> )	Sand 0/5 (kg/ m <sup>3</sup> )	Gravel 4/14 (kg/m <sup>3</sup> )	Limestone gravel 2/14 (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (-)	C/P (-)	Compressive strength (MPa)
SCC1	360					240		165	853	698		0.46	0.60	57.3
SCC2		360				240		165	853	698		0.46	0.60	68.0
SCC3			360			240		165	853	698		0.46	0.60	66.1
SCC4				360		240		165	853	698		0.46	0.60	70.1
SCC5	300					300		165	853	698		0.55	0.50	46.5
SCC6	400					200		165	853	698		0.41	0.67	64.2
SCC7	450					150		165	853	698		0.37	0.75	68.7
SCC8	360				240			165	853	698		0.46	0.60	56.9
SCC9	360						240	165	853	698		0.46	0.60	66.2
SCC10	300					200		137	923	755		0.46	0.60	60.1
SCC11	400					300		192	782	640		0.48	0.57	55.9
SCC12	450					350		220	712	583		0.49	0.56	50.9
SCC13	360					240		144	865	707		0.40	0.60	68.7
SCC14	360					240		198	835	683		0.55	0.60	46.6
SCC15	360					240		216	825	675		0.60	0.60	40.3
SCC16	360					240		165	816		734	0.46	0.60	74.7
TC1	360							165	640	1225		0.46	1.00	48.6
TC2			360					165	640	1225		0.46	1.00	49.7
TC3	400							165	626	1200		0.41	1.00	53.7
TC4				360				165	640	1225		0.46	1.00	50.2

Chemical composition, physical and mechanical properties of cement.

	CEM I 42.5 R	CEM I 52.5	CEM III/A 42.5 LA	CEM I 52.5 HSR
SiO <sub>2</sub> (%)	19.6	20.3	26.1	20.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.0	4.5	7.8	3.6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	3.0	2.3	2.0	3.9
CaO (total) (%)	61.5	64.0	49.3	64.2
MgO (%)	0.8	2.2	5.8	2.4
SO <sub>3</sub> (%)	3.3	3.3	3.0	2.7
Na <sub>2</sub> O (%)	0.4	0.2	0.3	0.2
K <sub>2</sub> O (%)	0.9	0.9	0.7	0.5
C <sub>3</sub> S (%)	58.2	59.0	-	60.6
C <sub>2</sub> S (%)	12.7	12.6	-	16.6
C <sub>3</sub> A (%)	8.2	8.0	-	2.7
C <sub>4</sub> AF (%)	9.1	9.4	-	13.1
Specific surface Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	345	465	415	405
Absolute density (kg/m <sup>3</sup> )	3115	3120	2965	3185
<i>Compressive strength</i>				
2d (N/mm <sup>2</sup> )	27.2	34.1	17.8	32.0
7d (N/mm <sup>2</sup> )	43.5	52.6	37.6	50.2
28d (N/mm <sup>2</sup> )	53.0	61.2	55.2	64.4
<i>Tensile strength</i>				
2d (N/mm <sup>2</sup> )	5.3	6.1	4.0	6.0
7d (N/mm <sup>2</sup> )	7.5	8.2	7.1	8.0
28d (N/mm <sup>2</sup> )	8.5	8.8	9.3	8.6

Tabla 8: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad 12 MESES
SCC1	I 42,5 R	-	0,46	5,55
SCC2	I 52,5	-	0,46	3,31
SCC3	III/A 42,5 LA	40	0,46	1,66
SCC4	I 52,5 HSR	-	0,46	6,59
SCC5	I 42,5 R	-	0,55	8,39
SCC6	I 42,5 R	-	0,41	5,38
SCC7	I 42,5 R	-	0,37	3,09
SCC8	I 42,5 R	-	0,46	4,95
SCC9	I 42,5 R	-	0,46	0,15
SCC10	I 42,5 R	-	0,46	5,09
SCC11	I 42,5 R	-	0,48	6,11
SCC12	I 42,5 R	-	0,49	7,42
SCC13	I 42,5 R	-	0,4	3,65
SCC14	I 42,5 R	-	0,55	9,16
SCC15	I 42,5 R	-	0,6	13,52
SCC16	I 42,5 R	-	0,46	3,99
TC1	I 42,5 R	-	0,46	6,32
TC2	III/A 42,5 LA	30	0,46	3,8
TC3	I 42,5 R	-	0,41	4,84
TC4	I 52,5 HSR	-	0,46	7,6

#### **ARTÍCULO-9º [101]**

**Nombre del artículo:** Effect of fly ash and repeated loading on diffusion coefficient in chloride migration test.

**Autor:** Wu-man Zhang, Heng-jing Ba, Shang-jiang Chen.

**Técnica de determinación de cloruros:** Célula eléctrica de migración. 12V – 0,5mol/L NaCl.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland) y CEM II/A-V.

**Relaciones agua/cemento:** 0,35.

**Ambiente:** Laboratorio.

Mix proportions of concrete.							
	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	FA (kg/m <sup>3</sup> )	Fine aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )	Superplasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	W/B <sup>a</sup>
C	450	-	737	1105.5	2.7	157.5	0.35
F20	360	90			2.7		
F30	315	135			3.3		
F40	270	180			3.3		

<sup>a</sup> W/B is the ratio of water to binder.

Chemical compositions and physical properties of cement and fly ash.										
	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	R <sub>2</sub> O <sup>a</sup> (%)	Loss (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Specific area surface (m <sup>2</sup> /kg)
OPC	62.28	21.08	5.47	3.96	1.73	2.63	0.80	1.61	3.17	335
FA	2.93	65.5	20.60	4.61	2.23	0.26	0.60	3.03	2.43	655

<sup>a</sup> R<sub>2</sub>O = Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O.

Tabla 9: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad 28 DÍAS
C1	I	-	0,35	0,243
C2	I	-	0,35	0,272
C3	I	-	0,35	0,357
FA1	II/A-V	20	0,35	0,26
FA2	II/A-V	20	0,35	0,285
FA3	II/A-V	20	0,35	0,662

Tabla 9.1: Coeficientes de difusión D <sub>1</sub> [x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s] 1 Año				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor D <sub>1</sub>
C1	I	-	0,35	0,0673
C2	I	-	0,35	0,0753
C3	I	-	0,35	0,0989
FA1	II/A-V	20	0,35	0,0720
FA2	II/A-V	20	0,35	0,0789
FA3	II/A-V	20	0,35	0,1834

**ARTÍCULO-10º [102]**

**Nombre del artículo:** Prediction of diffusivity of concrete based on simple analytic equations

**Autor:** Byung Hwan Oh, Seung Yup Jang.

**Técnica de determinación de cloruros:** AASHTO T277, método basado en Non-steady-state migration test.

30V – 3% NaCl – 0,3N NaOH

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/A-V y CEM III.

