



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Influencia de la concentración de cloruros combinados en el inicio de la corrosión en hormigón armado expuesto completamente a agua del mar

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Alejandro Suarez Muñoz

Director: Juan Francisco Sánchez Pérez



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Cartagena, 20 de septiembre de 2018

Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer a mi profesor Juan Francisco Sánchez Pérez la oportunidad de hacer este proyecto con él, ya que gracias a su tutorización y paciencia se han alcanzado todos los objetivos marcados para la realización de este trabajo en los plazos estimados.

Me gustaría dedicar sobre todo este trabajo de final de carrera a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar y ayudarme todos estos años en lo que han podido. Gracias por confiar en mí y estar a mi lado en todas estas etapas de mi vida.

También agradecer a mi hermano Alberto su apoyo en los momentos duros y enseñarme que "si luchas por lo que quieres lo conseguirás". Gracias por esas frases de apoyo en el tablón para levantarme el ánimo.

Agradezco el apoyo que me han dado mi familia y mis amigos durante todos estos años.

Y para finalizar me gustaría dedicar especialmente este trabajo a Tamara, gracias por tener paciencia para aguantar mis locuras, mis tardes enteras de clausura delante del ordenador y estar a mi lado animándome siendo mi apoyo todo este tiempo.

INDICE

INDICE:

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 2 |
| 2. Objetivos | 6 |
| 3. Fundamentos teóricos | 8 |
| 3.1. Relacionados con el objetivo principal | 8 |
| 3.1.1. Normativa del hormigón armado | 8 |
| 3.1.2. Principios generales | 8 |
| 3.1.3. Vida útil | 9 |
| 3.1.4. Durabilidad | 10 |
| 3.1.5. Estados límite de las estructuras de hormigón | 12 |
| 3.1.6. Tipos de exposición a ambientes agresivos | 13 |
| 3.1.6.1. Exposición en ambientes marinos | 17 |
| I. Composición del agua de mar | 17 |
| II. Organismos marinos | 17 |
| III. Temperatura | 18 |
| IV. Presión hidrostática | 18 |
| V. Acción de las mareas | 18 |
| VI. Niebla y rocío | 19 |
| VII. Zonas de ambiente marino | 19 |
| 3.1.7. Material | 21 |
| I. Aglomerantes | 22 |
| II. Agua | 28 |
| III. Áridos | 29 |
| IV. Adiciones | 30 |
| V. Aditivos | 31 |
| VI. Aceros y armaduras | 36 |
| 3.1.8. Factores desencadenantes de la degradación del hormigón | 38 |
| I. Agresiones al hormigón | 38 |
| II. Agresiones al hormigón armado | 49 |
| 3.1.9. Causas de la aceleración del deterioro del hormigón | 58 |
| 3.1.10. Mecanismos de transporte y penetración en el hormigón | 62 |
| 3.1.11. Consecuencias de la presencia de carbonatación e ion cloruro en el hormigón armado | 64 |

| | |
|---|-----|
| 3.2. Relacionados con el objetivo secundario | 66 |
| 3.2.1. Elementos del ordenador | 66 |
| 3.2.2. Arquitectura de Von Neumann | 67 |
| 3.2.2.1. CPU: el procesador | 67 |
| 3.2.2.2. La memoria | 71 |
| 3.2.2.3. Buses de conexión | 71 |
| 3.2.3. Funcionamiento de la arquitectura de Von Neumann | 72 |
| 3.3. Modelos matemáticos empleados | 75 |
| 3.4. Entorno de simulación | 77 |
| 3.4.1. Matlab | 77 |
| 3.4.2. Código de simulación | 81 |
| 4. Desarrollo experimental | 86 |
| 4.1. Condiciones iniciales y de contorno del modelo | 86 |
| 4.2. Análisis del equipo empleado | 90 |
| 5. Análisis de los resultados | 94 |
| 5.1. Tiempos de simulación | 94 |
| 5.2. Porosidad del hormigón / distancia | 105 |
| 5.3. Concentración de cloruros ligados / distancia | 109 |
| 5.4. Concentración de cloruros libres / distancia | 114 |
| 6. Conclusiones | 122 |
| 7. Bibliografía | 125 |

1. INTRODUCCION

1.Introducción:

El hormigón es un material de construcción universal muy importante en la sociedad actual, ya que nos permite obtener estructuras de todo tipo, únicamente con la mezcla de tres componentes básicos, abundantes y baratos: agua, cemento y áridos.

Antes de los años 90 el hormigón era un material que se empleaba sin pensar que su localización podía afectar a su estructura y estabilidad. A partir de esta época, los avances tecnológicos supusieron una gran mejora de sus características internas y en consecuencia un nuevo enfoque hacia nuevas estructuras. Debido a esto, el hormigón es el material más empleado en la construcción ya que sus elevadas características hacen de él un material imprescindible a la hora de realizar edificios, tanto de viviendas como industriales, cerramientos, túneles, carreteras, puentes y viaductos, presas, elementos prefabricados, etc.

Algunas de estas características más destacables del hormigón son:

- Versatilidad. Esta característica le da al hormigón la facilidad de poder usarse de muchas maneras y encontrarse en multitud de construcciones.
- Alta resistencia al fuego. esta característica le ha dado al hormigón una posición importante en estructuras y edificaciones que requieran una alta seguridad frente a incendios.
- Resistencia y durabilidad. En las proporciones adecuadas de sus materiales y cuidando la calidad de sus componentes, el hormigón presenta alta resistencia a la compresión y una larga vida útil
- Mínimo mantenimiento. Las estructuras de hormigón presentan un mantenimiento bajo en comparación a las estructuras creadas con otros materiales. En zonas con ambientes agresivos las estructuras de hormigón requieren un mayor mantenimiento.
- Sencilla fabricación. Gracias a la asequibilidad de los materiales empleados y su fácil utilización, el hormigón es un material de construcción empleado sin la necesidad de un alto conocimiento en la materia.

Para ofrecer una mayor resistencia a la tracción y a la flexión se incorporan barras de acero a la mezcla de hormigón, creando con ello el hormigón armado. Este nuevo material guarda las mismas características del hormigón e incrementa su resistencia a la tracción y a la flexión, pasando de ser un material frágil a otro dúctil.

En contra posición, las agresiones sufridas en una estructura de hormigón se ven incrementadas cuando se emplean armaduras de acero para su construcción. En la figura (1) se puede observar que los principales factores desencadenantes de la agresión en el hormigón armado son aquellos que están relacionados con la corrosión de la armadura de acero: la carbonatación (17%) y la presencia de iones cloruros en el ambiente debido a cloruros externos (33%) e internos (5%).

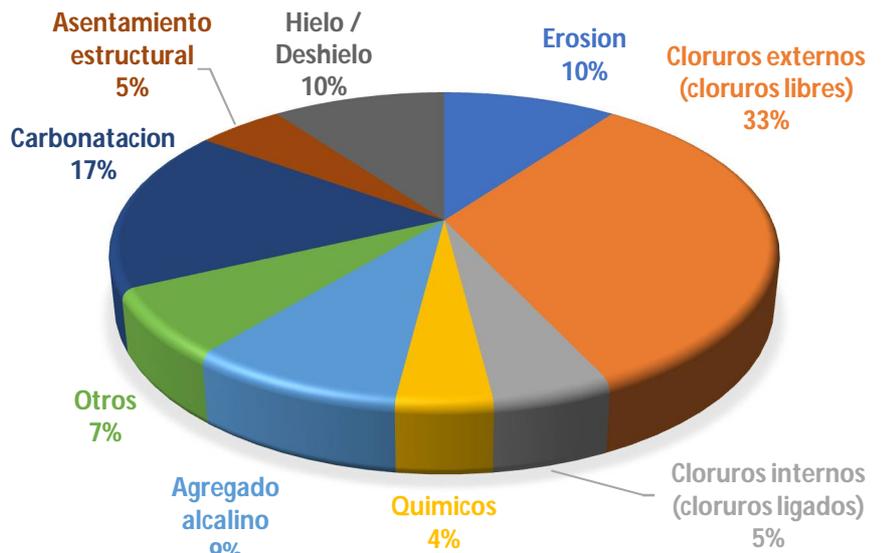


Figura 1 Factores desencadenantes de la agresión en el hormigón armado [1]

Estos materiales guardan una estrecha relación con la localización de la estructura donde se empleen, ya que una estructura sometida a la agresividad de un ambiente marino no se comporta del mismo modo que una estructura sometida a la contaminación de una ciudad.

Un hormigón ideal es aquel que no modifica su estructura interna, permaneciendo inalterable, con el paso del tiempo. Sabemos que esta situación no sucede puesto que, con el paso del tiempo las estructuras de hormigón se ven sometidas a diferentes factores que originan su deterioro. Es importante anticiparse a estos ataques mediante el estudio del comportamiento de las estructuras y análisis de sus patologías tras el daño sufrido. Esta información nos permitirá crear en el futuro estructuras más duraderas y realizar tareas de mantenimiento más efectivas sobre los daños sufridos. En la figura (2) podemos ver el comportamiento de una estructura de hormigón sin mantenimiento (línea roja), o el comportamiento de la misma estructura de hormigón tras aplicarle tareas de

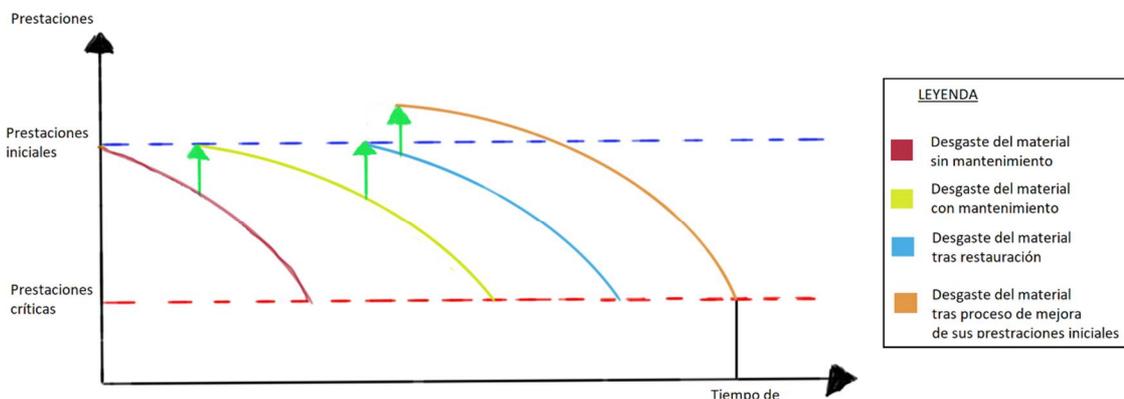


Figura 2 Comportamiento de una estructura de hormigón armado [2]

mantenimiento y restauración (líneas amarilla y azul respectivamente), este mantenimiento permite a la estructura incrementar su vida útil de funcionamiento. Si posteriormente le aplicamos tratamientos a la estructura que incrementen las características iniciales que poseía esta, su durabilidad se verá incrementada considerablemente.

Actualmente disponemos de multitud de herramientas tanto informáticas como analíticas, que nos permiten analizar el comportamiento de una estructura frente a distintos medios agresivos y a una composición determinada del hormigón, para así, poder corregir y anticiparse a posibles fallos que pueden venir derivados de una situación agresiva lo más controlada posible.

En este trabajo, analizaremos computacionalmente el comportamiento de una estructura de hormigón armado sumergida completamente por una de sus caras en un medio agresivo como es el agua de mar saturada al 100% de cloro. Así mismo, estudiaremos las diferencias existentes entre dos equipos de simulación distintos para comprobar como varían los tiempos de simulación frente a las características internas de estos equipos.

La instrucción EHE-08 por la que se aprueba la instrucción de hormigón estructural aprobada por el Real Decreto 1247/2008, marca el ámbito de aplicación para todas las estructuras y elementos estructurales de ingeniería y arquitectura, construidas con hormigones, hormigones armados y pretensados [3]. A lo largo de este trabajo iremos analizando determinados puntos relacionados con esta instrucción.

2. OBJETIVOS

2. Objetivos:

En el departamento de física aplicada de la escuela técnica superior de ingeniería agronómica de la UPCT se ha creado un grupo de investigación para el estudio y caracterización de los efectos producidos por la presencia de medios agresivos sobre el hormigón armado. Para la realización de este trabajo se han buscado los siguientes objetivos principales y se han ido observando nuevas líneas de investigación paralelas, las cuales se han definido en los objetivos secundarios:

- **Objetivos principales:**

El objetivo principal de este trabajo ha sido el estudio de la influencia de iones cloruro en el hormigón armado junto a un medio agresivo como es el medio marino, el cual podemos dividir en los siguientes puntos:

 - Revisión bibliográfica de los mecanismos fisicoquímicos intervinientes en las reacciones y sus consecuencias.
 - Revisión bibliográfica de la instrucción que regula su utilización en España.
 - Estudio de los modelos que caracterizan la penetración de iones cloruro en el hormigón tanto para cloruros de unión como para cloruros libres y el avance del porcentaje de porosidad presente en la estructura de hormigón armado.
 - Análisis de los resultados obtenidos según simulación computacional y comparación entre los distintos modelos para la obtención del modelo con un comportamiento físico lo más real posible.
 - Obtención de las conclusiones

- **Objetivos secundarios:**

Durante el estudio del objetivo principal, se observaron un conjunto de líneas de investigación paralelas que serían de utilidad para la obtención de las conclusiones globales. Estos objetivos secundarios son:

 - Revisión bibliográfica del funcionamiento de un ordenador y sus componentes.
 - Estudio y análisis de las características técnicas del equipo empleado.
 - Análisis de los tiempos de simulación obtenidos para cada uno de los modelos.
 - Análisis de la velocidad de penetración del cloruro de unión y del cloruro libre en el hormigón armado para los diferentes modelos estudiados.

3. FUNDAMENTOS TEORICOS

3. Fundamentos teóricos

3.1. *Relacionados con el objetivo principal*

Para comenzar trataremos los conceptos principales empleados durante la presentación de este trabajo y abordaremos la actual instrucción EHE-08 que marca la aplicación y limitaciones en el empleo del hormigón estructural. Así como los ambientes agresivos a los que debe enfrentarse dicha estructura de hormigón y el tipo de material empleado en cada situación.

Del mismo modo, se analizarán los mecanismos de transporte y penetración de iones cloruro desde un ambiente marino hasta el interior de la estructura y sus posibles consecuencias sobre los materiales que la forman.

3.1.1. Normativa del hormigón armado

Inicialmente en España, las estructuras de hormigón armado estaban mucho más ligadas a la ingeniería que a la arquitectura como así lo demuestran las primeras patentes registradas en la oficina española de patentes y marcas. [5] La primera patente sobre hormigón armado que llega a España es el sistema Monier, este sistema con el paso del tiempo se ha ido mejorando y actualizando. Por consiguiente, las normas españolas existentes sobre hormigón armado también han ido progresando. En la actualidad la instrucción EHE-98 y la instrucción de forjados unidireccionales de hormigón estructural (EFHE-02) han sido derogadas por la actual instrucción EHE-08, aprobada por el Real Decreto 1247/2008 el día 18 de julio de 2008. [3] Esta normativa recoge los cálculos, niveles de seguridad y limitaciones que debe incluir una estructura de hormigón dentro del territorio español.

3.1.2. Principios generales

La instrucción EHE-08 establece el ámbito de aplicación de dicha instrucción para todas las estructuras y elementos de hormigón estructural, de edificación o de ingeniería civil a excepción de los siguientes casos:

- Elementos estructurales mixtos de hormigón y acero estructural.
- Estructuras en las que la acción del pretensado se introduce mediante armaduras activas fuera del canto del elemento.
- Estructuras realizadas con hormigones especiales como son los pesados, refractarios y los compuestos con serrines u otras sustancias similares.
- Estructuras expuestas habitualmente a temperaturas superiores a 70° C
- Tuberías de hormigón empleadas para la distribución de fluidos
- Presas.

Así mismo establece que dicha instrucción es de obligado cumplimiento y no exime de su aplicación por desconocimiento de la misma. [3]

Los materiales y productos empleados con carácter permanente deberán presentar las características suficientes para que la estructura cumpla las exigencias de la instrucción. [3]

3.1.3. Vida útil

El hormigón armado es el material ideal escogido para el sector de la construcción debido a sus altas prestaciones de resistencia y durabilidad. Numerosas estructuras y edificaciones han demostrado estas características a lo largo del tiempo, realizándose sobre ellas un correcto mantenimiento a lo largo de los años.