**Relaciones agua/cemento:** 0,35 – 0,45 – 0,55

**Ambiente:** Laboratorio

Oxide and compound composition of cement and SCM				
Oxides/ compounds	Composition (wt.%)			
	OPC	SRPC	Fly ash	Blast-fumace slag
CaO	61.20	62.03	3.89	43.34
SiO <sub>2</sub>	22.00	22.11	59.74	33.86
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.20	4.20	23.60	14.67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	4.27	6.07	0.32
MgO	2.80	2.87	0.95	5.95
K <sub>2</sub> O	1.10	0.72	0.96	0.61
Na <sub>2</sub> O	0.10	0.09	0.49	0.19
SO <sub>3</sub>	2.00	2.03	0.40	0.12
LOI	1.40	1.70	3.90	0.67
Σ	100.00	100.02	100.00	99.73
C <sub>3</sub> S	30.0	44.4	–	–
C <sub>2</sub> S	40.5	29.9	–	–
C <sub>3</sub> A	11.0	3.9	–	–
C <sub>4</sub> AF	9.7	13.0	–	–
Gypsum	4.3	4.4	–	–
Σ	95.5	95.6		

Tabla 10: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad 6 MESES
NI-0	I	-	0,45	2,231
NI-PFA15	II/ A-V	15	0,45	1,25
NI-PFA30	II/ B-V	30	0,45	0,923
NI-PFA50	II/ B-V	50	0,45	1,681
NI-BFS15	III/A	15	0,45	1,649
NI-BFS30	III/A	30	0,45	1,633
NI-BFS50	III/A	50	0,45	0,722
LI-0	I	-	0,55	5,274
HI-0	I	-	0,35	1,194
HI-PFA30	CEM II/B-V	30	0,35	0,632
HI-BFA30	CEM III/A	30	0,35	0,675

Tabla 10.1: Coeficientes de difusión $D_1$ [ $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ] 1 Año				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
NI-0	I	-	0,45	1,58
NI-PFA15	II/ A-V	15	0,45	0,88
NI-PFA30	II/ B-V	30	0,45	0,65
NI-PFA50	II/ B-V	50	0,45	1,19
NI-BFS15	III/A	15	0,45	1,17
NI-BFS30	III/A	30	0,45	1,15
NI-BFS50	III/A	50	0,45	0,51
LI-0	I	-	0,55	3,73
HI-0	I	-	0,35	0,84
HI-PFA30	CEM II/B-V	30	0,35	0,45
HI-BFA30	CEM III/A	30	0,35	0,48

### ARTÍCULO-11º [1]

**Nombre de la tesis:** Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida.

**Autor:** Miguel Ángel Bermúdez Odriozola.

**Técnica de determinación de cloruros:** ASTM C1152 y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I 52,5 SR, CEM I 45 SR/MR, CEM IV/A 32,5 SR/MR, IIIB/32,5-SR y IV.

**Relaciones agua/cemento:** 0,5 – 0,55 – 0,6 – 0,65.

**Ambiente:** Sumergido y carrera de mareas.

Tabla 2.1.- Características del hormigón de los cajones de los Muelles analizados.													
		Muelle A	Muelle B	Muelle C	Muelle D	Muelle E	Muelle F	Muelle G					
Edad (años)		4,5	6,5	7,5	5	2	2	31					
Localización		Mediterráneo	Mediterráneo	Mediterráneo	Atlántico	Cantábrico	Cantábrico	Cantábrico					
Distancia a B.M.V.E. del testigo/carrera de mareas (m)		- 0,1/0,8	- 0,1/0,4	+ 0,5/0,7	+ 2,5/4,0	+ 3,5/4,5	+2,0-3,5/5,4	+ 1,3/4,5					
Ambiente de exposición		Sumergido	Sumergido	Carrera de mareas									
Hormigón proyecto ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )		H-25	H-25	H-25	H-25	HA-30	HA-30	-					
Contenido de cemento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		300	-	300	-	300	350	-					
Relación agua/cemento		0,50	0,50*	0,55*	0,65*	0,50	0,50	0,60*					
Recubrimiento proyecto (mm)		40	40	40	40	50	45	-					
Tipo de cemento		I/52,5-SR	-	I/45-SR/MR	-	IV/A 32,5 SR/MR	IIIB/32,5-SR	Puzolánico					
Tipo de acero		AEH-500S	AEH-500S	AEH-500S	AEH-500S	AEH-400S	AEH-500S	-					
Armadura horizontal (**)		5 $\Phi$ 16/m	5 $\Phi$ 12/m	5 $\Phi$ 12/m	4 $\Phi$ 12/m	5 $\Phi$ 16/m	5 $\Phi$ 12/m	7,5 $\Phi$ 18/m					
Armadura vertical		7 $\Phi$ 12/m	4 $\Phi$ 8/m	$\Phi$ 8 c30 cm	4 $\Phi$ 8/m	5 $\Phi$ 16/m	4 $\Phi$ 8/m	4 $\Phi$ 12/m					
Resistencias control de calidad durante la ejecución ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Diferentes cajones	A1-2	32,6	B1-2	29,8	C1	36,3	-	E1	31,4	F1	39,1	-
		A3-4	37,5	B3	28,7	C2	38,2	-	E2	33,6	F2	36,4	-
		A5-6	38,4	B4-5	26,8	C3	35,2	-	E3	37,2	F3	38,6	-
		-	-	-	-	-	-	-	E4	41,1	F4	42,2	-

\* Calculado según la fórmula:  $c/a = 0,035 f_{cm} + 0,5$   
 \*\* La armadura horizontal se sitúa más próxima al paramento en contacto con el agua de mar en todos los Muelles, salvo en el Muelle E.

Tabla 11: Coeficientes de difusión D[x10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]					
Mezcla	CEM	Edad (Años)	A/C	Valor D	Valor D <sub>1</sub>
A1-A2	CEM I 52,5 SR	4,5	0,5	22,76	48,3
A3-A4				30,61	64,9
A5-A6				21,92	46,5
B1-B2	-	6,5	0,5	17,37	44,3
B3				17,02	43,4
B4-B5				23,51	59,9
C1	CEM I 45 SR/MR	7,5	0,55	14,6	40
C2				5,03	13,8
C3				16	43,8
D1	-	5	0,65	34,2	76,5
D2				37,8	84,5
D3				35,9	80,3
D4				27,6	61,7
E1	CEM IV/A 32,5 SR/MR	2	0,5	8,42	11,9
E2				1,9	2,7
E3				1,53	2,2
E4				2,09	3
F1	IIIB/32,5-SR	2	0,5	5,4	7,6
F2				3,56	5
F3				3,63	5,1
F4				3,69	5,2
G1	IV	31	0,6	1,25	7
G3				0,91	5,1
G4				1,18	6,6
G5				1,11	6,2

### **ARTÍCULO-12º [103]**

**Nombre del artículo:** Modelling chloride diffusion in concrete effect of fly ash and slag.

**Autor:** Michael D.A. Thomas, Phil B. Bamforth.

**Técnica de determinación de cloruros:** AASHTO T277 y la segunda ley de Fick.

12V – 3M NaOH – 1M NaCl

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/B-V y CEM III.

**Relaciones agua/cemento:** 0,66 – 0,54 – 0,48.

**Ambiente:** Salpicaduras.

Details of concrete mixes			
	Mix proportions (kg/m <sup>3</sup> )		
Mix designation	PC	P/PFA	P/GBS
Portland cement	288	227	110
Fly ash	—	98	—
Slag	—	—	255
Total cementitious content	288	325	365
Water	190	170	177
Water-to-cementitious materials ratio	0.66	0.54	0.48
Stone	1240	1305	1240
Sand	660	585	600
28-day strength (MPa)	39.4	49.6	37.9

Details of concretes from hydraulic dams		
	Deck concrete	Mass exterior
Portland cement (kg/m <sup>3</sup> )	236	147
Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	—	63
Water-to-cementitious materials ratio	0.57	0.59
28-day strength (MPa)	29	28

Tabla 12: Coeficientes de difusión $D_a$ [ $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ]						
Mezcla	Edad					
	6 meses	1 año	2 años	3 años	6 años	8 años
1	9,5	3	7,6	5,6	10	8,7
2	4,3	2	1,9	1,1	0,81	0,59
3	7,5	2,9	1,9	0,99	1	0,63

Tabla 12.2: Coeficientes de difusión $D_1$ [ $\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ ] 1 Año (Media)			
Tipo	Mezcla	A/C	Valor $D_1$
CEM I	1	0,66	13,21
CEM II/B-V	2	0,54	2,21
CEM III/B	3	0,48	2,81

**ARTÍCULO-13º [104]**

**Nombre del artículo:** Time dependent diffusion in concrete—three laboratory studies.

**Autor:** Michelle Nokken, Andrea Boddy, R.D. Hooton, M.D.A. Thomas.

**Técnica de determinación de cloruros:** NT Build 443 y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM I (Portland), CEM II/B-M y CEM II/A-V.

**Relaciones agua/cemento:** 0,3 – 0,35 – 0,4.

**Ambiente:** Laboratorio.

Summary of mixture characteristics									
Set #	Mix code	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	Slag (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	HRM (kg/m <sup>3</sup> )	Total cementing materials content (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio
1	1A	380	-	-	-	-	380	152	0.40
1	1B	350	-	-	-	30	380	152	0.40
1	1C	334	-	-	-	46	380	152	0.40
1	1D	460	-	-	-	-	460	138	0.30
1	1E	423	-	-	-	37	460	138	0.30
1	1F	405	-	-	-	55	460	138	0.30
2	2A	442	18	-	-	-	460	137	0.30
2	2B	355	20	125	-	-	500	149	0.30
2	2C	327	18	115	-	-	460	137	0.30
2	2D	345	*	115	-	-	460	137	0.30
2	2E	308	37	115	-	-	460	137	0.30
3	3A	375	-	-	-	-	375	150	0.40
3	3B	345	30	-	-	-	375	150	0.40
3	3C	345	-	-	30	-	375	150	0.40
3	3D	345	-	-	45	-	390	135	0.35
3	3E	330	-	-	45	-	375	150	0.40
3	3F	345	-	-	45	-	390	120	0.31
3	3G	330	45	-	-	-	375	150	0.40
3	3H	345	-	-	60	-	405	135	0.33

\*CSA Type 10SF Blended cement with ~8% silica fume.

Tabla 13: Coeficientes de difusión $D[x10^{-12}m^2/s]$								
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	28 Días	90 Días	140 Días	365 Días	1095
1A	I	-	0,4	19,08	11,75	6,13	6,26	-
1B	IV/A	8	0,4	8,28	5,73	3,79	2,3	1,7
1C	IV/A	12	0,4	5,86	3,52	3,18	1,72	0,97
1D	I	-	0,3	9,64	5,87	5,39	-	3,43
1E	IV/A	8	0,3	3,76	2,88	2,16	1,43	0,84
1F	IV/A	12	0,3	2,95	2,76	1,49	0,9	0,56
2A	II/A-D	4	0,3	4,78	3,75	-	1,58	0,84
2B	II/B-M	4 - 25	0,3	4,66	-	-	1,16	0,7
2C	II/B-M	T10 - 25	0,3	4,41	3,03	-	1,18	-
2D	II/B-M	8 - 25	0,3	4,41	-	-	1,06	0,46
2E	II/B-M	4 - 25	0,3	-	3,02	-	1,29	0,85
3A	I	-	0,4	13,3	10,3	-	5,61	-
3B	II/A-D	8	0,4	3,68	3,3	-	1,33	-
3C	II/A-V	8	0,4	5,33	3,77	-	1,59	-
3D	II/A-V	12	0,35	3,77	2,73	-	1	-
3E	II/A-V	12	0,4	4,86	2,79	-	1,22	-
3F	II/A-V	12	0,31	3,5	2,02	-	1,26	-
3G	II/A-D	12	0,4	2,59	1,88	-	1,09	-
3H	II/A-V	16	0,33	2,89	2,2	-	1,39	-

Tabla 13.2: Coeficientes de difusión $D_1[x10^{-12}m^2/s]$ 1 Año (Media)				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor $D_1$
1A	I	-	0,4	5,29
1B	IV/A	8	0,4	2,55
1C	IV/A	12	0,4	1,75
1D	I	-	0,3	3,72
1E	IV/A	8	0,3	1,34
1F	IV/A	12	0,3	1,00
2A	II/A-D	4	0,3	1,56
2B	II/B-M	4 - 25	0,3	1,22
2C	II/B-M	T10 - 25	0,3	1,30
2D	II/B-M	8 - 25	0,3	1,03
2E	II/B-M	4 - 25	0,3	1,42
3A	I	-	0,4	5,04
3B	II/A-D	8	0,4	1,33
3C	II/A-V	8	0,4	1,65
3D	II/A-V	12	0,35	1,13
3E	II/A-V	12	0,4	1,32
3F	II/A-V	12	0,31	1,08
3G	II/A-D	12	0,4	0,91
3H	II/A-V	16	0,33	1,09

### ARTÍCULO-14º [105]

**Nombre del artículo:** Impedance spectroscopy: An efficient tool to determine the non-steady-state chloride diffusion coefficient in building materials.