Son muchos los estudios realizados sobre la vida útil de este material frente a medios agresivos y su durabilidad al paso del tiempo. Realizando diferentes ensayos y pruebas con diferentes mezclas de hormigón. De ahí que se puedan encontrar en la actualidad numerosas normas e instrucciones a nivel mundial en el que se relacionen diferentes parámetros del hormigón armado frente a la agresividad del ambiente al que va a ser expuesto.

La instrucción EHE-08 establece que la estructura de hormigón deberá ser idónea para su uso, durante la totalidad del periodo de vida útil para el que se construye, cumpliendo los siguientes requisitos [3]:

- Seguridad y funcionalidad estructural para la reducción a límites aceptables del riesgo de un comportamiento mecánico inadecuado de la estructura.
- Seguridad en caso de incendio evitando que la estructura sufra daños en caso de este y pueda poner en peligro la integridad de los usuarios.
- Higiene, salud y protección del medio ambiente reduciendo a límites aceptables posibles riesgos que provoquen un impacto medio ambiental.

Esta instrucción establece al inicio del proyecto una vida útil nominal la cual no podrá ser inferior a la mostrada en la tabla (1) para los distintos casos presentados:

| Tipo de estructura | Vida útil nominal |
|---|--------------------------|
| Estructuras de carácter temporal ⁽²⁾ | Entre 3 y 10 años |
| Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (barandillas, apoyos de tuberías, etc.) | Entre 10 y 25 años |
| Edificios o instalaciones agrícolas o industriales y obras marítimas | Entre 15 y 50 años |
| Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media | 50 años |
| Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta | 100 años |
| Edificios de carácter monumental o de importancia especial | 100 años |

Tabla 1 Vida útil de una estructura de hormigón [3]

(2) en ningún caso se considerarán como estructuras de carácter temporal aquellas cuya vida útil nominal supere los 10 años.

3.1.4. Durabilidad

La durabilidad de una estructura de hormigón puede definirse como la capacidad que tiene este de resistir, durante toda la vida útil para la que ha sido proyectado, las condiciones físicas y químicas a las que se encuentra expuesta (condiciones ambientales, físicas, químicas, biológicas o de cualquier proceso de degradación) [3]. Por tanto, un hormigón durable será aquel que conserve su forma original y capacidad para resistir en servicio durante el tiempo proyectado a las condiciones expuestas. Pasado ese tiempo no compensa reparar la estructura debido a su elevado coste y puede ser exigida la demolición de la estructura. [6]

Habitualmente un hormigón sano y compacto presenta una buena durabilidad cuando este se encuentra sometido a condiciones normales tanto ambientales como de cualquier

otro tipo de desgaste. Presentando además, una buena protección del acero frente a la corrosión cuando el hormigón se encuentra armado.

La durabilidad del hormigón está estrictamente relacionada con la porosidad, distribución y tamaño de los capilares de la estructura. Del mismo modo, aunque la permeabilidad no esté directamente relacionada con la durabilidad del hormigón, sí lo está directamente con los mecanismos de penetración de sustancias agresivas al interior del mismo.

La durabilidad de una estructura de hormigón es un proceso complejo donde están involucrados los siguientes elementos: [12]

- Las condiciones ambientales a las que va a estar expuesto.
- Los materiales componentes del hormigón y el mismo hormigón.
- El diseño estructural de la obra.
- La calidad de ejecución de la obra, incluyendo compactación y curado.
- Los sistemas de protección adoptados.

Por tanto, para conseguir estructuras de hormigón durables, debemos actuar en:

- La fase de proyecto: En la fase del proyecto, aplicaremos todas las medidas necesarias para que la duración de la estructura de hormigón tenga la vida útil requerida según el tipo de estructura (tabla (1))
En esta fase, hay que prestar especial atención al tipo de ambiente más o menos agresivo al que se encontrará expuesta la estructura (tabla (2) y tabla (3)). Definiendo con esto, la dosis adecuada de hormigón y los espesores de los recubrimientos de hormigón sobre las barras de acero para evitar su corrosión.
- La fase de ejecución: para conseguir una estructura de hormigón durable es necesario emplear un hormigón de calidad y prestar especial atención a la relación A/C, ya que un valor elevado de esta relación (superior a 0.6) supone una gran cantidad de agua en la mezcla y por consiguiente una alta concentración de poros en la estructura. Del mismo, una baja relación A/C (inferior a 0.3) impide la correcta cristalización de las sales por falta de agua en la mezcla. También se debe evitar la corrosión de las armaduras debida a la pérdida de protección por carbonatación, acción de iones despasivantes u otros efectos provocados por distintos medios agresivos a los que se encuentran expuestos.

La instrucción EHE-08 establece un conjunto de estrategias [3] para conseguir una mayor durabilidad del hormigón armado, considerando todos los posibles mecanismos de degradación a los que se encuentra expuesto y adoptando medidas específicas para la reducción de su agresividad. La estrategia de durabilidad incluirá los siguientes aspectos:

- Selección de formas estructurales adecuadas.
- Consecución de una calidad adecuada del hormigón y sobre todo de la capa exterior.

- Adopción de un espesor de recubrimiento adecuado para la protección de las armaduras.
- Control máximo de las aberturas en las fisuras.
- Dispersión de protecciones superficiales para el caso de explosión a ambientes muy agresivos.
- Adopción de medidas de protección de las armaduras frente a la corrosión.

3.1.5. Estados límite de las estructuras de hormigón

En la instrucción EHE-08 se definen los estados límite como aquellas situaciones en las que puede considerarse que la estructura no cumple alguna de las funciones para las que ha sido proyectada [3]. Esto quiere decir que un estado límite es aquella situación en la que la estructura de hormigón vería superada una o varias de sus propiedades físicas. Dicha instrucción clasifica los estados límites en:

- Estado Límite Último:
Este engloba todas aquellas situaciones que producen el fallo de la estructura por pérdida de equilibrio, colapso o rotura total de la misma o parte de ella. Algunos de los estados últimos que deben tenerse en cuenta son:
 - Fallo por deformación plástica excesiva, rotura o pérdida de estabilidad de la estructura.
 - Fallo por acumulación de deformaciones o fisuración progresiva bajo cargas repetidas.
- Estado Límite de Servicio:
Abarca todos aquellos estados para los que no se cumplen los requisitos de funcionalidad, comodidad o de aspecto.
- Estado Límite de Durabilidad:
Es el producido por las acciones físicas y químicas, diferentes a las cargas y acciones del análisis estructural que puedan degradar las características del hormigón o de las armaduras hasta límites inaceptables.

Para el estudio desarrollado en este trabajo, nos centraremos en analizar con más detalle que factores afectan en mayor medida al estado límite de durabilidad. Una estructura de hormigón proyectada correctamente no debe superar ninguno de estos estados límite definidos en las siguientes situaciones [3]:

- Situaciones persistentes, las cuales correspondan al uso habitual de la estructura.
- Situaciones transitorias, producidas durante la fase de construcción o mantenimiento de la estructura.
- Situaciones accidentales, debidas a condiciones excepcionales aplicables a la estructura.

3.1.6. Tipos de exposición a ambientes agresivos

Durante la proyección de una estructura de hormigón armado, se tienen en cuenta diferentes ambientes de exposición, los cuales vienen definidos por un conjunto de condiciones físicas y químicas. Estos ambientes pueden provocar nuevas cargas y sollicitaciones no habiendo sido consideradas inicialmente en la proyección de la estructura. Así mismo, una estructura de hormigón armado o elementos de esta pueden estar sometidos a una combinación de distintas clases de ambientes agresivos e incluso una combinación de ambientes agresivos químicos.

La instrucción EHE-08 establece que en el caso de que una estructura contenga elementos que se vean sometidos a distintos ambientes, se deberán agrupar estos elementos estructurales según el tipo de ambiente al que están expuestos. Las clases generales de exposición, afectan directamente a la durabilidad del acero e indirectamente a la del hormigón. La tabla (2) muestra las clases generales de exposición ambiental en relación con la corrosión de armaduras, mientras que la tabla (3) cita las clases específicas de exposición ambiental en relación con otros procesos de degradación distintos a la corrosión [3]:

| Clase general de exposición | | | | Localización |
|---|--|-------------|---|--|
| Clase | Subclase | Designación | Tipo de proceso | |
| No agresiva | | I | Ninguno | Interiores de edificios no sometidos a condensación. Elementos de hormigón en masa. |
| Normal | Humedad alta | II a | Corrosión de origen diferente a los cloruros | Interiores sometidos a humedades relativas medias-altas (> 65 %) o a condensación Exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm Elementos enterrados o sumergidos |
| | Humedad media | II b | Corrosión de origen diferente de los cloruros | Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm |
| Marina | Aérea | III a | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (menos de 5 Km) |
| | Sumergida | III b | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente por debajo del nivel de bajamar. |
| | En zonas de carrera de mareas y zonas de salpicadura | III c | Corrosión por cloruros | Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicadura o en zona de carrera de mareas. |
| Con cloruros de origen diferente del medio marino | | IV | Corrosión por cloruros | Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas. |

Tabla 2 Clases generales de exposición [3]

| Clase específica de exposición | | | | Localización |
|--------------------------------|---------------------|-------------|----------------------------|---|
| Clase | Subclase | Designación | Tipo de proceso | |
| Química agresiva | Débil | Q a | Ataque químico | Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta. |
| | Media | Q b | Ataque químico | Elementos en contacto con agua de mar Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media. |
| | Fuerte | Q c | Ataque químico | Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad rápida. |
| Con heladas | Sin sales fundentes | H | Ataque hielo-deshielo | Elementos situados en contacto frecuente con agua o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75 %, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5 °C. |
| | Con sales fundentes | F | Ataque por sales fundentes | Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0 °C. |
| Erosión | | E | Abrasión por cavitación | Elementos sometidos a desgaste superficial Elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua. |

Tabla 3 Clases específicas de exposición [3]

En el caso de estructuras sometidas a ataque químico, la agresividad se clasificará de acuerdo con los criterios recogidos en la tabla (4):

| Tipo de medio agresivo | Parámetros | Tipo de exposición | | |
|------------------------|--|--------------------|--------------|---------------|
| | | Q a | Q b | Q c |
| | | Ataque débil | Ataque medio | Ataque fuerte |
| Agua | Valor del pH según UNE 83.952 | 6,5 – 5,5 | 5,5 – 4,5 | < 4,5 |
| | CO ₂ agresivo (mg CO ₂ / l), según UNE-EN 13.577 | 15 – 40 | 40 – 100 | > 100 |
| | Ion amonio (mg NH ₄ ⁺ / l), según UNE 83.954 | 15 – 30 | 30 – 60 | > 60 |
| | Ion magnesio (mg Mg ²⁺ / l), según UNE 83.955 | 300 – 1000 | 1000 – 3000 | > 3000 |
| | Ion sulfato (mg SO ₄ ²⁻ / l), según UNE 83.956 | 200 – 600 | 600 -3000 | > 3000 |
| | Residuo seco (mg / l), según UNE 83.957 | 75 – 150 | 50 – 75 | < 50 |
| Suelo | Grado de acidez Baumann-Gully (ml / Kg), según UNE 83.962 | > 200 | (*) | (*) |
| | Ion sulfato (mg SO ₄ ²⁻ / Kg), según UNE 83.953 | 2000 – 3000 | 3000 – 12000 | > 12000 |

Tabla 4 Clasificación de la agresividad química [3]

(*) Estas condiciones no se dan en la práctica.

3.1.6.1. Exposición en ambientes marinos

Podemos encontrar distintos tipos de ambientes portadores del ion Cl^- siendo los más destacables el ambiente marino y el ambiente alta montaña. Una estructura de hormigón armado expuesto a un ambiente marino, está en contacto directo con el agua de mar o los vientos marinos, los cuales son portadores de dicho ion agresivo. Una estructura de hormigón armado en un ambiente de alta montaña, está expuesto a acciones de hielo deshielo producidas por sales fundentes. Para el desarrollo de este trabajo nos centraremos en el ambiente marino ya que es el foco de nuestra discusión. A continuación se definen una serie de elementos característicos de los ambientes marinos: [8]

I. Composición del agua de mar

Uno de los principales procesos de degradación del hormigón armado, son los ambientes marinos, debido a su alto contenido de ion cloruro en las sales disueltas en él. Los principales mares y océanos contienen las siguientes sales disueltas: cloruro sódico (NaCl), cloruro magnésico ($MgCl_2$), sulfato cálcico ($CaSO_4$), sulfato magnésico ($MgSO_4$), cloruro potásico (KCl) y sulfato potásico (K_2SO_4). [8]

El agua de mar también contiene oxígeno y dióxido de carbono disuelto, variando las cantidades de estos gases en función de las condiciones locales.

La mayor o menor proporción de dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno en el mar provoca una variación de su PH, disminuyendo su valor por debajo del normal (8.2 - 8.4), pasando a ser aguas acidas que reducen la alcalinidad y resistencia del hormigón, incrementando así mismo la corrosión del acero. [8]

II. Organismos marinos

Los distintos organismos que pueden afectar a las estructuras de hormigón armado suelen ser: algas, erizos, moluscos, percebes y bacterias. [8]

Las algas y moluscos causan problemas cuando la superficie del hormigón es porosa, generando una importante pérdida de alcalinidad.

Los percebes, erizos y moluscos generan ácidos orgánicos que pueden causar fisuras en la superficie del hormigón, pudiendo iniciar así la corrosión en el acero por picadura. [8]

Menos habituales son las bacterias anaeróbicas y aeróbicas que penetran y transforman el sulfuro de hidrogeno en ácido sulfúrico, el cual es un potente corrosivo que ataca tanto al hormigón como a las barras de acero de la armadura.

III. Temperatura

La temperatura de los mares varía con la profundidad (de 2°C a 5°C en profundidades desde los 100 m a los 1000 m) y con la zona (desde -2°C en zonas frías hasta 30°C en zonas tropicales). Esta característica es un factor importante en las reacciones químicas y electroquímicas que se suceden en una estructura de hormigón armado, aumentando los periodos de inicio y propagación de los mecanismos de deterioro en zonas cálidas. [8]

Es importante tener en cuenta la temperatura del aire puesto que la estructura estará sometida a este medio de agresión, el cual le genera tensiones térmicas superiores a las originadas por la diferencia de temperatura del agua de mar.

En la zona de carrera de mareas, la estructura se encuentra sometida a ciclos combinados de calentamiento y enfriamiento, congelación y descongelación y humedad y sequedad. Estos ciclos sinérgicos, deben tenerse en cuenta a la hora de proyectar la estructura de hormigón armado desde el punto de vista de la durabilidad.

IV. Presión hidrostática

La presión hidrostática es la fuerza correspondiente al volumen de agua que hay sobre un punto. Esta presión crece con la profundidad (aumenta el volumen de agua sobre dicho punto), por lo que esta fuerza aumenta y empuja el agua de mar al interior de cualquier estructura de hormigón sumergida a través de sus poros.

V. Acción de las mareas

Las mareas están generadas por la interacción entre la luna y la tierra. Este fenómeno causa dos veces al día, una exposición a ciclos de humedad-sequedad, calor-frío y en climas fríos, ciclos hielo-deshielo.

Estas mareas pueden variar en la zona de carrera de marea de 0.5 m a 15 m. El rango de acción de las mareas debe ser estudiado en cada zona concretamente. Durante los temporales, se producen grandes series de olas generadas por la fricción del viento con el agua. La cantidad de energía transmitida a una estructura de hormigón durante un temporal puede ser de grandes magnitudes. Algunos autores como Gerwick afirman que una gran ola puede llegar a ejercer una fuerza de 30 t/m² sobre la estructura que impacta. [8]

La parte de la estructura sometida a la acción de las olas se denomina zona de salpicadura y puede ser atacada por la erosión de cualquier sólido en suspensión que transporten las olas como es la arena, la grava, el hielo, etc.

VI. Niebla y rocío

En épocas calurosas, el aire caliente procedente de la tierra pasa sobre la superficie del océano y forma la niebla marina. En épocas frías, el aire frío procedente de la tierra pasa sobre la superficie del agua de mar más cálido y forma la niebla marina y las nubes bajas. Estas nieblas impulsadas por el viento generan una acción de rociado de pequeñas gotitas de agua sobre las zonas donde se producen.

El cálculo de la vida útil de una estructura de hormigón armado en este tipo de ambientes debe tener en cuenta:

- El periodo de iniciación. Depende de la velocidad de penetración de los cloruros en el hormigón, siendo esta función de la calidad del hormigón.
- El periodo de propagación de la corrosión. Depende de la disponibilidad de oxígeno en el interior del hormigón, siendo esta característica función del tipo de ambiente que lo rodea y la calidad del hormigón.