**Autor:** I. Sánchez, M. P. López, J. M. Ortega, M. A. Climent.

**Técnica de determinación de cloruros:** AASHTO T277 (ASTM C1202) & Impedance Spectropy. 12V – 3% NaCl – 0,3N NaOH.

**Tipo de cemento:** CEM II/A-L 42,5R, CEM II/B-V 32,5R y CEM IV 32,5N.

**Relaciones agua/cemento:** 0,4 – 0,5.

**Ambiente:** Laboratorio.

Tabla 14: Coeficientes de difusión $D_{ns}$ [ $\times 10^{-12} m^2/s$ ]					
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad años	Valor
1	II/A-L	6-20	0,5	2,0000	1,9
2	II/ B-V	25	0,4	0,0384	16,7
3	II/ B-V	25	0,4	0,0767	11,6
4	II/ B-V	25	0,4	0,1233	6,1
5	II/ B-V	25	0,4	0,2055	4,7
6	IV/B(V)	45	0,4	0,0384	18,3
7	IV/B(V)	45	0,4	0,0767	14,6
8	IV/B(V)	45	0,4	0,1233	5,3
9	IV/B(V)	45	0,4	0,2055	4,4
1.1	II/A-L	6-20	0,5	2,0000	1,8
1.2	II/ B-V	25	0,4	0,0384	17,1
1.3	II/ B-V	25	0,4	0,0767	10,9
1.4	II/ B-V	25	0,4	0,1233	6
1.5	II/ B-V	25	0,4	0,2055	4,7
1.6	IV/B(V)	45	0,4	0,0384	18,5
1.7	IV/B(V)	45	0,4	0,0767	12,6
1.8	IV/B(V)	45	0,4	0,1233	5,7
1.9	IV/B(V)	45	0,4	0,2055	4,3

Tabla 14.1: Coeficientes de difusión $D_1$ [ $\times 10^{-12} m^2/s$ ] 1 Año (Media)				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor
1	II/A-L	6-20	0,5	2,62
2	II/ B-V	25	0,4	2,67
6	IV/B(V)	45	0,4	2,82

**ARTÍCULO-15º [106]**

**Nombre del artículo:** Determination of chloride diffusivity through partially saturated Portland cement concrete by a simplified procedure.

**Autor:** A.T.C. Guimarães, M.A. Climent, G. de Vera, F.J. Vicente, F.T. Rodrigues, C. Andrade.

**Técnica de determinación de cloruros:** Penetración por presión y la segunda ley de Fick.

**Tipo de cemento:** CEM II/A-W.

**Relaciones agua/cemento:** 0,48 - 0,55 – 0,57 – 0,66.

**Ambiente:** Laboratorio.

Composition (mass percentages) and characteristics of the cement (mean values).	
CaO	52.4
SiO <sub>2</sub>	23.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.3
MgO	5.9
K <sub>2</sub> O	1.06
Na <sub>2</sub> O	0.07
SO <sub>3</sub>	3.3
CO <sub>2</sub>	2.2
Ignition loss	3.3
Insoluble residue	12.8
Specific mass (g/cm <sup>3</sup> )	2.99
Fineness Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	5026
Setting start (h)	3:56
Setting final (h)	5:07
Mortar compressive strength @ 28 days (MPa)	48.0

Composition of concrete mixes.				
Concrete	Dosage (cement:fine agg.:coarse agg.)	Cement content (kg/m <sup>3</sup> )	Water/ cement ratio	Aggregate/ cement ratio
H1	1:2.12:2.88	355	0.55	5
H2	1:1.60:2.40	419	0.48	4
H3	1:2.64:3.36	297	0.66	6
H4	1:1.60:2.40	416	0.55	4
H5	1:2.64:3.36	304	0.57	6
H-25 <sup>a</sup>	1:1.80:3.27	350	0.60	5.1
H-35 <sup>a</sup>	1:1.89:3.44	350	0.50	5.3

Tabla 15 : Coeficientes de difusión $D_{ns}$ [ $\times 10^{-12} m^2/s$ ]					
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Edad años	Valor
H1	II/A-W	12	0,55	0,019	13,39
	II/A-W	12	0,55	0,044	7,52
	II/A-W	12	0,55	0,058	5,36
	II/A-W	12	0,55	0,356	2
H2	II/A-W	12	0,48	0,019	9,13
	II/A-W	12	0,48	0,044	6,69
	II/A-W	12	0,48	0,058	3,35
	II/A-W	12	0,48	0,356	1,55
H3	II/A-W	12	0,66	0,019	14,5
	II/A-W	12	0,66	0,044	14,31
	II/A-W	12	0,66	0,058	14,16
	II/A-W	12	0,66	0,356	2,58
H4	II/A-W	12	0,55	0,019	12,26
	II/A-W	12	0,55	0,044	11,37
	II/A-W	12	0,55	0,058	11,19
	II/A-W	12	0,55	0,356	2,49
H5	II/A-W	12	0,57	0,019	13,84
	II/A-W	12	0,57	0,044	11,86
	II/A-W	12	0,57	0,058	8,48
	II/A-W	12	0,57	0,356	5,18

Tabla 15.1 : Coeficientes de difusión $D_1$ [ $\times 10^{-12} m^2/s$ ] 1 Año (Media)				
Mezcla	CEM	% Sust.	A/C	Valor
H1	II/A-W	12	0,55	1,48
H2	II/A-W	12	0,48	1,10
H3	II/A-W	12	0,66	2,49
H4	II/A-W	12	0,55	2,06
H5	II/A-W	12	0,57	2,38

ANEXO 3: Datos extraídos de las redes  
neuronales

Datos para Cemento tipo I

1 Neurona Capa oculta	1,57	3,11	0,67	1,06	0,93	1,47
	2,53	3,68	1,22	2,33	1,77	2,31
	4,03	5,04	2,60	4,18	3,15	3,80
	6,23	7,84	5,60	6,68	5,29	6,33
	9,22	12,16	10,48	9,77	8,35	10,00
	12,87	16,54	15,62	13,15	12,27	14,09
	16,78	19,44	19,06	16,42	16,61	17,66
	20,43	20,86	20,73	19,21	20,74	20,39

2 Neuronas Capa oculta	0,86	0,93	0,98	0,48	1,22	0,89
	2,00	3,04	3,00	2,18	2,19	2,48
	3,82	5,37	3,65	4,47	3,98	4,26
	6,28	6,65	4,33	7,38	6,84	6,30
	8,95	7,95	6,50	10,78	10,65	8,96
	11,38	11,34	12,55	15,67	15,26	13,24
	14,62	15,97	21,30	20,80	21,69	18,87
	23,94	18,13	26,63	23,69	30,76	24,63

3 Neuronas Capa oculta	0,75	1,36	1,18	0,86	1,20	1,07
	2,39	2,54	2,14	1,46	2,74	2,26
	3,20	3,19	3,36	4,11	3,35	3,44
	6,51	6,91	6,31	6,37	5,73	6,37
	13,58	12,81	13,02	11,47	12,26	12,63
	16,38	14,37	17,06	14,65	15,70	15,63
	18,48	15,86	18,21	15,13	17,34	17,00
	24,82	26,67	20,11	26,37	25,64	24,72

4 Neuronas Capa oculta	1,50	1,91	0,98	1,96	0,86	1,44
	1,95	1,72	1,45	3,36	1,81	2,06
	4,04	4,47	3,36	3,87	3,00	3,75
	9,19	6,44	6,70	8,05	7,10	7,50
	13,28	6,53	10,70	8,58	8,20	9,46
	13,80	12,05	11,95	8,93	8,92	11,13
	14,46	26,77	13,06	16,89	12,45	16,73
	22,05	33,44	24,17	31,12	20,05	26,17

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,2	2,3	3,8	6,6	10,3	13,5	17,6	24,0

Datos para Cemento tipo II/A-V

1 Neurona Capa oculta	0,66	0,41	1,40	0,05	0,65	0,63
	0,69	0,47	1,42	0,35	0,96	0,78
	0,89	0,76	1,54	1,20	1,77	1,23
	2,27	2,13	2,26	3,06	3,41	2,63
	5,80	5,27	4,69	5,50	5,64	5,38
	7,47	7,40	7,02	7,19	7,41	7,30
	7,73	7,96	7,69	7,93	8,33	7,92
	7,76	8,06	7,80	8,18	8,69	8,10

2 Neuronas Capa oculta	0,11	0,27	0,44	0,31	0,21	0,27
	0,47	0,40	0,45	0,54	0,59	0,49
	1,29	0,88	1,56	1,24	1,08	1,21
	2,88	2,33	4,44	2,91	2,07	2,93
	5,16	4,95	6,67	5,34	5,83	5,59
	7,31	7,10	7,27	7,19	7,45	7,27
	8,04	7,99	7,38	7,99	7,77	7,84
	8,41	8,24	8,07	8,16	7,93	8,16

3 Neuronas Capa oculta	0,21	0,36	0,35	0,28	0,41	0,33
	0,52	0,49	0,63	0,41	0,51	0,51
	0,61	1,10	1,11	0,90	0,67	0,88
	1,08	2,22	2,15	0,91	1,51	1,57
	3,72	3,73	3,94	1,03	4,22	3,33
	6,75	5,30	5,90	7,41	7,02	6,48
	7,44	7,22	7,51	8,07	8,00	7,65
	7,91	8,01	7,98	8,83	8,82	8,31

4 Neuronas Capa oculta	0,42	0,42	0,42	0,10	0,13	0,30
	0,30	0,54	0,34	0,46	0,37	0,40
	0,70	1,49	1,48	0,88	0,97	1,10
	2,19	2,89	2,13	2,18	2,20	2,32
	3,69	3,64	2,99	4,46	2,44	3,44
	7,73	7,40	7,00	7,91	3,39	6,69
	8,03	8,06	7,40	8,21	6,68	7,68
	8,33	8,70	8,56	8,44	8,87	8,58

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0,4	0,5	1,1	2,4	4,4	6,9	7,8	8,3

Datos para Cemento tipo II/B-V

1 Neurona Capa oculta	0,12	0,07	0,07	0,30	0,31	0,18
	0,48	0,39	0,64	0,47	0,63	0,52
	1,06	1,03	1,25	0,76	1,02	1,02
	1,83	2,04	1,88	1,20	1,49	1,69
	2,63	3,18	2,52	1,87	2,03	2,44
	3,27	4,03	3,15	2,79	2,62	3,17
	3,68	4,51	3,74	3,93	3,26	3,82
	3,91	4,73	4,28	5,18	3,90	4,40

2 Neuronas Capa oculta	0,70	0,10	0,43	0,19	0,38	0,36
	0,81	0,44	0,78	0,39	0,55	0,60
	1,01	1,52	1,77	0,78	0,80	1,18
	1,41	1,79	2,36	1,41	1,14	1,62
	2,07	1,81	2,52	2,21	1,62	2,05
	2,92	1,83	2,85	2,99	2,26	2,57
	3,72	2,12	4,03	3,55	3,13	3,31
	4,26	4,46	5,83	3,89	4,26	4,54

3 Neuronas Capa oculta	0,08	0,03	0,09	0,09	0,10	0,08
	0,43	0,45	0,45	0,44	0,45	0,44
	1,36	0,74	1,39	0,66	1,21	1,07
	2,07	1,60	1,85	1,61	2,08	1,84
	2,24	2,43	2,73	2,91	2,42	2,54
	2,30	2,65	3,27	3,27	2,56	2,81
	2,67	2,99	3,61	3,68	3,25	3,24
	4,32	4,71	4,48	5,31	4,32	4,63

4 Neuronas Capa oculta	0,08	0,44	0,29	0,09	0,11	0,20
	0,45	0,48	0,44	0,45	0,41	0,45
	0,90	0,96	0,88	0,84	0,79	0,87
	2,08	2,28	1,84	2,07	2,12	2,08
	2,31	2,62	2,17	2,37	2,43	2,38
	2,56	3,22	2,98	2,82	2,63	2,84
	2,94	3,38	3,34	3,08	2,92	3,13
	4,32	3,44	5,31	3,58	4,78	4,29

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0,2	0,5	1,0	1,8	2,4	2,8	3,4	4,5

Datos para Cemento tipo II/A-W

1 Neurona Capa oculta	0,44	2,14	2,11	1,62	0,27	1,32
	0,67	2,14	2,15	1,83	0,64	1,49
	1,38	2,17	2,26	2,07	1,60	1,89
	2,42	2,26	2,57	2,32	2,62	2,44
	3,00	2,57	3,09	2,52	3,05	2,85
	3,16	3,17	3,50	2,67	3,16	3,13