VII. Zonas del ambiente marino

El periodo de iniciación y el de propagación en las estructuras de hormigón armado, dependen de la zona de ambiente marino al que estén expuestos sus elementos. Estas zonas tienen sus límites perfectamente definidos, ya que estos se solapan los unos con los otros. Podemos encontrar cinco zonas diferentes:

- Zona enterrada. La parte de la estructura localizada en esta zona, se encuentra enterrada en el fondo marino. Las posibles causas de deterioros que podemos encontrarnos en esta zona son: ataque químico y de organismos al hormigón y crecimiento biológico. Aquí no encontramos grandes problemas ocasionados por el ataque de cloruros o penetración de iones cloruro, ya que se encuentra enterrada en el fondo marino, donde no hay una gran presencia de agua y por tanto de iones que puedan ocasionar daños al hormigón o a la armadura de acero.
- Zona sumergida. Esta zona de la estructura se encuentra permanentemente sumergida por debajo del nivel de marea baja. En esta área, el hormigón se encuentra saturado y es capaz de proteger la armadura de acero del ataque corrosivo del ion cloruro. Por lo que, aunque el agua de mar se encuentra saturada de iones cloruro que pueden avanzar rápidamente y profundizar mucho en el hormigón por la acción de las altas presiones hidráulicas a las que se encuentra sometida, existe una muy baja concentración de oxígeno que produce una corrosión poco significativa de color negro o verde, con productos

poco expansivos. Las causas de deterioros encontradas en esta zona son las mismas que las vistas en la zona anterior.

- Zona de carrera de mareas. Esta zona está comprendida entre el nivel de marea alta y el de marea baja. Aquí el hormigón no llega a secarse debido a una continua inmersión cíclica, siempre está saturado. En esta zona los cloruros avanzan lentamente, pudiendo alcanzar las armaduras con el paso del tiempo sin riesgo de corrosión debido a la baja concentración de oxígeno. En esta zona las principales causas de deterioro del hormigón y las armaduras son debidas a:

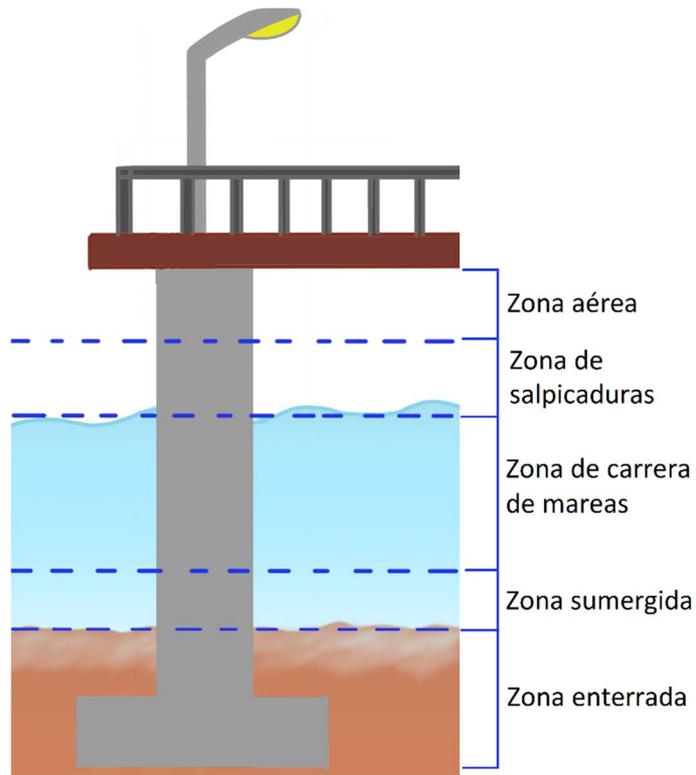


Figura 3 Clasificación de las zonas de ambiente marino

la acción del oleaje y el transporte de sustancias sólidas, corrosión de las armaduras por los cloruros, daño por heladas, crecimientos biológicos y ataques químicos al hormigón.

- Zona de salpicaduras. se encuentra por encima del nivel de marea alta, donde aparecen las salpicaduras de las olas y la espuma en suspensión. Esta zona está sometida a ciclos alternados de humectación directa y secado, según las condiciones térmicas y de humedad presentes en la zona climática. En la zona de salpicadura los cloruros avanzan con rapidez por succión capilar, alcanzando así grandes profundidades en el hormigón, a partir de las cuales los cloruros siguen avanzando por difusión. En esta zona, durante el periodo húmedo el ion cloruro penetra en el hormigón y en el periodo de secado, se evapora el agua, quedando el cloro retenido en el hormigón. Este proceso se repite cíclicamente, por lo que la concentración de ion cloruro es elevada. Esta extensión contiene altas concentraciones de oxígeno y humedad por lo que existe un alto riesgo de corrosión en las armaduras. En esta zona puede darse simultáneamente corrosión por carbonatación. Las posibles causas de deterioro que podemos encontrar en esta extensión son: corrosión de las armaduras por ion cloruro, abrasión debida al oleaje y daño por heladas.
- Zona aérea. En esta extensión, el hormigón no está en contacto directo con el agua de mar. El transporte del ion cloruro se lleva a cabo por las brisas marinas y las nieblas que pueden transportar el cloruro a largas distancias hacia el

interior de la costa, dependiendo de los vientos predominantes de la zona climática. El transporte se realiza principalmente por difusión. En este espacio, el avance se hace más lento que en el resto de las zonas, tardando más en alcanzar las armaduras. Esta extensión al igual que en la zona anterior, existe una alta concentración de oxígeno y humedad, lo que origina una alta corrosión del material. Las posibles causas de deterioro del hormigón y de la armadura en la zona aérea son: fisuras, grietas y desprendimiento del revestimiento en el hormigón y corrosión en las armaduras.

3.1.7. Material

El hormigón armado es el material más empleado para la construcción de estructuras arquitectónicas y de ingeniería. Este material está compuesto por otros elementos diferentes, los cuales en su conjunto le dan las propiedades requeridas por la instrucción EHE-08 para obtener altas prestaciones mecánicas y químicas, así como ofrecer un alto nivel de seguridad y una elevada durabilidad del material.

El hormigón se obtiene como una mezcla fuerte y homogénea de áridos finos, áridos gruesos, un aglomerante y agua, todos ellos en sus correctas proporciones para que fragüe y se endurezca. Durante el proceso de amasado, se pueden incorporar otros materiales (como en nuestro caso de estudio, las armaduras del hormigón armado) para dotar al material de nuevas características.

Los hormigones podemos clasificarlos según las características específicas de los componentes del hormigón, obteniendo los siguientes tipos [4]:

- Hormigón ordinario. Se obtiene de la mezcla de cemento, agua y áridos minerales de varios tamaños.
- Hormigón en masa. Este tipo de hormigón no contiene en su interior ninguna armadura. Se emplea para resistir esfuerzos de compresión.
- Hormigón armado. Este si contiene en su interior una armadura especial de acero sometida a tracción previamente a su colocación.
- Hormigón pretensado. Es un hormigón con una armadura de acero sin un tratamiento especial, sometida a tracción previamente a su colocación.
- Hormigón mixto. En este tipo de hormigón se emplean mezclas de dos o más componentes.
- Hormigón ciclópeo. Este hormigón tiene embebidos en su interior pequeñas y grandes piedras con unas dimensiones mínimas de 30 cm. Es un sistema usado para construcciones de cargas poco importantes, por lo que se emplea en lechos marinos o de río.
- Hormigón aerocluso. Este material incorpora una cantidad de aire inferior al 6 % de su volumen, el cual se distribuye uniformemente en forma de burbujas.

- Hormigón unimodular. Este tipo de hormigón incorpora material árido de un único tamaño.
- Hormigón ligero. Está compuesto por áridos ligeros.
- Hormigón blindado. Este material está compuesto por una capa de espesor variable de hormigón normal y otra superior de piedra embutida. Es una unidad de obra utilizada en pavimentaciones.
- Amianto-cemento. Hormigón donde el árido empleado es el amianto o el asbesto, los cuales son rocas fibrosas cuya principal característica es su elasticidad e incombustibilidad.

La instrucción EHE-08 establece los distintos cementos empleados para cada tipo de hormigón:

| Tipo de hormigón | Tipo de cemento |
|---|---|
| Hormigón en masa | Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T y CEM III/C Cementos para usos especiales ESP VI-1 |
| Hormigón armado | Cementos comunes excepto los tipos CEM II/A-Q, CEM II/B-Q, CEM II/A-W, CEM II/B-W, CEM II/A-T, CEM II/B-T, CEM III/C y CEM V/B |
| Hormigón pretensado incluidos los Prefabricados estructurales | Cementos comunes de los tipos CEM I y CEM II/A-D, CEM II/A-V, CEM II/A-P y CEM II/A-M (V, P) |

Tabla 5 Tipos de cemento según el hormigón empleado [3]

I. Aglomerantes:

El aglomerante es el material que se encarga de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar compactación al conjunto por efectos físicos. Los aglomerantes más empleados en la construcción son: los cementos, las cales y los yesos. Actualmente se están empezando a emplear algunos materiales plásticos como aglomerante. A continuación, se explican algunos de los aglomerantes más empleados:

- Cal:
La cal se obtiene con la calcinación de piedras calizas, sea cual sea su composición y aspecto físico. En la construcción es habitual el uso de cales aéreas según la norma UNE 41.067 (cal aérea para construcción) y las cales hidráulicas a partir de la norma UNE 41.068 (cal hidráulica para construcción)

- **Yeso:**
El yeso es un material habitual en zonas de clima seco. Principalmente es empleado en construcción para unir materiales y elementos constructivos, protección de paramentos tanto interiores como exteriores, decoración, etc. Algunas de las características más relevantes de los yesos son [4]:
 - Su reacción de hidratación es exotérmica, produciendo una rápida expansión del material debido al rápido crecimiento de sus cristales durante la generación de calor.
 - Su resistencia mecánica depende de la naturaleza, composición, finura, cantidad de agua aportada durante el amasado y contenido de humedad relativa en el momento de la rotura.
 - La estructura del yeso le permite acumular una gran cantidad de agua cuando la concentración de esta en el ambiente es muy alta y devolverla cuando el ambiente se reseca. Esta característica le brinda al yeso una alta capacidad de resistencia al fuego en contraposición a una alta capacidad de corrosión de los aceros.

- **Cemento:**
El cemento es un polvo muy fino compuesto de roca caliza y otros minerales que absorben agua. Su proceso de fabricación consiste en calentar una mezcla de roca caliza, arcilla, hierro y otros minerales a una temperatura aproximada de 1500°C, obteniéndose como producto el Clinker. Este se muele junto con yeso para obtener un polvo de color gris muy fino. La instrucción EHE-08 establece que se podrán emplear aquellos cementos recogidos en la instrucción para la recepción de cementos (RC-16) aprobada por el Real Decreto 256/2016 siempre que se cumplan las características que se exigen en la instrucción EHE-08. Los cementos indicados en la instrucción RC-16 están recogidos en la siguiente tabla:

| Tipos | Denominación | Designación |
|--------------|-------------------------------------|--------------------|
| CEM I | Cemento portland | CEM I |
| CEM II | Cemento portland con escoria | CEM II / A-S |
| | | CEM II / B-S |
| | Cemento portland con humo de sílice | CEM II / A-D |
| | Cemento portland con puzolana | CEM II / A-P |
| | | CEM II / B-P |
| | | CEM II / A-Q |
| CEM II / B-Q | | |

| | | |
|---------|---|---------------|
| | Cemento portland con ceniza volante | CEM II / A-V |
| | | CEM II / B-V |
| | | CEM II / A-W |
| | | CEM II / B-W |
| | Cemento portland con esquistos calcinados | CEM II / A-T |
| | | CEM II / B-T |
| | Cemento portland con caliza | CEM II / A-L |
| | | CEM II / B-L |
| | | CEM II / A-LL |
| | | CEM II / B-LL |
| | Cemento portland mixto | CEM II / A-M |
| | | CEM II / B-M |
| CEM III | Cemento con escorias de horno alto | CEM III / A |
| | | CEM III / B |
| | | CEM III / C |
| CEM IV | Cemento puzolánico | CEM IV / A |
| | | CEM IV / B |
| CEM V | Cemento compuesto | CEM V / A |
| | | CEM V / B |

Tabla 6 Tipos de cemento según instrucción RC-16 [11]

Así mismo, la instrucción EHE-08 recoge en una serie de tablas el tipo de cemento a utilizar según la aplicación para la que se vaya a utilizar:

| Aplicación | Cementos recomendados |
|--|--|
| Elementos estructurales prefabricados de hormigón armado | Resultan adecuados los cementos comunes (con alta resistencia inicial) de los tipos CEM I, CEM II / A y adecuado el cemento común tipo CEM IV / A cuando así se deduzca de un estudio experimental específico. |
| Hormigón en masa y armado en grandes volúmenes | Resultan muy adecuados los cementos comunes tipos CEM III / B y CEM IV / B y adecuados los cementos comunes de los tipos CEM II / B, CEM III / A, CEM IV / A y CEM V / A. Cementos para usos especiales ESP VI-1. |

| | |
|---|---|
| | Es muy recomendable la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH) y de muy bajo calor de hidratación (VLH) según los casos. |
| Hormigón de alta resistencia | Muy adecuados los cementos comunes tipo CEM I y adecuados los cementos comunes tipos CEM II / A-D y CEM II / A 42,5 R. El resto de cementos comunes tipo CEM II / A pueden resultar adecuados cuando así se deduzca de un estudio experimental específico. |
| Hormigones para Reparaciones rápidas de urgencia | Los cementos comunes tipos CEM I, CEM II A-D, y el cemento de aluminato de calcio (CAC). |
| Hormigones para desencofrado y descimbrado rápido | Los cementos comunes tipo CEM I y CEM II. |
| Hormigón proyectado | Los cementos comunes tipo CEM I y CEM II / A. |
| Hormigones con áridos Potencialmente reactivos | Resultan muy adecuados los cementos comunes tipos CEM III, CEM IV, CEM V, CEM II A-D, CEM II B-S y CEM II/B-V, y adecuados los cementos comunes tipo CEM II B-P y CEM II / B-M. |
| Cimentaciones de hormigón en masa | Muy adecuados los cementos comunes tipo CEM IV / B, siendo adecuados el resto de cemento comunes, excepto los CEM II / A-Q, CEM II B-Q, CEM II A-W, CEM II B-W, CEM II A-T, CEM II B-T. En todos los casos es recomendable la característica adicional de bajo calor de hidratación (LH). Es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR) o al agua de mar (MR) cuando corresponda. |
| Cimentaciones de hormigón armado | Muy adecuados los cementos comunes tipo CEM I y CEM II / A, siendo adecuados el resto de cemento comunes a excepción de los CEM III / B, CEM IV / B, CEM II / A-Q, CEM II / B-Q, CEM II / A-W, CEM II / B-W, CEM II / A-T y CEM II / B-T Es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR) o al agua de mar (MR) cuando corresponda. |

Tabla 7 Tipos de cemento en función de la aplicación (1) [3]

| Aplicación | Cementos recomendados |
|-------------------------------|---|
| Presas de hormigón vibrado | Cementos comunes de los tipos CEM II / A, CEM III / B y CEM IV / A. |
| Presas de hormigón compactado | Cementos comunes de los tipos CEM III, CEM IV y CEM V. Cementos para usos especiales ESP VI-1. Cementos especiales de muy bajo calor de hidratación VLH III, VLH IV y VLH V, y Cementos de escoria de horno alto de baja resistencia inicial L. |

Tabla 8 Tipos de cemento en función de la aplicación (2) [3]

La instrucción EHE-08 hace una distinción especial para las aplicaciones hidráulicas según el tipo de hormigón que se vaya a utilizar:

| Aplicación | Tipo de hormigón | Cementos recomendados |
|---|-------------------------|--|
| Obras portuarias y marítimas | En masa | Cementos comunes, excepto los tipos CEM III / C, CEM II / A-Q, CEM II / B-Q, CEM II / A-W, CEM II / B-W, CEM II / A-T y CEM II B-T |
| | Armado | Cementos comunes, excepto los tipos CEM II / A-Q, CEM II / B-Q, CEM II / A-W, CEM II / B-W, CEM II / A-T, CEM II / B-T, CEM III / C y CEM V / B. |
| | Pretensado | Cementos comunes (con alta resistencia) de los tipos CEM I, CEM II / A-D, CEM II / A-P, CEM II / A-V y CEM II / A-M (V-P). |
| Tubos de hormigón, canales y otras aplicaciones hidráulicas | En masa | Cementos comunes, excepto los tipos CEM II / A-Q, CEM II / B-Q, CEM II / A-W, CEM II / B-W, CEM II / A-T y CEM II B-T y CEM III / C |
| | Armado | Cementos comunes, excepto los tipos CEM II / A-Q, CEM II / B-Q, CEM II / A-W, CEM II / B-W, CEM II / A-T, CEM II / B-T, CEM III / C y CEM V / B. |
| | Pretensado | Cementos comunes (con alta resistencia) de los tipos CEM I, CEM II / A-D, CEM II / A-P, CEM II / A-V y CEM II / A-M (V-P). |