2 Neuronas Capa oculta	0,92	0,06	1,17	0,11	0,89	0,63
	1,64	0,94	1,87	0,78	1,34	1,31
	2,36	2,18	2,58	2,32	2,08	2,30
	2,45	2,34	2,67	2,56	2,19	2,44
	2,56	2,45	2,71	2,64	2,29	2,53
	3,40	3,17	3,06	3,18	3,09	3,18

3 Neuronas Capa oculta	1,85	1,60	1,37	1,22	1,00	1,41
	1,49	1,49	1,43	1,83	1,67	1,58
	1,27	1,45	1,52	2,15	2,50	1,78
	2,45	2,49	2,20	2,58	2,92	2,53
	3,89	3,36	2,91	2,95	3,13	3,24
	3,82	3,16	3,09	2,93	3,19	3,24

4 Neuronas Capa oculta	0,67	1,43	1,26	1,58	0,58	1,10
	0,73	1,57	1,68	1,81	1,51	1,46
	1,06	1,91	2,46	3,32	2,16	2,18
	2,65	2,47	2,46	2,49	2,93	2,60
	2,88	3,34	2,37	2,94	3,30	2,97
	2,82	3,94	2,44	2,63	3,58	3,08

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
-	-	1,1	1,5	2,0	2,5	2,9	3,2

Datos para Cemento tipo III

1 Neurona Capa oculta	1,48	0,25	0,02	1,10	0,19	0,61
	1,63	0,30	0,38	1,17	0,57	0,81
	1,90	0,56	0,89	1,36	1,18	1,18
	2,31	1,40	1,57	1,74	1,91	1,79
	2,72	2,49	2,37	2,36	2,53	2,49
	3,00	2,97	3,22	2,99	2,93	3,02
	3,14	3,08	4,02	3,40	3,14	3,36
	3,21	3,11	4,69	3,61	3,23	3,57

2 Neuronas Capa oculta	0,03	0,08	0,06	0,05	0,10	0,06
	0,91	0,25	0,33	0,31	0,18	0,39
	1,36	0,70	0,65	0,61	0,62	0,79
	1,51	1,49	1,15	1,32	1,83	1,46
	1,76	2,22	1,80	2,75	2,74	2,25
	2,50	2,60	2,51	3,07	2,96	2,73
	2,94	2,74	3,15	3,34	3,00	3,03
	3,01	2,78	3,63	3,57	3,01	3,20

3 Neuronas Capa oculta	0,34	0,05	0,06	0,36	0,56	0,28
	0,42	0,52	0,28	0,50	0,63	0,47
	0,65	0,86	0,65	0,61	0,81	0,71
	1,42	1,74	1,16	1,48	1,14	1,39
	2,37	2,57	2,25	2,84	1,60	2,33
	2,80	2,84	2,79	3,03	2,34	2,76
	3,29	3,37	3,40	3,08	3,06	3,24
	4,80	4,04	4,17	3,13	3,40	3,91

4 Neuronas Capa oculta	0,07	0,06	0,02	0,07	0,06	0,05
	0,28	0,08	0,35	0,35	0,20	0,25
	0,65	0,64	0,99	0,42	0,55	0,65
	1,54	1,13	1,19	1,72	1,30	1,37
	2,22	2,94	2,23	2,17	2,06	2,32
	3,00	3,00	2,49	2,46	2,43	2,68
	3,40	3,40	2,50	3,02	3,09	3,08
	3,52	3,94	2,58	3,17	3,78	3,40

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
0,3	0,5	0,8	1,5	2,3	2,8	3,2	3,5

Datos para Cemento tipo IV

1 Neurona Capa oculta	1,17	1,16	1,44	1,17	1,34	1,26
	1,46	1,50	1,61	1,66	1,56	1,56
	2,28	2,17	2,37	2,82	2,37	2,40
	3,73	3,27	3,99	4,45	4,14	3,92
	4,95	4,63	5,07	5,60	5,60	5,17
	5,48	5,83	5,36	6,07	6,11	5,77
	5,65	6,61	5,41	6,23	6,23	6,03
	5,70	7,02	5,42	6,27	6,26	6,13

2 Neuronas Capa oculta	1,00	1,50	1,17	1,06	1,33	1,21
	1,63	1,52	1,54	1,34	1,88	1,58
	2,69	1,71	2,74	2,39	3,23	2,55
	3,94	3,15	4,60	4,30	4,89	4,17
	4,95	4,75	5,68	5,64	5,80	5,36
	5,64	5,17	6,06	6,09	6,11	5,81
	6,23	6,11	6,23	6,20	6,23	6,20
	6,76	7,11	6,32	6,22	6,47	6,58

3 Neuronas Capa oculta	1,09	1,19	1,07	1,34	1,63	1,26
	1,98	2,37	2,36	1,94	1,80	2,09
	2,29	2,69	2,65	2,19	2,17	2,40
	4,08	4,30	3,70	3,48	4,14	3,94
	5,86	5,87	4,87	4,85	5,70	5,43
	6,15	6,10	5,12	5,14	5,94	5,69
	6,83	6,58	5,87	6,10	6,21	6,32
	8,41	7,57	6,74	8,13	6,89	7,55

4 Neuronas Capa oculta	1,34	0,68	1,17	1,17	1,17	1,11
	1,82	1,23	0,61	0,67	0,22	0,91
	2,82	2,51	2,37	2,59	2,26	2,51
	5,54	4,23	4,14	5,45	5,22	4,91
	4,95	4,73	5,60	5,69	5,59	5,31
	4,29	5,36	6,47	5,90	6,00	5,61
	6,23	6,55	5,65	6,65	6,44	6,30
	7,36	8,95	5,40	7,60	6,92	7,25

0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,2	1,5	2,5	4,2	5,3	5,7	6,2	6,9

ANEXO 4: Resultados obtenidos del  
algoritmo genético (GA)