Tabla 9 Tipos de cemento en función de la aplicación (3) [3]

La misma instrucción recomienda una serie de cementos a utilizar según la clase de exposición a la que esté sometida la estructura:

| Clase de exposición | Descripción proceso agresivo | Cementos recomendados |
|----------------------------|---|---|
| I | Ninguno | Todos los cementos recomendados según el tipo de aplicación. |
| II | Corrosión de las armaduras de origen diferente a los cloruros | CEM I, cualquier CEM II (preferentemente CEM II / A), CEM III / A y CEM IV / A. |
| III | Corrosión de las armaduras por cloruros de origen marino | Muy adecuados los cementos CEM II / S, CEM II / V (pref. CEM II / B-V), CEM II / P (pref. CEM II / B-P), CEM II / A-D, CEM III, CEM IV (pref. CEM IV / A) y CEM V / A. Requiere el empleo de características adicionales de resistencia al agua de mar (MR). |
| 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. |
| Q | Ataque al hormigón por sulfatos | Los mismos que para la clase de exposición III. Requiere el empleo de características adicionales de resistencia a los sulfatos (SR). |
| | Lixiviación del hormigón por aguas puras, ácidas, o con CO ₂ agresivo. | Los cementos comunes de los tipos CEM II / P, CEM II / V, CEM II / A-D, CEM / II-S, CEM III, CEM IV y CEM V. |
| | Reactividad álcali-árido. | Cementos de bajo contenido en alcalinos (óxidos de sodio y de potasio) en los que: $(Na_2O)_{eq} = Na_2O (\%) + 0,658 K_2O (\%) < 0,60.$ |

Tabla 10 Tipos de cemento en función de la clase de exposición [3]

La tabla (11) muestra las prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes según su clase de resistencia:

| Clase de resistencia | Resistencia a la compresión ⁽²⁾ UNE-EN 196-1 (N/mm ²) | | | Estabilidad de volumen UNE-EN 196-3 (Expansión, mm) | | |
|-----------------------|---|--------|---------------------|---|------|--|
| | Resistencia inicial | | Resistencia nominal | | | |
| | 2 días | 7 días | 28 días | | | |
| 32.5 L ⁽¹⁾ | - | ≥ 12.0 | ≥ 32.5 | ≤ 52.5 | ≤ 10 | |
| 32.5 N | - | ≥ 16.0 | | | | |
| 32.5 R | ≥ 10.0 | - | | | | |
| 42.5 L ⁽¹⁾ | - | ≥ 16.0 | ≥ 42.5 | ≤ 62.5 | | |
| 42.5 N | ≥ 10.0 | - | | | | |
| 42.5 R | ≥ 20.0 | - | | | | |
| 52.5 L ⁽¹⁾ | ≥ 10.0 | - | ≥ 52.5 | - | | |
| 52.5 N | ≥ 20.0 | - | | | | |
| 52.5 R | ≥ 30.0 | - | | | | |

Tabla 11 Prescripciones mecánicas y físicas de los cementos comunes [3]

(1) Clase de resistencia definida para los cementos de la clase CEM III

(2) De valor 1 N/mm² = 1 MPa

La instrucción EHE-08 considera cementos de endurecimiento lento aquellos de clase resistente 32.5N, de endurecimiento normal los de clases 32.5R y 42.5N y de endurecimiento rápido los de clases 42.5R, 52.5N y 52.5R.

II. Agua:

Es importante conocer este componente de la mezcla puesto que su relación con la cantidad de cemento empleada (A/C), supone un factor decisivo en la calidad de un hormigón. Si la relación A/C es superior a 0.6, la cantidad de agua empleada es elevada en comparación con la proporción de cemento usada, lo que originaría un incremento en la concentración de poros en la estructura. Por el contrario, si esta relación es inferior a 0.3, la cantidad de agua empleada es muy pequeña en comparación a la cantidad de cemento, ocasionando que el cemento no cristalice correctamente y se cree un hormigón frágil.

El agua se incorpora a la mezcla junto al resto de componentes del hormigón con los siguientes objetivos [4]:

- Hidratar los componentes mezclados
- Actuar como lubricante, haciendo manejable la masa.
- Hacer crecer el espacio en la pasta, para añadir el resto de los productos hidratantes del cemento.

Según Manuel Fernández Cánovas, podemos diferenciar tres tipos de aguas: [12]

- Agua de amasado: en este proceso, el agua actúa en las reacciones de hidratación del cemento y confiere al hormigón la manejabilidad adecuada para su correcta utilización. La cantidad de agua empleada en este proceso está limitada a la mínima necesaria, ya que un contenido de agua en exceso se evapora creando huecos en el hormigón disminuyendo su resistencia.
- Agua de curado: el agua empleada en este proceso se añade para compensar las pérdidas por evaporación y permitir nuevos procesos de hidratación. En curados de poca duración el agua empleada puede contener más materia orgánica e inorgánica que las de amasado siempre que no tenga importancia que el hormigón adquiera manchas superficiales, en curados prolongados, la cantidad de agua empleada para el amasado puede ser también perjudicial en este caso.
- Agua para el lavado de áridos: este tipo de agua no debe contener una cantidad excesiva de sustancias en suspensión o disueltas, para evitar películas dañinas o poco adherentes sobre las superficies de los áridos.

En cualquiera de los tres tipos anteriores queda completamente prohibido el empleo de agua de mar debido a su efecto negativo sobre la resistencia mecánica. El agua de amasado y de curado deben de ser aptas para desempeñar sus correctas funciones. Cuando no se disponga de datos o se tengan dudas sobre el agua empleada, se procederá a realizar un análisis de aguas. Las aguas empleadas deben cumplir unos requisitos establecidos por la instrucción EHE-08.

III. Áridos:

Los áridos son materiales granulares de minerales formados por fragmentos de distintas dimensiones destinados a la producción de mortero, hormigones, capas de cimentación y firmes de carreta, entre otras aplicaciones industriales. Aunque no forman parte del fraguado y endurecimiento del hormigón, tienen un importante papel económico y técnico en sus características, reduciendo aproximadamente un 80% el volumen de hormigón empleado.

Dependiendo de la aplicación a la que destinen los áridos, estos deberán reunir unas determinadas características asociadas a su naturaleza o proceso empleado para su obtención. Las características más destacadas son: [13]

- Propiedades geométricas. Son el tamaño, forma del árido, caras de fractura, calidad de los granos finos, etc.
- Propiedades mecánicas y físicas. Es la resistencia a la fragmentación, entumecimiento, resistencia al pulido, resistencia al desgaste, densidad, contenido de agua, porosidad, etc.
- Propiedades térmicas y cíclicas. Resistencia a los cambios de temperatura, etc.
- Propiedades químicas. Es la concentración de cloruros, azufres, agentes contaminantes ligeros, etc.

Cada una de estas propiedades vienen reguladas por la instrucción EHE-08 para así permitir alcanzar una adecuada resistencia, durabilidad u otra exigencia requerida por dicha instrucción para la producción hormigón.

Los tipos de áridos que nos podemos encontrar se clasifican en:

- Áridos naturales. Proviene de procesos naturales sin más transformación que la requerida para su recolección y clasificado. Se clasifican en función de:
 - La composición. Pudiendo ser calizos, silíceos, areniscas, etc. Dependiendo de su procedencia natural.
 - Su mecanismo de obtención. Produciéndose esta recolección por machaqueo, mecanismos de erosión, rodadura, etc.
- Áridos artificiales. Se fabrican con materias primas sometidos a distintos tratamientos mecánicos, químicos, térmicos, etc. Estos tipos de áridos se pueden clasificar según su proceso de obtención.

IV. Adiciones:

La instrucción EHE-08 define las adiciones como aquellos materiales inorgánicos, puzolánicos o con hidraulicidad latente, que una vez divididos pueden ser añadidos al hormigón con el fin de mejorar alguna de sus propiedades [3]. Las adiciones pueden ser empleadas como un componente más del hormigón siempre que esta no afecte negativamente a las características del hormigón o de la armadura ni represente un peligro para la durabilidad del hormigón. La instrucción EHE-08 reconoce dos tipos de adiciones al hormigón en el momento de su fabricación:

- Cenizas volantes. La instrucción las define como residuos sólidos que se recogen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores.
- Humo de sílice. Del mismo modo, la instrucción la define como un subproducto originado por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos eléctricos de arco para la producción de silicio y ferrosilicio.

Estos dos tipos de adiciones no podrán contener elementos perjudiciales para la durabilidad del hormigón o que puedan causar corrosión en las armaduras.

V. **Aditivos:**

Los aditivos se pueden considerar como el cuarto componente para la fabricación del hormigón [12]. La instrucción EHE-08 define los aditivos como aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado o durante el mismo en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, produce una modificación deseada en sentido positivo, en estado fresco o endurecido de alguna de sus características, propiedades habituales o de su comportamiento. Dicha instrucción establece unas restricciones en la aplicación de los aditivos:

- En el hormigón armado o pretensado, no se podrá emplear el cloruro de calcio y en general ningún producto en cuya composición intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos u otros componentes que puedan ocasionar corrosión en las armaduras.
- En elementos pretensados mediante armaduras ancladas por adherencia, no se podrán emplear aditivos de carácter aireante.
- En la prefabricación de elementos con armaduras pretensas elaborados con máquina de fabricación continua, podrán emplearse plastificantes que tengan un efecto secundario de inclusión de aire, siempre que no afecte a la adherencia entre el hormigón y la armadura.

Podemos identificar dos funciones claras de los aditivos:

- Su función principal es la de producir una única modificación de alguna de las características del hormigón, pasta o mortero sobre el que el que aplica.
- Su función secundaria destaca por modificar una o varias de las características de estos materiales, independientemente de la modificada por la función principal.

Para los aditivos empleados en el hormigón, el mortero o las pastas, Manuel Fernández Cánovas propone la siguiente clasificación [12], basándose en la norma UNE 83.200 la cual ha sido reemplaza por la actual norma española y europea UNE-EN 934-2:2010+A1:2012:

Aditivos que modifican la reología. Permiten disminuir el contenido de agua de un hormigón para obtener la misma trabajabilidad o aumentar la trabajabilidad sin modificar la cantidad de agua.

| Tipos de aditivos | Función principal | Usos |
|--|--|--|
| Plastificantes | <p>Mejoran la trabajabilidad para una cierta relación A/C.</p> <p>Permite reducir o aumentar la cantidad de agua empleada para una trabajabilidad determinada.</p> <p>Permiten controlar el tiempo de fraguado en épocas calurosas y obtener con ello una gran cohesión y plena hidratación del cemento.</p> | <p>Estos aditivos son necesarios cuando la mezcla de hormigón contiene poco finos o una débil concentración de cemento.</p> <p>Obtención de morteros más trabajables, compactos y menos tendencia al fisuramiento.</p> |
| Fluidificantes / reductores de agua | <p>Reduce la cantidad de agua empleada para una trabajabilidad determinada.</p> <p>Aumenta la trabajabilidad del material para una misma cantidad de agua.</p> | <p>Deben emplearse en hormigones secos.</p> <p>Su uso esta requerido para hormigones con una alta calidad estructural exigida.</p> <p>Se aconseja el empleo de estos aditivos para hormigones bombeados, bajo el agua, preamasados, inyectados, etc.</p> |
| Superfluidificantes / reductores de agua de alta actividad | <p>Originan una importante reducción de la cantidad de agua en el amasado, cuando se emplean como reductores de alta actividad.</p> <p>Aumentan significativamente la trabajabilidad para una relación A/C dada.</p> | <p>Se emplea en hormigones donde se desea asegurar una alta trabajabilidad y buena resistencia en los bombeos a grandes distancias.</p> |

Tabla 12 Aditivos que modifican la reología

Aditivos que modifican el tiempo de fraguado. Aumentan o disminuyen el tiempo de fraguado, al mismo tiempo que se aumenta o disminuye el contenido de agua presente en el hormigón.

| Tipos de aditivos | Función principal | Usos |
|---------------------------------|---|---|
| Aceleradores del fraguado | <p>Favorecen la disolución del cemento, lo que origina un aumento de la velocidad de hidratación de la masa.</p> <p>Reducción del tiempo de fraguado.</p> | <p>Rápido desencofrado en la prefabricación de elementos estructurales.</p> <p>En hormigones prefabricados, pretensados y postensados.</p> <p>Se emplea para trabajos urgentes y ambientes fríos.</p> |
| Retardadores del fraguado | <p>Aumentan o retrasan el tiempo de fraguado.</p> <p>Puede inhibir el fraguado y endurecimiento del hormigón si no se emplean en las dosis adecuadas.</p> | <p>Para ambientes calurosos.</p> <p>Transporte del hormigón a largas distancias.</p> |
| Aceleradores del endurecimiento | <p>Aumentan o aceleran el desarrollo de las resistencias mecánicas iniciales.</p> | <p>En construcciones que requieran entrar en carga en un breve espacio de tiempo tras su fabricación.</p> |

Tabla 13 Aditivos que modifican el tiempo de fraguado

Aditivos que modifican el contenido de aire. Estos aditivos producen en el hormigón pequeñas burbujas de aire uniformemente repartidas y con un volumen controlado para mejorar su comportamiento frente a las heladas.

| Tipos de aditivos | Función principal | Usos |
|-----------------------------|--|---|
| Inclusores de aire | Introducen en la masa un elevado número de pequeñas burbujas de aire, que aumentan la porosidad de la estructura. | <p>Para hormigones con una alta resistencia a ciclos hielo / deshielo.</p> <p>En hormigones de pavimentos y presas.</p> <p>Incremento de la trabajabilidad de hormigones pobres, mejora de la impermeabilidad, etc.</p> |
| Generadores de gas | Introducen en la masa un elevado número de pequeñas burbujas de gas por medio de una reacción química, aumentando la porosidad de la estructura. | Fabricación de morteros celulares de gran ligereza. |
| Generadores de espuma | Producen espuma con burbujas uniformemente distribuidas por el hormigón, incrementando así la concentración de poros en la estructura. | <p>Paneles y placas armadas.</p> <p>Revestimiento proyectado, aislante térmico y anticondensante.</p> |
| Desaireante o antiespumante | Eliminan el exceso de aire introducido por la aplicación de áridos o aditivos para obtener otra función distinta. | En hormigones que requieran resistencia a ataques químicos, atmosféricos y agresiones físicas. |

Tabla 14 Aditivos que modifican el contenido de aire

Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones físicas. Su función principal consiste en incrementar la resistencia a fenómenos de naturaleza física del hormigón.

| Tipos de aditivos | Función principal | Usos |
|---------------------------------|---|--|
| Protectores contra las heladas | Evita que el hormigón endurecido se deteriore por las heladas. | En hormigones que requieran una resistencia a los ciclos hielo/deshielo, con alta durabilidad y alta resistencia a la compresión. |
| Anticongelantes | Reducen el punto de congelación del agua de amasado y evitan la aparición de cristales de hielo en el hormigón. | Se emplea para trabajos con hormigones y morteros en climas fríos donde se esperen heladas a lo largo del día o la noche. |
| Repulsores de agua o hidrófugos | Reducen la capacidad de absorción de agua por parte del hormigón. | Su uso está indicado para la impermeabilización de morteros y hormigones empleados para la construcción de estructuras impermeables. |

Tabla 15 Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones físicas

Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones fisicoquímicas. Su principal objetivo consiste en incrementar la resistencia de los conglomerados y de las armaduras frente a ataques de naturaleza fisicoquímica.

| Tipos de aditivos | Función principal | Usos |
|--|---|--|
| Inhibidores de corrosión de las armaduras | Reducir la posibilidad de corrosión del acero en las armaduras de las estructuras de hormigón. | En estructuras de ingeniería civil como son puentes, túneles, muros de contención, etc. En estructuras sometidas a ambientes agresivos como son industrias o puertos. |
| Modificadores de la reacción álcali-áridos | Imposibilitan la reacción entre determinados áridos y elementos álcalis contenidos en el cemento. | En hormigones que requieran resistencia a ataques químicos, atmosféricos y agresiones físicas. |

Tabla 16 Aditivos que mejoran la resistencia a las acciones fisicoquímicas

Otros aditivos a considerar pueden ser:

- Aditivos para el bombeo. Estos reducen el rozamiento de la mezcla con las superficies de las tuberías de conducción sin alterar su relación agua/cemento
- Biocidas. Estos aditivos son herbicidas y fungicidas que evitan la proliferación de organismos vegetales y animales en el hormigón.
- Aditivos para hormigones y morteros proyectados. Mejoran las condiciones de proyección al disminuir el descuelgue del material proyectado y el rechazo.
- Aditivos para inyecciones. Incrementan la fluidez de los rellenos de inyección y reducen los riesgos de exudación y decantación.
- Desencofrantes o desmoldantes. Estos evitan que el hormigón se adhiera a los moldes, manteniéndolos en perfecto estado. Se caracterizan por no atacar la superficie, ni penetrar en el hormigón.
- Colorantes. Estos aditivos de naturaleza inorgánica son pigmentos que se incorporan a la masa del hormigón en el momento de la mezcla con la finalidad de dar un color diferente al presentado por el hormigón de manera natural.