CEM I																
PARÁMETROS ENTRADA	Ambiente: III.a (hasta 500m)					Ambiente: III.a (500-5000m)					Ambiente: III.b					
Individuos Población Inicial	500					500					500					
Iteraciones	50					50					50					
% Mutados	0,05					0,05					0,05					
Recubrimiento	45 mm					45 mm					40 mm					
Dosificación	0,3	0,35	0,4	0,45*	0,5*	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable															
	b (mm)	330	330	240	315	340	270	350	275	315	315	345	390	460	385	310
	c (mm)	445	445	490	510	440	540	435	560	440	465	435	425	425	430	450
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	35	35	50	40	35	30	40	30	40	30	40	40	30	35	40
	D <sub>1</sub> (mm)	32	25	32	32	25	25	20	25	25	25	25	25	20	25	25
	D <sub>2</sub> (mm)	8	8	12	10	12	8	8	10	10	8	10	10	10	12	8
	D <sub>3</sub> (mm)	6	8	8	6	6	6	6	8	8	8	6	8	8	8	8
	n <sub>1</sub>	3	4	2	2	4	3	6	3	4	4	4	4	7	4	4
	n <sub>2</sub>	3	3	2	2	2	3	4	2	3	3	2	2	3	2	3
	sep <sub>3</sub> (mm)	150	250	125	75	150	200	100	225	250	275	125	200	175	175	250
	COSTE (€)	876,69	835,79	813,02	889,0	842,76	818,36	856,92	856,34	831,61	834,69	848,95	882,82	964,74	888,02	831,03
	Duración	22,16	24,32	12,38	22,5	22,24	17,50	19,55	23,73	23,80	27,05	20,88	21,25	19,65	22,74	21,14
Degradación cloruros	182,31	101,97	70,60	67,5	55,24	746,92	404,05	248,90	152,85	106,03	172,89	120,64	112,49	107,19	104,61	

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM II/A-V																
PARÁMETROS ENTRADA	Ambiente: III.a (hasta 500m)					Ambiente: III.a (500-5000m)					Ambiente: III.b					
Individuos Población Inicial	500					500					500					
Iteraciones	50					50					50					
% Mutados	0,05					0,05					0,05					
Recubrimiento	0,45 mm					0,45 mm					0,4 mm					
Dosificación	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable															
	b (mm)	375	320	320	315	295	230	325	345	260	230	355	390	305	210	225
	c (mm)	445	455	445	450	455	500	440	430	515	520	445	435	460	495	470
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	40	30	35	35	35	40	40	45	30	30	30	30	30	30	45
	D <sub>1</sub> (mm)	20	25	32	25	25	32	25	25	32	32	20	25	25	32	32
	D <sub>2</sub> (mm)	8	10	10	10	10	10	10	8	8	10	8	8	10	12	8
	D <sub>3</sub> (mm)	8	6	8	8	6	8	8	10	6	6	8	6	6	6	6
	n <sub>1</sub>	6	4	3	4	4	2	4	4	2	2	6	4	4	2	2
	n <sub>2</sub>	5	2	3	2	2	2	2	3	3	2	4	5	2	2	3
	sep <sub>3</sub> (mm)	200	150	275	250	150	275	250	275	225	225	250	150	175	166,7	175,0
	COSTE (€)	894,47	828,40	876,08	828,16	812,65	769,87	833,22	857,50	794,03	770,87	849,58	878,02	818,26	740,0	737,0
	Duración	31,03	25,55	24,93	25,21	25,18	21,69	20,35	23,39	16,18	22,29	20,78	22,57	21,74	20,0	18,0
Degradación cloruros	479,43	395,54	188,66	98,65	71,54	2173,27	1743,12	800,10	388,46	225,52	218,67	228,27	176,49	153,1	144,1	

CEM II/B-V																
PARÁMETROS ENTRADA	III.a (hasta 500m)					III.a (500-5000m)					III.b					
Individuos Población Inicial	500					500					500					
Iteraciones	50					50					50					
% Mutados	0,05					0,05					0,05					
Recubrimiento	25 mm					25 mm					30 mm					
Dosificación	0,3	0,35	0,4	0,45*	0,5*	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable															
	b (mm)	240	280	185	335	285	165	220	265	255	320	325	230	325	170	240
	c (mm)	490	470	485	450	455	475	465	465	585	460	455	485	445	505	505
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	40	35	50	30	35	70	55	35	30	30	30	30	35	40	35
	D <sub>1</sub> (mm)	25	32	32	20	25	32	32	32	25	20	20	32	25	32	25
	D <sub>2</sub> (mm)	6	8	8	8	10	12	6	10	10	8	8	12	12	10	10
	D <sub>3</sub> (mm)	6	6	6	8	8	8	6	6	6	6	8	6	6	6	8
	n <sub>1</sub>	3	2	2	6	4	2	2	2	3	6	6	2	4	2	3
	n <sub>2</sub>	4	3	3	4	3	2	4	2	2	3	3	2	2	2	2
	sep <sub>3</sub> (mm)	175	175	225	275	250	250	166,67	175	200	175	275	250	125	225	250
	COSTE (€)	751,89	780,15	714,82	836,70	815,68	717,27	736,59	761,39	852,82	826,57	828,33	743,52	843,84	709,97	770,96
	Duración	16,67	26,54	20,51	26,42	26,08	25,53	21,84	22,63	22,91	20,87	25,40	26,37	24,43	25,04	22,40
Degradación cloruros	298,72	129,49	73,08	60,13	63,57	1340,14	547,72	282,19	164,18	127,30	208,50	153,40	126,70	114,83	86,13	

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM II/B-V								
III.c				IV				
500				500				
50				50				
0,05				0,05				
35 mm				35 mm				
0,3	0,35	0,4*	0,45*	0,3	0,35	0,4	0,45*	0,5*
385	340	300	325	275	285	195	275	340
435	430	445	440	460	445	530	455	450
35	45	40	40	35	45	30	40	30
25	25	25	25	25	32	32	40	25
12	10	8	6	8	8	8	12	10
10	8	8	8	6	8	6	8	8
4	4	4	4	4	3	2	2	4
2	2	4	5	4	4	2	2	2
275	225	275	225	175	225	250	250	275
895,06	847,36	818,66	832,78	802,90	860,38	741,33	863,14	840,13
37,31	23,16	26,72	23,07	17,16	19,06	17,06	22,75	19,75
216,45	91,34	63,08	57,81	228,12	99,42	64,29	60,11	59,83