VI. Aceros y armaduras:

La instrucción EHE-08 reconoce dos tipos de aceros para armaduras:

- Acero pasivo. Están formados de acero laminado en caliente o en frío con sección circular y normalizados. Se denominan pasivos puesto que se colocan en los moldes de hormigón sin tensión y recibiendo dicha tensión únicamente cuando la estructura de hormigón entra en carga. La instrucción EHE-08 reconoce para la elaboración de armaduras pasivas el empleo de los siguientes productos de acero:
 - Barras rectas o rollos de acero corrugado soldable.
 - Alambres de acero corrugado o grafilado soldable.
 - Alambres lisos de acero soldable

Los productos de acero anteriormente citados únicamente se podrán emplear conforme a lo establecido en la norma UNE-EN 10080. La cual establece los posibles diámetros nominales de las barras corrugadas, los requisitos para la fabricación de mallas electrosoldadas mediante alambre, etc.

La instrucción EHE-08 define la armadura pasiva como el resultado de montar en el molde o encofrado, el conjunto de armaduras normalizadas, armaduras elaboradas o ferrallas armadas las cuales, tras unos tratamientos adecuados, tienen una función estructural. Sus características mecánicas, químicas y de

adherencia serán las de las armaduras normalizadas o de la ferralla armada que la compone. Esta instrucción reconoce los siguientes tipos de armaduras:

- Ferralla armada. Es el resultado de aplicar a las armaduras elaboradas (cada una de las formas o disposiciones de elementos que resultan de aplicar los procesos de enderezado, corte y de doblado a partir de acero corrugado o mallas electrosoldadas) los correspondientes procesos de armado, bien mediante atado por alambre o mediante soldadura no resistente.
 - Mallas electrosoldadas. Son las armaduras formadas mediante la disposición de barras o alambres corrugados longitudinal y transversalmente de igual o distinto diámetro nominal, las cuales se cruzan entre si perpendicularmente y sus puntos de contacto están unidos mediante soldadura eléctrica.
 - Armaduras básicas electrosoldadas en celosía. Es una estructura formada por un cordón de acero corrugado superior y uno o varios inferiores, y un conjunto de elemento transversales, lisos o corrugados, continos o discontinuos y unidos a los cordones longitudinales mediante soldadura eléctrica. Para esta armadura, la instrucción EHE-08 establece que los cordones longitudinales serán fabricados a partir de barras corrugadas o alambre corrugados, mientras que los elementos transversales de conexión se elaboran a partir de alambres lisos o corrugados.
- Acero activo. Están formados por aceros de alta resistencia. Se denominan aceros activos, puesto que se les introduce una fuerza de pretensado antes de colocarlos en el molde, para que esta se transmita posteriormente al elemento estructural. Los elementos que constituyen la armadura activa pueden ser:
 - Alambres. Son elementos de sección maciza, liso o grafilado, procedente de un estirado en frio o trefilado de alambón.
 - Cordón de 2 o 3 alambres. Es un conjunto compuesto por dos o tres alambres de igual diámetro nominal, todos ellos enrollados helicoidalmente con el mismo paso y el mismo sentido de torsión, sobre un eje ideal común.
 - Cordón de 7 alambres. Este cordón, está formado por un conjunto de seis alambres del mismo diámetro nominal, enrollados helicoidalmente, con el mismo paso y en el mismo sentido de torsión, alrededor de un alambre recto central de diámetro entre un 2% y un 5% superiores al diámetro nominal.

- Cable. Este elemento está formado por varios cordones individuales enrollados helicoidalmente alrededor de un núcleo central, formado por un alambre, un muelle o un cordón.
- Barra. Es un producto de sección maciza que se suministra únicamente en forma de elemento rectilíneo, con extremos roscados para tensar con paso de tuerca.

Se denomina tendón al conjunto de las armaduras paralelas de pretensado que, estando alojadas en un mismo conducto, se consideran en los cálculos de una sola armadura.

La instrucción EHE-08 establece que el producto de acero para las armaduras activas deberá estar libre de defectos superficiales producidos durante su etapa de fabricación que impidan su adecuada utilización. se permite una ligera capa de óxido superficial no adherente, no son admisibles alambre o cordones oxidados.

La instrucción EHE-08 define la armadura activa como las disposiciones de elementos de aceros de alta resistencia mediante las cuales se introduce la fuerza del pretensado en la estructura. Pueden estar constituidas de alambres, barras o cordones.

3.1.8. Factores desencadenantes de la degradación del hormigón

Las agresiones que se pueden presentar en una estructura de hormigón armado son diferentes según afecten al hormigón o a la armadura de acero. Las agresiones que afectan al hormigón están más relacionadas con reacciones fisicoquímicas o abrasiones debidas a sustancias u objetos que atacan la superficie del hormigón, en cuanto a las agresiones que afectan a las armaduras de acero, es predominante la corrosión, ya sea por un mecanismo u otro. A continuación, se exponen los distintos tipos de agresiones según afecten al hormigón o al acero de la armadura:

I. Agresiones al hormigón:

Las agresiones a las que se ve sometida una estructura de hormigón pueden ser de distinta naturaleza, ya sean ataques físicos (por acción de la erosión, transporte de sustancias por el agua, por el fuego, etc.) o ataques químicos (reacción con los áridos, reacción con ácidos, etc.). A continuación, se presentan distintos tipos de agresiones apoyándonos en las descritas por el autor Manuel Fernández Cánovas:

Ataques físicos:

- Ataque por abrasión:

Este ataque sobre el hormigón se produce cuando roza o choca un cuerpo sobre su superficie. Esta abrasión puede ser debida al transporte de sustancias por el aire, transporte de sustancias por el agua o por el rozamiento de elementos rodantes sobre la superficie. Cuando el hormigón está expuesto al ataque por abrasión de sustancias u objetos transportados por el agua, el daño ejercido sobre la superficie dependerá de la velocidad, la cantidad, el tamaño, la forma y el peso de las partículas arrastradas y la rugosidad del hormigón.

La erosión por cavitación se produce cuando dentro de un líquido que circula a gran velocidad, se produce la explosión de burbujas de aire u otro gas que, al implosionar en zonas de alta presión en contacto continuo con el hormigón, producen sobre él un deterioro continuo que puede provocar la creación de cavernas. [12] Este tipo de erosión es difícil de solucionar, aunque actualmente para reducir sus efectos se están tomando algunas medidas como son: cambios muy suaves de dirección bien unidos entre sí y el empleo de hormigones de árido lo más fino posible, bien adherido a una pasta de buena calidad.

- Ataque del fuego sobre el hormigón:

Cuando se somete el hormigón a la acción del fuego, sus componentes sufren algunas modificaciones: [12]

- A partir de los 100 °C el agua libre en los poros comienza a evaporarse retardando de esta forma el calentamiento de la estructura.
- Entre los 200 °C y los 300°C, la pérdida de agua capilar se ha completado sin que se aprecien alteraciones en la estructura del cemento hidratado y sin que disminuya apreciablemente la resistencia del hormigón.
- De 300 °C a 400 °C se produce una pérdida de agua en el gel del cemento, lo que origina un ligero descenso de las resistencias y apareciendo las primeras fisuras superficiales en el hormigón.
- A los 400 °C parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en cal viva.
- Cuando se alcanzan los 600 °C los áridos se expanden fuertemente y con diferente intensidad, dando lugar a tensiones internas que comienzan a disgregar el hormigón.

Analizando el coeficiente de dilatación térmica de los áridos, podemos ver que los que contienen una mayor proporción de sílice son los que tienen un valor

más elevado ($1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$), mientras que los áridos calizos tiene un valor más bajo ($0,8 \cdot 10^{-5} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$). [12]

Un hormigón con una buena granulometría y una gran proporción árido/cemento, tiene un mejor comportamiento frente al fuego que los hormigones pobres en áridos y con deficientes curvas granulométricas.[12]

Si durante el incendio, la temperatura del hormigón no supera los $500 \text{ } ^\circ\text{C}$ este podrá experimentar una rehidratación posterior que le permita recuperar en un año hasta el 90% de su resistencia inicial. [12]

Los áridos ligeros y calizos tienden a volverse más aislantes conforme la temperatura aumenta, por lo que el hormigón queda protegido durante los incendios.

Esto se debe a que la conductibilidad térmica de los áridos ligeros tiene un coeficiente bajo y poco variable con la temperatura ($0,8 \text{ kcal/m}\cdot\text{h } ^\circ\text{C}$) mientras que el coeficiente de los áridos calizos va disminuyendo según incrementa la temperatura ($1,7 \text{ kcal/m}\cdot\text{h } ^\circ\text{C}$ a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ hasta $0,9 \text{ kcal/m}\cdot\text{h } ^\circ\text{C}$ a $700 \text{ } ^\circ\text{C}$). [12]

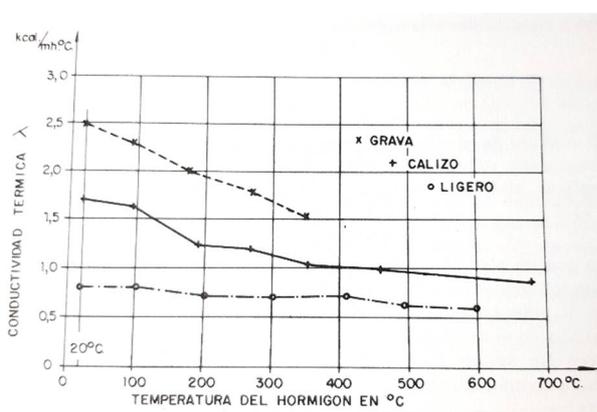


Figura 4 Conductividad térmica frente a la temperatura del hormigón. [12]

Como se puede observar en la figura (4), una baja conductibilidad térmica favorece al comportamiento del hormigón frente al fuego. Por lo que en fuegos de incendios donde la duración no sea larga, solo se verán afectadas las capas superficiales o más externas del hormigón, pudiéndose alcanzar temperaturas peligrosas para su integridad únicamente a distancias comprendidas entre los 50 mm y los 100 mm. [12]

Por tanto, se conseguirá una mayor durabilidad del hormigón frente al ataque producido por el fuego siempre que se cumplan las siguientes condiciones: [12]

- Uso de áridos con bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Buena granulometría con alta proporción de finos.
- Empleo de áridos ligeros o calizos
- Buena compactación del hormigón.
- Baja conductibilidad térmica
- Alta resistencia a la tracción
- Bajo contenido de humedad
- Empleo de cementos de escorias o puzolánicos (mezcla de cemento Portland y puzolanas naturales [piedras de naturaleza ácida, formada por fina ceniza volcánica y mezclada con cal y agua, muy reactiva y muy

porosa] o artificiales en una proporción del 15% al 40%, es más resistente a los agentes químicos, desarrolla menos calor en el fraguado y tiene una lata impermeabilidad)

- Ataque por ciclos hielo-deshielo:

El agua congelada incrementa su volumen un entre un 9% y un 10 %. Cuando el agua se encuentra contenida en las cavidades internas del hormigón junto a espacios vacíos rellenos de aire y se produce la congelación del agua contenida en los poros, existirá espacio suficiente para absorber la expansión ejercida por el incremento de volumen del agua no produciéndose tensiones que puedan dañar el hormigón. Si, por el contrario, no hay espacio suficiente para la expansión del agua contenida en los poros del hormigón, las tensiones ejercidas por el agua congelada sobre el material le llevarán al agotamiento y por tanto a su fractura. [12]

El agua contenida en los poros de la estructura de hormigón se encuentra sometida a alta presión, la cual es mayor cuanto menor es el diámetro de los poros. [12] Por tanto, cuanto mayor es el incremento de presión en el interior de los poros, menor será la temperatura de congelación. Al disminuir la temperatura los poros con un diámetro mayor se congelarán antes que los poros de diámetro más pequeño por lo que estos últimos verán impedido su crecimiento, ejerciendo una presión hidráulica sobre las paredes que puede llegar a fracturar el hormigón. Esta presión depende de la velocidad de congelación, grado de saturación y de la presencia de aire en los poros que reduzca los niveles de tensión ejercidos sobre las paredes.

La temperatura de congelación del agua contenida en los poros del hormigón es difícil de determinar puesto que depende de varios factores como son la presión capilar, las sales disueltas procedentes del propio hormigón, etc.

Los áridos que se empelan en el hormigón también tienen poros caracterizados por su volumen, tamaño y continuidad, por lo que también influyen en el comportamiento del hormigón frente a las heladas. Un árido de baja porosidad posee una resistencia por deformación elástica frente a las heladas, por lo que cuando mayor sea su porosidad, mayor será el riesgo de dañado del hormigón.

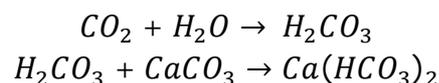
Una estructura de hormigón se ve afectada principalmente durante los ciclos hielo-deshielo con lluvia intermedia, debido a que en estos casos, se produce una saturación del material seguida de una bajada de temperaturas que origina la congelación del agua para posteriormente aumentar la temperatura y devolverla a su estado líquido, repitiéndose este proceso cíclicamente. Para aumentar la velocidad de descongelación se emplean sales fundentes (cloruro de sodio o cloruro de calcio), estas sales provocan que el hielo fundido absorba el calor latente necesario para la fusión del agua reduciendo la temperatura del hormigón, esto conlleva que el agua contenida en el interior de los poros no congelada, alcance la temperatura necesaria para helarse y producir posibles

daños en el material. Así mismo, las sales empleadas para el deshielo penetran al interior del hormigón haciendo que disminuya la concentración de estas en la superficie. De este modo, cuando haya una bajada de las temperaturas, se congelará el agua contenida en la superficie y en la capa interna del hormigón donde se han acumulado las sales fundentes. Si esta temperatura sigue descendiendo se producirá la congelación del agua contenida entre estas dos capas, la cual se verá impedida y generará importantes tensiones sobre las paredes del hormigón provocando la fractura del material. Algunas de las medidas para incrementar la durabilidad del hormigón frente a este ataque son: [12]

- Adecuada proyección de la obra para evitar la exposición directa de la estructura de hormigón con el agua.
- Utilización de cementos adecuados.
- Utilización de áridos compactos, limpios y con buena rugosidad superficial.
- Emplear relaciones agua/cemento lo más bajas posibles.
- Utilización de agentes aireantes especialmente en puentes y carreteras.
- Controlar el curado húmedo del hormigón para que se formen geles que cierren los poros y conseguir altas resistencias a edades tempranas.

Ataques químicos:

- Ataque por aguas puras (lixiviación):
Se produce debido a la solubilización del cemento causada por la acción de agua poco ionizada procedente del deshielo, de plantas de desalinización de agua de mar o destilación. La agresividad de estas aguas depende de su pureza, es decir, de la ausencia de sustancias disueltas. El proceso de lixiviación se acelera cuando el CO₂ disuelto en el agua está por encima del necesario para transformar el hidróxido de calcio, en carbonato. Este exceso de CO₂ reacciona con el agua para formar H₂CO₃ el cual reacciona posteriormente con el CaCO₃ para formar bicarbonato cálcico según la siguiente reacción: [12]

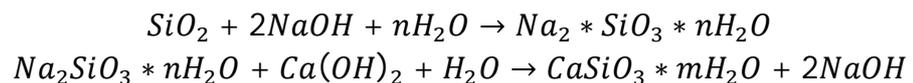


Al diluir la cal liberada y eliminarla posteriormente tras un lavado de la superficie, los poros aumentan de tamaño y número haciendo que el hormigón sea más vulnerable a futuros ataques y sobre todo a las heladas. Si el hormigón es compacto y la cantidad y tamaños de los poros son pequeños, este será más resistente debido al sellado de sus poros.

- Reacción con ciertos áridos:

Se puede producir una reacción de los álcalis del cemento con áridos como los silíceos (ópalos, calcedonias y tridimitas) cuando existe presencia de agua en los poros. Esta reacción se denomina ASR (alcali-silice-reaction), la cual genera un compuesto gelatinoso de sílice alcalino capaz de expandirse o contraerse según absorba o pierda agua, pudiendo provocar la destrucción del hormigón.

Esta reacción se produce cuando los minerales silíceos del árido son atacados por los hidróxidos alcalinos derivados de los alcalinos (Na_2O y K_2O) contenidos en el cemento. El compuesto gelatinoso que se forma en la reacción, absorbe agua produciendo una fuerte expansión de este que, al estar atrapado en el interior del hormigón e impedida por este, genera fuertes tensiones que fisuran el hormigón y destruyen la pasta. En ocasiones parte de este gel abandona la estructura de hormigón por sus fisuras, pudiéndose observar pequeñas gotas en la superficie. Las reacciones producidas en este tipo de ataques son: [12]



Las consecuencias producidas por la expansión del gel están relacionadas con: el contenido, forma y unión de los álcalis en el cemento, tipo de cemento, naturaleza, tamaño y cantidad de los áridos, porosidad del hormigón y presencia de agua.

Los daños producidos por este tipo de reacción se presentan en forma de fisura irregular en la superficie del hormigón.

Esta reacción no solo se produce con áridos de naturaleza silícea, sino también pueden reaccionar con otros que contengan carbonatos como el magnesio o el calcio.

- Reacción con ácidos:

Aunque el hormigón tolere bien los ácidos débiles, no tiene una alta resistencia frente a cualquier tipo de ácido. La dureza con la que se produce este ataque depende de la naturaleza, concentración y temperatura de los ácidos.

Podemos clasificar los ácidos por su grado de disociación en disoluciones acuosas (débiles y fuertes) y por su naturaleza (ácidos inorgánicos y orgánicos). Si un ácido tiene un pH entre 6,5 y 5,5 lo consideramos débil, mientras que si es inferior a 5,5 será considerado como altamente agresivo. Clasificando los ácidos por su naturaleza, tenemos: [12]

- Ácidos inorgánicos. El ataque ácido se produce sobre el hidróxido de calcio procedente de la hidratación del cemento, dando lugar a sales solubles que se eliminan generando cavidades en la masa del hormigón. Algunos de los ácidos inorgánicos más destacados se presentan en la tabla (17):

| Tipos de ácido | Descripción |
|-----------------------|--|
| Ácido clorhídrico | Los iones cloruro que proceden de este ácido, son fácilmente lixiviables y solubles. |
| Ácido sulfhídrico | Este ácido en presencia de bacterias puede oxidarse a sulfúrico. Su reacción con el hidróxido de calcio origina sales lixiviables. |
| Ácido sulfúrico | Procede de la oxidación de ácido sulfhídrico. Es un ácido muy agresivo. |
| Ácido sulfuroso | Se forma por disolución acuosa del anhídrido sulfuroso. Sus efectos son similares a los del ácido sulfúrico y los sulfatos. |
| Ácido carbónico | Se forma por disolución acuosa del anhídrido carbónico presente en algunas combustiones. En presencia de aguas carbonatas pueden generar bicarbonatos solubles. |
| Ácido nítrico | Tiene un efecto muy perjudicial sobre el hormigón. |
| Ácido fosfórico | Este ácido reacciona con el hidróxido de calcio y forma una capa insoluble de fosfato que protege el hormigón. |
| Ácido fluorhídrico | Este ácido reacciona con el hidróxido de calcio dando lugar a fluoruro de calcio insoluble que cierra los poros. Este ácido en pequeñas cantidades protege el hormigón mientras que en grandes cantidades ataca la estructura. |

Tabla 17 Tipos de ácidos inorgánicos

- Ácidos orgánicos. Algunos de los ácidos orgánicos más destacables se encuentran en la tabla (18):

| Tipos de acido | Descripción |
|----------------|--|
| Ácido acético | Es un ácido de fuerza moderada que puede reaccionar con el hidróxido de calcio para formar sales solubles. |
| Acido láctico | Es un ácido moderadamente fuerte localizado en aguas residuales y que forma lactatos fácilmente lixiviables. |
| Acido oxálico | Es un ácido fuerte que reacciona con la cal formando oxalato de cal. Este es insoluble, por lo que protege el hormigón cerrando los poros. |
| Acido tánico | Es un ácido débil y poco agresivo |
| Ácido fórmico | Es un acido con fuerza y características similares a las del ácido acético |
| Acido húmico | Es un ácido débil que reacciona con el hidróxido de calcio y produce sales insolubles muy dañinas para el hormigón. |

Tabla 18 Tipos de ácidos orgánicos

- Otras sustancias. Algunas de las sustancias que reaccionan con el hidróxido de calcio y forman sales que dañan el hormigón, son:
 - Azúcares. La dureza con la que los azúcares atacan al hormigón, depende de la temperatura, viscosidad y concentración de la disolución que la contenga. Estas sustancias influyen retardando el fraguado y endurecimiento del hormigón.
 - Alcoholes. La glicerina y el glicol son moderadamente agresivos, dando lugar a sales solubles de cal.
 - Aldehídos. Este compuesto en si no es agresivo, sin embargo, su disolución de formaldehído si tiene una agresividad moderada.
- Reacción con sales orgánicas e inorgánicas:
 - Sales orgánicas. Estas son combinaciones químicas de esteres glicéricos y ácidos grasos, cuyo origen puede ser de tipo vegetal o animal y su viscosidad variable. Estas sales reaccionan con el hidróxido de calcio dando lugar a sales cálcicas de ácidos grasos. Su nivel de ataque dependerá del grado de penetración en el hormigón, del tamaño de sus poros y de la viscosidad del aceite o grasa. En estos casos, la temperatura actúa desfavorablemente ya que cuanto más alta sea, más

líquidos serán estos jabones y mayor facilidad tendrán para su penetración en el hormigón.

- Sales inorgánicas. Estas se producen por la combinación de un ácido y una base. Una parte básica (catión) reacciona con los aniones hidroxilo y otra parte ácida (anión) reacciona con cationes cálcicos. El grado de corrosión depende de varios factores como son: el tipo de aniones o cationes que tenga la sal, el tipo de cemento, la permeabilidad del hormigón, la concentración de la sal y la temperatura. En las siguientes tablas se recogen los tipos de aniones y cationes más comunes en el hormigón:

| Tipos de aniones | Descripción |
|-------------------------|---|
| Sulfatos | La mayoría produce soluciones corrosivas, salvo el sulfato de bario y el de plomo. |
| Cloruros* | Su agresividad depende del elemento con el que estén unidos. La presencia de este anión puede acelerar o desencadenar la corrosión. |
| Nitratos | La mayoría se pueden considerar medianamente corrosivos, salvo el nitrato de amonio que incrementa su agresividad. |
| Sulfuros | Estos aniones atacan al hormigón ligeramente siempre y cuando no se produzca su oxidación a sulfato. |
| Carbonatos | La mayoría son sales insolubles, salvo las sales de álcalis o de amonio que incrementan su solubilidad. |
| Fosfatos | No producen daños en el hormigón, aunque se recomienda su protección frente a fosfatos ácidos. |
| Silicatos | Se utiliza el silicato de calcio como elemento de protección del hormigón. |
| Fluoruros | Se utiliza el fluoruro de calcio como elemento de protección del hormigón. |

Tabla 19 Tipos de aniones

(*) La instrucción EHE-08 establece el contenido máximo de ion cloruro en el hormigón según la Tabla (20)

| Tipo de hormigón | Contenido de ion cloruro en tanto por ciento (del peso del cemento) |
|--------------------------------|--|
| En masa | 1.0 % |
| Armado o en masa con armaduras | 0.4 % |
| Pretensado | 0.2 % |

Tabla 20 Contenido de ion cloruro en función del tipo de hormigón [3]

| Tipos de cationes | Descripción |
|--------------------------|---|
| Magnesio | En altas concentraciones puede sustituir al calcio favoreciendo la corrosión del hormigón y provocándole grandes daños. Si se forma hidróxido de magnesio impide o retrasa los ataques corrosivos sellando los poros. |
| Amonio | Son especialmente perjudiciales las sales de amonio con cloruros, sulfatos, sulfuros, etc. |

Tabla 21 Tipos de cationes

- Reacción con sulfatos:

Una de las causas más peligrosas de agresión al hormigón es el ataque por sulfatos, el cual produce la desagregación del material. Encontramos sulfatos en: los suelos (sulfato de sodio, potasio magnesio o calcio), el agua de mar (sulfato de sodio y magnesio) y las aguas residuales (gran variedad de sulfatos). El ataque del hormigón por medio de los sulfatos puede realizarse de tres maneras diferentes:

- Mediante la transformación del hidróxido de calcio en sulfato de calcio hidratado, el cual cristaliza incrementando su volumen y provoca la fractura del hormigón.
- Por la conversión del aluminato de calcio hidratado y el ferrito aluminato en sulfoaluminato y sulfoferrito, lo que origina un aumento de su volumen y provoca la rotura del hormigón. Suele ser la más peligrosa.
- Por la descomposición de los silicatos de calcio hidratados, lo que origina una pérdida de resistencia en el hormigón. Aunque este proceso no es expansivo como los anteriores, reduce el pH del hormigón y dirige el silicato de calcio hidratado a su descomposición.

Para que se produzca el ataque de los sulfatos sobre el hormigón se debe cumplir que:

- Existan iones de sulfato en el ambiente que lo rodea.
- El hormigón sea lo suficientemente permeable como para que exista acceso de las aguas sulfatas.
- Que el contenido de aluminato tricálcico del cemento supere los límites.

La temperatura es un factor importante en la velocidad de ataque de los sulfatos en el hormigón, reduciéndose esta velocidad según aumenta la temperatura dentro del margen comprendido entre 0° y 89°. [12]

Un factor influyente en el ataque por sulfatos es que el agua que la contiene este en movimiento o estancada. En el caso de agua en movimiento en suelos cohesivos tiene un mayor poder de lavado y por tanto la intensidad de ataque se ve reducida, mientras que la misma agua en suelo arenoso el poder de lavado se reduce. Las aguas estancadas son más peligrosas ya que contienen una mayor concentración de óxido de azufre (SO_3). [12]

En las zonas de subida y bajada del nivel freático, el ataque producido por estas aguas es mayor debido a la rápida cristalización de las sales.

Es erróneo considerar que la agresividad únicamente es debida a la concentración de SO_3 , también se debe considerar el catión unido al ion sulfato. Ya que de él va a depender la manera en la que se realice el ataque. Si hay presencia del catión calcio, el proceso de ataque se realiza por la conversión de aluminato de calcio y ferrito aluminato como se ha indicado anteriormente, si por el contrario predomina el sulfato de sodio, el ataque se realizará por la manera anterior y la transformación del hidróxido de calcio en sulfato de calcio según se ha comentado antes. En el caso de haber presencia de sulfato de magnesio, el ataque se puede desarrollar por cualquiera de las tres vías expuestas anteriormente.

El agua de mar es una excepción en el ataque por sulfatos ya que debido a su alto contenido de cloruros da lugar a la formación de cloro aluminato tricálcico hidratado, la cual frena la acción agresiva de los sulfatos.

La impermeabilidad de un hormigón es crucial para conseguir la máxima resistencia al ataque por sulfatos. Si un hormigón se proyecta bien, utilizando el cemento adecuado, se puede obtener una alta durabilidad ante este tipo de ataques.

II. Agresiones al hormigón armado:

Los ataques medio ambientales sobre el hormigón se ven incrementados cuando este contiene armaduras de acero en su interior. Como se vio en la introducción, las agresiones sobre la armadura de acero son los factores más perjudiciales sobre este tipo de estructura. En la actualidad se estudian multitud de posibles soluciones y alternativas a las armaduras de acero para evitar su corrosión y dañado. Las principales causas que originan corrosión en el acero de las armaduras son la carbonatación y la presencia de iones cloruro.

- *Definición de corrosión: [10]*

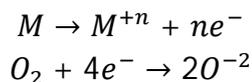
Se define corrosión como el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con el medio ambiente que lo rodea.

Salvo los metales nobles, el resto de metales se encuentran en la naturaleza en forma compuesta (óxidos, hidróxidos, etc.), esto significa que se encuentran a bajos niveles de energía de Gibbs. Para poder extraer los elementos metálicos a partir de sus compuestos, es necesario suministrarle energía a través de un proceso de reducción. Por lo que, una vez obtenidos estos elementos metálicos, tenderán a volver a sus estados de energía inferiores a lo largo de su vida útil y de manera natural. Esto es lo que sucede con los procesos de corrosión, los cuales a través de la oxidación del elemento metálico lo rebaja a un nivel energético inferior.

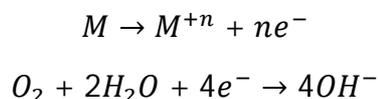
- *Mecanismos de corrosión:*

La corrosión puede desarrollarse por dos mecanismos distintos:

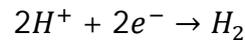
- Por oxidación directa. Este mecanismo sucede cuando el metal "M" en ausencia de agua está sometido a una alta temperatura, y se producen electrones a partir de la siguiente reacción: [10]



- Corrosión con intervención de una solución acuosa o electroquímica. En este mecanismo se incluyen reacciones químicas diferentes, con zonas de disolución del metal (ánodo) y zonas donde permanece inalterado (cátodo). Este mecanismo origina una pila, la cual requiere de un circuito eléctrico cerrado que incluya al ánodo, al cátodo, la conexión metálica entre ambos y el propio electrolito para su funcionamiento. [10]



En un medio ácido, los iones hidrogeno son los que reaccionan con los electrones liberados:



La cantidad de metal (en peso) que se corroe es proporcional a la intensidad "I" de la corriente que se produce y al tiempo "t" transcurrido, según la ley de Faraday:

$$\text{cantidad corroida} = \frac{I * t}{96493}$$

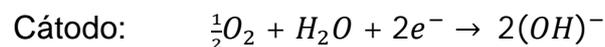
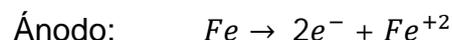
- **La corrosión de las barras de acero en el hormigón: [10]**

Es un proceso electroquímico donde uno de los dos metales o alguna de sus partes (si solo hay uno) se convierte en ánodo y el otro en el cátodo. Estos potenciales eléctricos que forman las pilas de corrosión pueden generarse de dos maneras:

- Cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón (como las armaduras de acero y los conductos de aluminio) o cuando se producen variaciones significativas de las características superficiales del acero.
- Cuando hay diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

- **Proceso de corrosión: [10]**

La corrosión del acero en una estructura de hormigón armado no puede producirse hasta que la capa de protección del acero no se elimina en un ambiente ácido (carbonatación) o se hace permeable por la acción de iones cloruro (Cl^-). El proceso catódico se produce cuando la cantidad de oxígeno y de agua en la superficie del acero es suficiente. Las reacciones son:



Al principio se produce hidróxido ferroso (color verde) con un alto grado de oxidación, óxido ferroso-férrico (color negro) e hidróxido férrico (color rojizo).

Las reacciones son:



Formación de hidróxido férrico: $4Fe(OH)_2 + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3$

Formación de óxido de hierro hidratado: $2Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O + 2H_2O$

La causa de la expansión y fisuración del hormigón es debida a que la transformación de hierro metálico en óxido ($FeO \cdot (H_2O)_x$) viene acompañada de un incremento de volumen que puede llegar a ser del 600 % del tamaño original del metal. [10]

La fuerza electromotriz de la pila lleva la corriente de corrosión del ánodo al cátodo a través del electrolito. La velocidad de corrosión está influida por los siguientes factores: [10]

- pH del electrolito en el hormigón (afectado por la carbonatación)
- Disponibilidad de oxígeno y agua capilar.
- Concentración de Fe^{2+} en el hormigón junto a la armadura.

Las zonas que actúan como ánodo y como cátodo, pueden estar muy próximas (micropilas) o a una distancia media o grande (macropilas). Si el hormigón está lo suficientemente húmedo como para garantizar la conexión electrolítica, se puede llegar a producir la corrosión en zonas donde no llega el oxígeno directamente. una macropila no puede actuar a grandes distancias, la corrosión en estos casos se sustenta por la acción continuada de varias micropilas a las que se les suman la acción de otras macropilas de radio limitado.

En ambientes marinos, se desarrolla una corrosión por macropila debido a que los pilares y columnas situados en estos ambientes se encuentran parcialmente sumergidos. En la zona alejada de las mareas, la concentración de cloruros es inferior y por tanto esta zona pasiva actúa como cátodo y en la zona sumergida tenemos saturación de agua, por tanto, una alta concentración de cloro actuando esta zona como ánodo de la pila y cerrando el circuito.