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM II/A-W										
PARÁMETROS ENTRADA	Ambiente: III.a (hasta 500m)			Ambiente: III.a (500-5000m)			Ambiente: III.b			
Individuos Población Inicial	500			500			500			
Iteraciones	50			50			50			
% Mutados	0,05			0,05			0,05			
Recubrimiento	0,45 mm			0,45 mm			0,40 mm			
Dosificación	0,4	0,45	0,5	0,4	0,45	0,5	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable									
	b (mm)	295	335	260	310	360	360	370	280	315
	c (mm)	455	440	550	455	445	445	445	450	420
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	35	40	30	35	30	30	30	40	55
	D <sub>1</sub> (mm)	25	25	32	25	25	25	20	25	25
	D <sub>2</sub> (mm)	6	10	10	8	8	10	8	12	10
	D <sub>3</sub> (mm)	6	8	8	6	6	8	8	6	10
	n <sub>1</sub>	4	4	2	4	4	4	6	4	4
	n <sub>2</sub>	6	3	4	3	3	4	4	2	5
	sep <sub>3</sub> (mm)	175	250	275	166,67	150	250	275	166,67	200
	COSTE (€)	810,49	850,21	854,05	823,71	852,4	871,1	860,3	805,5	867,95
	Duración	21,24	9,15	14,44	26,69	24,3	28,2	32,2	25,8	9,29
Degradación cloruros	196,16	144,35	113,89	812,10	603,5	452,7	143,2	165,0	103,73	

CEM III																
PARÁMETROS ENTRADA	III.a (hasta 500m)					III.a (500-5000m)					III.b					
Individuos Población Inicial	500					500					500					
Iteraciones	50					50					50					
% Mutados	0,05					0,05					0,05					
Recubrimiento	25 mm					25 mm					30 mm					
Dosificación	0,3	0,35	0,4	0,45*	0,5*	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable															
	b (mm)	240	280	185	215	285	280	235	260	185	235	465	320	275	375	290
	c (mm)	490	470	485	490	460	475	470	465	490	455	430	450	470	440	475
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	40	35	50	35	35	35	40	35	50	55	35	35	30	30	40
	D <sub>1</sub> (mm)	25	32	32	32	25	20	32	25	32	32	25	25	25	20	20
	D <sub>2</sub> (mm)	6	8	8	8	8	8	10	8	8	10	6	6	8	6	12
	D <sub>3</sub> (mm)	6	6	6	6	8	6	8	6	6	6	10	10	6	8	8
	n <sub>1</sub>	3	2	2	2	4	5	2	4	2	2	4	4	4	6	5
	n <sub>2</sub>	4	3	3	2	3	3	2	5	2	2	7	5	4	7	2
	sep <sub>3</sub> (mm)	175	175	225	200	225	166,67	275	175	225	150	275	275	200	275	250
	COSTE (€)	751,89	780,15	714,82	730,92	815,32	783,38	747,45	800,91	714,72	748,07	960,31	845,33	805,12	860,04	811,11
	Duración	16,96	21,60	19,17	21,43	20,37	23,56	19,55	26,22	21,15	20,64	25,50	20,87	21,86	24,07	23,20
Degradación cloruros	204,70	129,49	87,18	74,15	65,57	901,76	543,56	348,58	193,69	132,11	149,00	113,40	133,38	92,80	86,61	

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM III								
III.c				IV				
500				500				
50				50				
0,05				0,05				
35 mm				35 mm				
0,3	0,35	0,4	0,45*	0,3	0,35	0,4	0,45*	0,5*
380	230	380	310	235	315	285	305	310
425	460	425	440	465	450	460	445	450
40	55	35	45	50	35	35	40	35
20	32	25	25	32	25	25	25	25
8	10	8	10	6	8	6	10	10
8	8	10	8	6	6	8	8	8
7	2	5	4	2	4	4	4	4
4	2	8	2	4	3	5	2	2
225	275	275	250	175	166,67	275	275	275
898,86	746,51	943,85	826,10	743,91	824,76	809,22	818,84	820,31
26,89	25,77	13,00	24,41	22,17	19,86	21,95	28,23	26,11
147,57	91,34	58,31	55,47	159,86	105,25	68,70	55,66	61,34

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM IV																
PARÁMETROS ENTRADA	Ambiente: III.a (hasta 500m)					Ambiente: III.a (500-5000m)					Ambiente: III.b					
Individuos Población Inicial	500					500					500					
Iteraciones	50					50					50					
% Mutados	0,05					0,05					0,05					
Recubrimiento	25 mm					25 mm					30 mm					
Dosificación	0,3	0,35*	0,4*	0,45*	0,5*	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	
MEJOR SOLUCIÓN	Variable															
	b (mm)	215	245	320	335	345	340	275	310	220	385	325	280	290	385	335
	c (mm)	490	470	455	445	430	435	500	445	485	430	455	470	475	425	445
	H (f <sub>ck</sub> MPa)	35	40	30	35	40	40	35	40	40	35	30	30	40	40	35
	D <sub>1</sub> (mm)	32	32	25	25	32	20	25	25	25	20	25	25	32	20	20
	D <sub>2</sub> (mm)	8	6	10	6	16	8	8	8	8	10	10	8	8	8	8
	D <sub>3</sub> (mm)	6	6	8	6	10	8	6	8	6	8	6	6	8	10	8
	n <sub>1</sub>	2	2	4	4	3	6	3	4	3	6	4	4	2	6	6
	n <sub>2</sub>	2	5	2	5	2	4	3	3	3	3	2	4	3	4	3
	sep <sub>3</sub> (mm)	175	175	275	150	275	250	175	250	200	225	175	200	275	275	250
	COSTE (€)	734,29	751,19	830,54	836,40	916,59	842,67	794,12	828,37	728,52	875,95	832,36	809,65	804,50	883,05	836,20
	Duración	28,57	21,52	23,88	19,70	24,16	26,79	19,16	30,58	23,64	27,93	19,27	23,46	16,48	23,71	25,29
Degradación cloruros	63,68	74,15	61,73	73,52	62,57	233,77	193,69	118,71	79,89	62,60	122,25	117,80	85,68	66,36	80,04	

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

CEM IV								
Ambiente: III.c				Ambiente: IV				
500				500				
50				50				
0,05				0,05				
35 mm				35 mm				
0,3*	0,35*	0,4*	0,45*	0,3*	0,35*	0,4*	0,45*	0,5*
350	320	435	380	385	405	250	310	325
415	460	415	435	425	445	500	420	450
50	35	40	35	40	30	35	70	30
25	25	20	32	25	25	32	25	32
12	6	6	10	6	8	8	8	12
8	8	8	8	10	8	8	6	8
4	4	7	3	5	4	2	4	3
3	5	8	2	6	4	3	3	2
200	200	175	200	250	225	275	100	275
865,26	841,26	940,87	912,68	935,85	902,94	782,23	839,79	874,09
23,35	21,66	31,79	23,14	21,85	24,22	21,78	21,85	21,83
67,09	66,07	61,57	61,10	60,58	67,64	58,44	68,66	59,15

\* El recubrimiento mínimo para estas dos dosificaciones está modificado según lo explicado en el 6º Capítulo.