- *Tipos de corrosión en las armaduras: [10]*

La corrosión en el acero del hormigón armado puede presentarse de diferentes maneras. Una posible clasificación es:

- Corrosión seca. En la cual se produce una oxidación del metal debido a una alta temperatura y ausencia de agua.
- Corrosión húmeda. En este caso, la oxidación se produce en presencia de un medio acuoso.

Otra clasificación de la corrosión en las armaduras se consigue identificando su localización, obteniendo:

- Corrosión generalizada. Esta corrosión se debe a una pérdida de alcalinidad del hormigón y afecta a toda la superficie del metal de manera uniforme o irregular. La pérdida de alcalinidad puede ser por lixiviación de aguas puras o por carbonatación (reacción de los compuestos básicos de la fase acuosa del hormigón con los componentes ácidos de la atmosfera)
- Corrosión galvánica o localizada. Este tipo de corrosión se caracteriza por aparecer en zonas localizadas del acero conocidas como picaduras. Esta corrosión se debe a la distribución no uniforme de los cátodos y los ánodos a lo largo del acero, pudiéndose localizar zonas más fuertes anódicamente y otras zonas más fuertes catódicamente. La presencia de iones cloruro en el acero, representa la situación más agresiva a la que puede enfrentarse. Otros iones como son el sulfuro y el sulfato también afectan en menor medida.

En la figura (5) observamos los distintos tipos de corrosión que pueden aparecer en una barra de acero. Desde una corrosión generalizada por carbonatación (figura (5.2)) hasta una corrosión localizada por iones cloruro (figura (5.3)). También es habitual encontrarse una combinación de estos dos tipos de corrosión (figura (5.4))

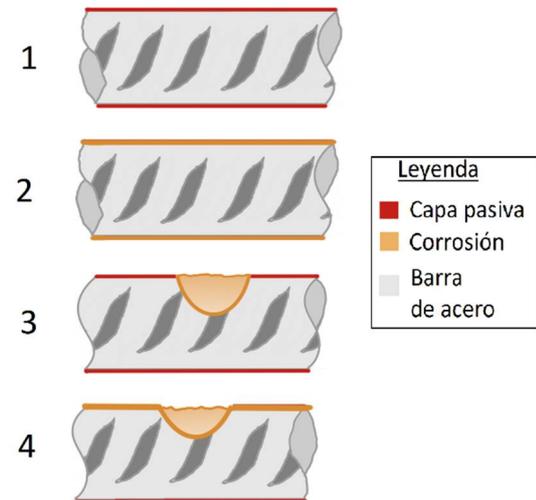


Figura 5 Tipos de corrosión en las armaduras

Dos casos particulares de la corrosión localizada son:

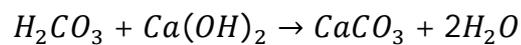
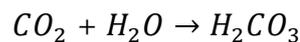
- Corrosión bajo tensión. Este tipo de corrosión se produce en una zona sometida a tensiones elevadas y con una posible corrosión iniciada en el acero.
- Corrosión por fatiga. Esta corrosión es similar a la expuesta en el caso anterior, únicamente que los esfuerzos a los que se encuentra sometida la barra de acero son en este caso cíclicos.

A continuación, se explican los mecanismos de corrosión en aceros más perjudiciales:

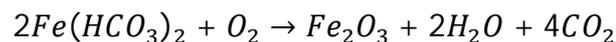
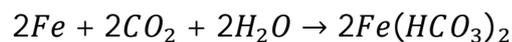
- *Corrosión por carbonatación:*

Como hemos podido ver con los datos bibliográficos, esta corrosión se debe a un 17% de las veces que un hormigón armado sufre una lesión. En el momento de su ejecución el hormigón alcanza una alcalinidad con un pH superior a 12.5. Esta alcalinidad se debe a los hidróxidos de calcio, sodio y potasio disueltos en la solución acuosa de los poros, así como en los álcalis solubles agregados durante su ejecución. Estos crean una fina capa de óxidos que protegen e impiden el inicio y avance de la corrosión en el acero.

Al ser el hormigón un material poroso, este va perdiendo su alcalinidad con el paso del tiempo debido a que el agua de lluvia va eliminando los hidróxidos alcalinos y neutralizando el hidróxido cálcico. El CO₂ presente en la atmósfera penetra en los poros del hormigón y reacciona con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico y otros compuestos hidratados del cemento. Este proceso de carbonatación se puede escribir de la siguiente manera: [16]



El proceso de carbonatación da al hormigón una mayor consistencia y menor solubilidad al agua, debido a que el carbonato cálcico de la reacción tiene un volumen superior al hidróxido cálcico y esto conlleva a que se estrechen los poros. Una vez carbonatado todo el Ca(OH)₂, Na(OH) y K(OH) presente en los poros, el pH del hormigón comienza a descender a un valor inferior a 9, esto provoca una diferencia de pH entre dos zonas distintas del hormigón, pudiendo tener en una un pH superior a 12 y en otra un pH inferior a 9. [9] Esto hace que el acero deje de estar pasivo y se inicie la corrosión generalizada de la superficie de la armadura. El proceso de oxidación viene dado por las siguientes reacciones: [16]



La oxidación del acero supone un aumento de su volumen que genera tensiones superficiales sobre el hormigón y su posterior fractura. Esto favorece la penetración de la humedad y por tanto el incremento de la corrosión. Una vez que se ha iniciado el proceso de corrosión es difícil detenerlo.

Podemos suponer que la velocidad de carbonatación sigue la siguiente expresión en ambientes con baja humedad relativa: [9]

$$d = k \cdot \sqrt{t}$$

Donde:

- d → es la profundidad de avance de la carbonatación en mm
- k → es un coeficiente de carbonatación medido en mm/año^{0.5}
- t → es el tiempo en años

Mientras que en ambientes con una alta humedad relativa, el avance del frente de carbonatación es mucho más lento de lo que predice la expresión anterior. El valor del coeficiente de carbonatación depende de algunas características como son la calidad del hormigón y la humedad relativa del ambiente pudiéndose obtener experimentalmente si se conoce el tiempo de exposición para cada caso particular. El autor Alfonso Cobo Escamilla estima algunos valores de este coeficiente para hormigones según su calidad, obteniendo:

- Valores de “k” comprendidos entre 2 mm/año^{0.5} y 6 mm/año^{0.5}, corresponden a hormigones muy compactos y cuyo contenido de cemento es superior a 350 kg/m³.
- Valores de “k” comprendidos entre 6 mm/año^{0.5} y 9 mm/año^{0.5}, corresponden a hormigones de compactación media.
- Valores de “k” superiores a 9 mm/año^{0.5}, corresponden a hormigones con una alta porosidad y baja calidad, cuyo contenido de cemento es inferior a 250 kg/m³.

La mayor o menor velocidad de carbonatación del acero depende de múltiples factores como son:

- La humedad relativa del ambiente: cuando está comprendida entre el 50 % y el 60 % obtenemos la máxima reacción de carbonatación, mientras que, para valores superiores al 80 % (hormigones muy húmedos) o inferiores al 20 % (hormigones muy secos) el CO₂ encuentra grandes limitaciones para reaccionar y producir la carbonatación del acero.

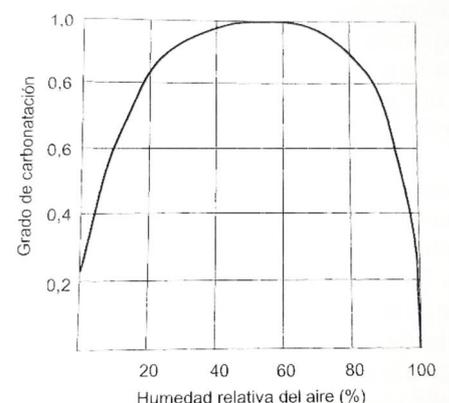


Figura 6 Grado de carbonatación frente a la humedad relativa del aire [9]

- Cantidad de sustancias carbonatables: la carbonatación del acero es mayor cuanto mayor es la relación A/C.

El autor Alfonso Cobo estima que una relación agua-cemento de 0.7 presenta una profundidad de carbonatación dos veces superior a la obtenida con un hormigón cuya relación A/C sea de 0.5. Un bajo contenido de cemento supone un mayor proceso de carbonatación.

- Concentración de CO₂ en el ambiente: Para bajas concentraciones de CO₂ el proceso de carbonatación se incrementa. Alfonso Cobo estima que esta concentración de CO₂ tiene que ser del orden de 0.03% en volumen.

- **Corrosión por presencia de iones cloruro:**

Al contrario de lo que sucedía con la corrosión por carbonatación, esta corrosión puede ocurrir sin que se vea alterado el valor del pH en el hormigón. Este otro proceso de corrosión corresponde a un porcentaje superior al 33% de las veces que una estructura de hormigón armado ha sufrido una lesión. Esta corrosión se origina por la presencia de iones cloruro en cantidades suficientes como para romper la capa de óxido que cubre la armadura de acero y desencadenar una corrosión localizada.

Cuando la capa pasiva de las barras de acero se elimina en pequeñas áreas localizadas de la superficie, se produce una reducción local de la armadura. El ion cloruro actúa como catalizador acumulándose en las cavidades generadas y acelerando el avance de la corrosión. Esta corrosión localizada se denomina picadura y es la más habitual en ambientes marinos. En la figura (7.1) podemos ver una barra de acero donde no se ha perdido la capa pasiva que protege la armadura, mientras que en las figuras (7.2) y (7.3) se observa la misma barra afectada con corrosión por picadura. En este tipo de corrosión, el pH en la picadura desciende a valores inferiores a 5, mientras que el pH del resto de la superficie de la barra se mantiene en valores próximos a 12,5. También observamos que este tipo de corrosión solo afecta a zonas localizadas, sin que le resto de la barra sufra modificaciones.

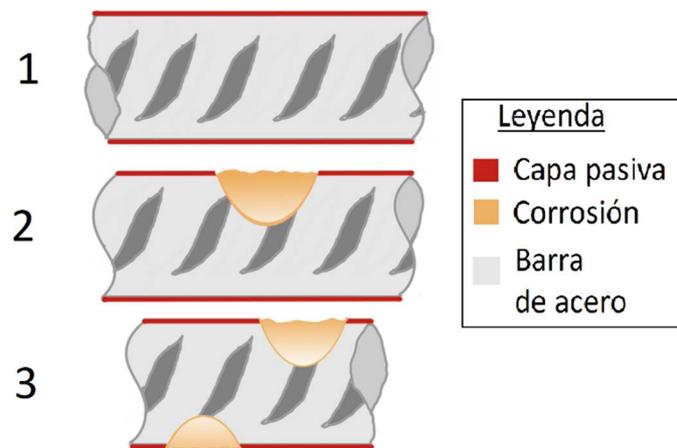
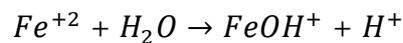


Figura 7 Corrosión por iones cloruro

El ataque por cloruros se inicia con la picadura en puntos débiles de la interfase acero-hormigón. Estos puntos pueden aparecer por varios factores:

- Caída local del pH.
- Hueco de aire.
- Fisura en el hormigón.
- Defectos en la superficie del acero.

En los puntos débiles se forman ánodos que atraen por diferencia de potencial a los cloruros. Una vez eliminado el oxígeno en la zona del acero afectada, se inicia la picadura y se acidifica ese punto. Esta reacción se expresa del siguiente modo: [10]



Parte del contenido total de los cloruros está ligado químicamente, otra parte queda inmovilizada por enlaces físicos y el resto permanece en los poros en forma de cloruros libres. Estos últimos son los que más peligro representan para la corrosión del acero en las armaduras.

En las gráficas obtenidas en las simulaciones (las cuales se verán posteriormente en el apartado de análisis de datos), se puede observar como la concentración de cloruros decrece desde la superficie de la estructura hacia el interior. Esto es debido a que durante el periodo de humectación, el agua con una alta concentración de cloruros penetra en la estructura por succión capilar y en el periodo de secado este agua se evapora dejando los cloruros en el hormigón. Por lo que realizando este proceso cíclicamente se alcanza una alta concentración de iones cloruro en la zona de secado y humectación.

Los cementos sin adiciones tienen mayor capacidad para fijar los cloruros que los cementos con adiciones, siendo el aluminato tricálcico (C_3A) el componente del cemento capaz de fijar iones cloruro. Cuando aumenta la capacidad de fijar iones cloruros, disminuye su profundidad de penetración debido a que la gran cantidad de iones cloruro fijados impide cualquier difusión posterior.

Podemos encontrar en una estructura de hormigón dos tipos de cloruros: [17]

- Cloruros combinados. Como se vio en el estudio presentado en la introducción, estos cloruros responden al 5% de las veces que una estructura de hormigón ha sufrido daños. Este bajo porcentaje, se debe a que estos cloruros no se desplazan hacia el interior de la estructura ya que están unidos física o químicamente a otros elementos o compuestos contenidos en el hormigón. Como se ha visto en el párrafo anterior, cuando el contenido de aluminato tricálcico es bajo la capacidad del hormigón para fijar cloruros disminuye.

- Cloruros libres. Estos se encuentran disueltos en el agua contenida en los poros sin estar combinado. Estos se desplazan hacia el interior del hormigón por difusión u otros mecanismos. Según el estudio anteriormente citado, estos cloruros suponen el 33 % de las veces que una estructura de hormigón armado ha sufrido una lesión.
- Cloruros totales. Es la suma total de cloruros libres y combinados contenidos en el hormigón.

Los cloruros combinados no son nocivos para la corrosión del acero, son los cloruros libres los únicos que provocan la despasivación del acero. En las estructuras de hormigón existe un equilibrio entre cloruros libres y combinados.

Como se indicó anteriormente la instrucción EHE-08 limita el uso de cloruros en el hormigón para evitar riesgos de corrosión. Algunas de las principales fuentes de adición de cloruros provienen de los elementos con los que se fabrica el hormigón, de ahí que esta instrucción limite también el contenido de iones cloruro en estos elementos.

Una vez producido el hormigón, los iones cloruro penetran a través del agua contenida en los poros de la estructura. Las principales fuentes de ion cloruro exteriores proceden de las sales fundentes usadas para la descongelación del hielo y de agentes externos expuestos a ambientes marinos (brisas, mareas, etc.).

Los hormigones prefabricados pueden contener iones cloruro, ya que estos se adhieren químicamente con el cemento empleado durante su proceso de fabricación. Esto conlleva a que algunas estructuras contengan iones cloruros ligados a algunos elementos del hormigón, repartidos uniformemente. Cuando los iones cloruro procedentes del exterior penetran en la estructura, el hormigón que rodea parte de la armadura puede contener iones cloruro mientras otra parte no la contenga. Esto origina una macropila por diferencia de concentración.

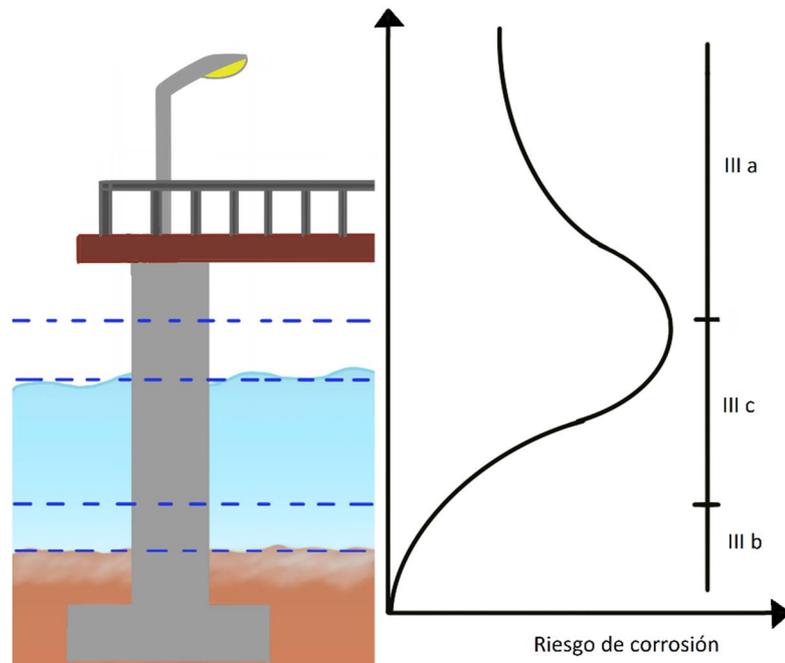


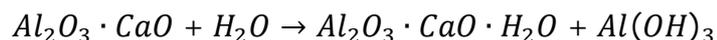
Figura 8 Riesgo de corrosión en función de la zona de exposición marina

La carbonatación sufrida por el hormigón puede ocasionar que se produzca un mayor peligro de corrosión desligando los cloruros combinados en el interior de la estructura y pasando a ser cloruros libres, esto supone que las sales hidratadas de cloruro se descomponen en iones cloruro que pueden afectar a la armadura sin modificar el contenido total de cloro en la estructura.

3.1.9. Causas de la aceleración del deterioro del hormigón

Como hemos visto en apartados anteriores, el hormigón se ve afectado por numerosos ataques, ya sean físicos o químicos, que afectan a su estructura interna o a las armaduras en el caso del hormigón armado. Podemos obtener una mayor o menor resistencia del hormigón frente a estos ataques tratando la estructura con sustancias protectoras, con una buena calidad del cemento y correcta proyección de la obra, entre otras características. Manuel Carbonell de Masy establece que las causas más relevantes que aceleran el deterioro del hormigón son:

- Exceso de porosidad. Como hemos visto en los distintos factores que desencadenan la degradación del hormigón, una baja concentración de poros en el material dificulta la penetración de agentes agresivos (agua, gases, etc.), lo que evita un mayor deterioro del material. La concentración y diámetro de los poros se puede reducir según va disminuyendo la relación agua-cemento, ya que una relación A/C superior a 0.6 supone una alta concentración de agua en la mezcla, que al evaporarse deja grandes poros en la estructura de hormigón. En cementos aluminosos, se forman cristales de aluminato cálcico hidratado según la siguiente reacción:



Estos cristales se forman rápidamente y tras un proceso conocido como conversión, los cristales disminuyen su volumen aumentando con ello la porosidad del material y disminuyendo la resistencia del hormigón.

- Presencia de fisuras. El hormigón posee una baja resistencia a la tracción, esto supone que una sobrecarga en la estructura o el propio peso de la estructura sería suficiente para favorecer la fisuración del material. El hormigón armado posee una mayor resistencia a esfuerzos de tracción, pero una fisura en la superficie del hormigón supone un punto por el que pueden penetrar agentes externos e iniciar la corrosión por carbonatación o picadura del acero.
- Bajo espesor en el recubrimiento. Manuel Carbonell de Masy expone que el espesor que debe recubrir la armadura tiene que ser superior a los 2 cm, aunque también es frecuente encontrar estructuras donde algunos puntos de

la armadura tienen un espesor de 5 mm. La instrucción EHE-08 recoge las especificaciones requeridas y los espesores recomendados para las armaduras pasivas o activas pretensas del hormigón armado, cumpliendo las siguientes condiciones: [3]

- En armaduras principales, el recubrimiento deberá ser igual o superior al diámetro de dicha barra y a 0,8 veces el tamaño máximo del árido.
- Para cualquier clase de armadura pasiva o armadura activa pretensa, el recubrimiento no debe ser inferior a los valores mínimos recogidos en las siguientes tablas:

| Clase de exposición | Tipo de cemento | Resistencia característica del hormigón [N/mm ²] | Vida útil del proyecto (t _g) (años) | |
|---------------------|---|--|---|-----|
| | | | 50 | 100 |
| I | Cualquiera | $f_{ck} \geq 25$ | 15 | 25 |
| II a | CEM I | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 15 | 25 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 10 | 20 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 20 | 30 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 15 | 25 |
| II b | CEM I | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 20 | 30 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 15 | 25 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 25 | 35 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 20 | 30 |

Tabla 22 Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I y II [3]

| Hormigón | Cemento | Vida útil del proyecto (t _g) (años) | Clase general de exposición | | | |
|------------|---|---|-----------------------------|-------|-------|----|
| | | | III a | III b | III c | IV |
| Armado | CEM III / A, CEM III / B, CEM IV, 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 | * | * | * |
| Pretensado | CEM II / A-D o bien con adición de humo de sílice superior al 6% | 50 | 30 | 35 | 40 | 40 |
| | | 100 | 35 | 40 | 45 | 45 |
| | Resto de cementos utilizables | 50 | 65 | 45 | * | * |
| | | 100 | * | * | * | * |

Tabla 23 Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de explosión III y IV [3]

(*) Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, por lo que se desaconseja desde el punto de vista de la ejecución del elemento.

| Clase de exposición | Tipo de cemento | Resistencia característica del hormigón [N/mm ²] | Vida útil del proyecto (t _g) (años) | |
|---------------------|--|--|---|-----|
| | | | 50 | 100 |
| H | CEM III | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 25 | 50 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 15 | 25 |
| | Otros tipos de cementos | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 20 | 35 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 10 | 20 |
| F | CEM II / A-D | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 25 | 50 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 15 | 35 |
| | CEM III | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 40 | 75 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 20 | 40 |
| | Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al hormigón | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 20 | 40 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 10 | 20 |
| E ⁽¹⁾ | Cualquiera | $25 \leq f_{ck} < 40$ | 40 | 80 |
| | | $f_{ck} \geq 40$ | 20 | 35 |
| Qa | CEM III, CEM IV, 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 % | - | 40 | 55 |
| | Resto de cementos utilizables | - | * | * |
| Qb, Qc | Cualquiera | - | (2) | (2) |

Tabla 24 Recubrimientos mínimos para las clases específicas de explosión [3]

(*) Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, por lo que se desaconseja desde el punto de vista de la ejecución del elemento.

(1) Estos valores corresponden a condiciones moderadamente duras de abrasión.

(2) El autor del proyecto deberá fijar estos valores de recubrimiento mínimo.

- En el caso de elementos prefabricados para forjados unidireccionales de hormigón armado o pretensado, el proyectista podrá contar, además del recubrimiento del hormigón, con el espesor de los revestimientos del forjado que sean compactos e impermeables y tengan carácter definitivos y permanentes.
- El recubrimiento de las barras dobladas no se será inferior a dos diámetros, medido en dirección perpendicular al plano de la curva.

En superficies límite de hormigonado que en situación definitiva queden embebidas en la masa del hormigón, el recubrimiento deberá ser superior al diámetro de dicha barra y no será 0,8 veces el tamaño máximo del árido.

- Desprotección de la armadura: las posibles causas que provocan la aceleración en la degradación del acero de la armadura son:
 - La humedad. Como se ha visto en los apartados anteriores, una humedad relativa comprendida entre el 50 % y el 60 % incrementa considerablemente la aceleración de la corrosión.
 - La cantidad de oxígeno. La concentración de oxígeno no es un factor determinante de la velocidad de corrosión, ya que se obtiene una máxima velocidad de corrosión cuando los poros tienen la cantidad de agua justa sin llegar a saturarse. En el caso de que los poros se encuentren saturados de agua, el oxígeno deberá disolverse en el agua para poder alcanzar la armadura. De este modo, se ve que es el oxígeno quien controla la velocidad de corrosión puesto que la solubilidad de este en el agua es muy baja.
 - Temperatura. Como se vio anteriormente, un aumento de la temperatura conlleva un incremento de la velocidad de reacción de corrosión ya que, un incremento de temperatura disminuye la resistividad del hormigón.

3.1.10. Mecanismos de transporte y penetración en el hormigón

Los mecanismos de penetración serán más o menos importantes dependiendo de sus condiciones de exposición, contenido de humedad y estructura de los poros en el hormigón. Estos mecanismos de penetración en el hormigón son:

- La permeabilidad. Se define como la capacidad de un material para ser atravesado por un fluido sin que este modifique su estructura interna. Este mecanismo de transporte es muy rápido y principalmente se produce en superficies húmedas.

- La capilaridad. Se define como el fenómeno superficial de un fluido que al estar en contacto con un cuerpo sólido, sube o baja por él, dependiendo de si este moja o no moja al sólido. [19] Así mismo, entendemos que un líquido moja o no moja un cuerpo sólido en función del ángulo (θ) impuesto por la interfase de separación entre líquido-gas con el sólido en equilibrio, pudiendo obtener según el ángulo: [18]

- $\theta < \frac{\pi}{2}$ → el líquido moja
- $\theta > \frac{\pi}{2}$ → el líquido no moja

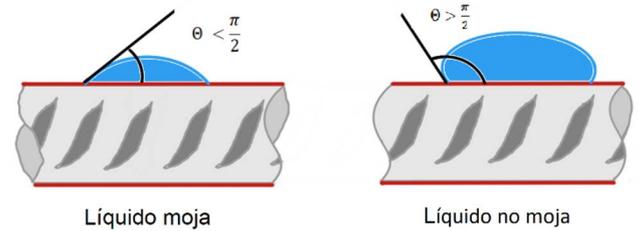


Figura 9 Ángulo de contacto

En los primeros centímetros de penetración de los iones cloruro en el hormigón, dependen de este mecanismo. En estructuras con la superficie mojada por el agua de lluvia o salpicaduras, se consigue rápidamente la saturación de agua por succión capilar, haciendo que las sustancias se transporten por el agua y la difusión quede impedida. Este mecanismo también es habitual en estructuras sumergidas, ya que el agua sometida a altas presiones penetra en el hormigón por succión capilar. Como se ha comentado anteriormente, este sistema de penetración se produce durante los ciclos de humectación y desecación del hormigón en ambientes marinos, haciendo que el agua clorada penetre por succión capilar durante la humectación de la superficie y en la etapa de secado el agua se evapora dejando los cloros en el hormigón.

- La absorción. Para la cuestión que nos compete, definimos la absorción como la atracción desarrollada por un sólido sobre un líquido con el objetivo de que las moléculas del líquido consigan penetrar en la sustancia. [20] Al igual que la permeabilidad, es un mecanismo de transporte muy rápido y se produce en superficies secas.
- La difusión. La definimos como el mecanismo de transporte de la materia a través de la materia por movimiento atómico. [21] Este mecanismo de penetración es lento ya que se realiza mediante la difusión de átomos en la red cristalina y se produce en superficies húmedas. Este mecanismo es habitual a grandes profundidades de penetración en el hormigón.

3.1.11. Consecuencias de la presencia de carbonatación e ion cloruro en el hormigón armado:

En el siguiente punto se exponen algunos ejemplos de corrosión debida a carbonatación o a la presencia de iones cloruro en el ambiente. La corrosión del acero en una armadura de hormigón puede presentarse de múltiples formas.

En la figura (10) se muestra una imagen ampliada de una barra de acero completamente afectada con corrosión por carbonatación, al mismo modo que se observan pequeñas picaduras en su superficie debido a la presencia de iones cloruro en el ambiente. Como vimos en apartados anteriores, este tipo de corrosión combinada puede presentarse con bastante frecuencia, ya que una vez eliminada la capa pasiva del acero este esta desprotegido ante el ataque de iones cloruro.

Como hemos visto anteriormente, la corrosión generalizada de una barra de acero por carbonatación implica una dilatación de la armadura, lo que supone la aparición de esfuerzos internos en la estructura de hormigón que le conducen a la aparición de grietas sobre su superficie. En la figura (11) se observa un elemento estructural de hormigón sometido a esfuerzos internos debido al incremento de volumen de las barras de acero.

Si no se realiza un rápido y correcto mantenimiento de la estructura, este fallo continuará debido a que el hormigón no realiza su función protectora de la armadura ante agresiones externas, por la aparición de fisuras en su superficie.

Las consecuencias de estas lesiones sobre la estructura de hormigón armado dependen de la carga y el tipo de agresión al que esté sometida la estructura. En las figuras (12) y (13) podemos observar el desprendimiento de la capa superficial de hormigón, dejando al descubierto un tramo de la barra y del estribo de la armadura. Esta lesión



Figura 10 Barra afectada por corrosión



Figura 11 Elemento estructural fisurado



Figura 12 Degradación del hormigón

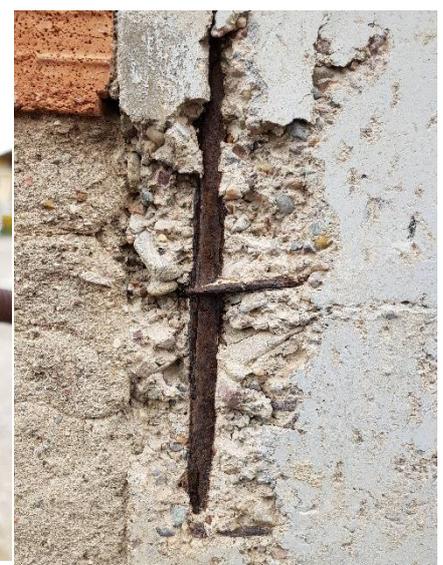


Figura 13 Desprendimiento de recubrimiento

supone una mayor exposición de la armadura y del hormigón al ambiente agresivo que lo rodea.

Si no se realiza una reparación sobre esta lesión en el hormigón y la armadura, la continua exposición a un ambiente agresivo llevará a la estructura a la pérdida total o parcial de su funcionalidad debido a que las características resistivas del hormigón y del acero se pierden, mientras que la carga para la que ha sido diseñada la estructura no desaparece. En la figura (14) se observa un elemento estructural donde la degradación total de la masa de hormigón ha supuesto la fractura de las barras de acero y la pérdida de funcionalidad del elemento estructural. Con lo que esto supone la sustitución integral del elemento estructural o estructura de hormigón armado.



Figura 14 Pérdida de funcionalidad en elemento estructural

3.2. Relacionados con el objetivo secundario

3.2.1. Elementos del ordenador

Los ordenadores son herramientas que están presentes en nuestra vida cotidiana, estos elementos los tenemos en dispositivos móviles, tarjetas de crédito, maquinaria industrial, etc. Los ordenadores nos reducen y facilitan los cálculos, con ellos podemos realizar distintos tipos de tareas y simulaciones. Los ordenadores están formados por un procesador o CPU, la cual es el cerebro del ordenador y controla el funcionamiento de sus componentes principales como son la memoria y la capacidad de realizar operaciones matemáticas. El sistema incluye la memoria RAM y un disco duro para almacenar y recuperar la información a largo plazo para grandes cantidades de información. La CPU utiliza la memoria para el acceso instantáneo a la información durante su funcionamiento. Los ordenadores disponen de otros tipos de dispositivos externos, denominados periféricos, los cuales se conectan a la placa base mediante cables, algunos de estos dispositivos externos son:

- Unidad de almacenamiento
- Unidad de CD-ROM
- Unidad USB
- Tarjetas de red
- Tarjeta grafica

Es habitual emplear los ordenadores para la comunicación entre el usuario y la máquina, por tanto, dispone de otros periféricos que le permiten la interacción con el usuario: [21]

- Teclado. Permite la escritura de texto y datos numéricos en la memoria del ordenador.
- Ratón. Ayuda al usuario a señalar textos, objetos gráficos, comandos del menú, etc.
- Monitor. Muestra textos, elementos gráficos, números, etc., procedentes de la memoria del ordenador.
- Impresora. Genera sobre papel elementos gráficos, textos y números; permitiendo realizar nuevas copias. Las impresoras son dispositivos periféricos que pueden estar conectadas al mismo equipo o a un conjunto de ordenadores conectados en red.

3.2.2. Arquitectura de Von Neumann

La arquitectura de Von Neumann surge con la necesidad de evitar el recableado de la maquina con cada nueva tarea. Por este motivo, en 1949 John Von Neumann encontró y desarrollo la solución para este problema, colocando la información sobre las operaciones a realizar en la misma memoria utilizada para los datos, escribiéndola toda en código binario. Este diseño se convirtió en el modelo de las computadoras de este tipo construidas en años sucesivos. Desde entonces se habla de la arquitectura de Von Neumann como referente debido a su simplicidad en el modelo computacional, aunque posteriormente se realizaron otros diseños. Los ordenadores que poseen este tipo de arquitectura constan de las siguientes partes:

- CPU: Unidad central de procesamiento.
- Memoria
- Dispositivos de entrada y salida
- Buses de conexión.

3.2.2.1. CPU: El procesador

La CPU o unidad central de procesamiento, también conocida como procesador, es el componente encargado de interpretar las instrucciones de los programas y procesar los datos. El procesador está formado por distintos componentes, los cuales están sincronizados los unos con los otros y se encargan de manera individual de una función concreta dentro de la CPU. El procesador trabaja de forma conjunta con la memoria RAM, la cual almacena las instrucciones y los datos de los programas que están ejecutándose en ese momento. Ambos elementos se mantienen trabajando de forma síncrona gracias a los impulsos proporcionados por el reloj interno del procesador.

Componentes del procesador

Un procesador está formado por un conjunto de componentes que trabajan de forma conjunta y síncrona para ejecutar correctamente las instrucciones de los programas. Los componentes que forman el procesador son: [23]

- Unidad aritmética-lógica (ALU). Este elemento básico es un circuito digital que se encarga de realizar operaciones aritméticas y operaciones lógicas con los datos procedentes de las instrucciones.
- Unidad de control (UC). Esta unidad se encarga de coordinar el funcionamiento de los elementos del procesador, en función de la instrucción y de la etapa que se esté ejecutando. Así mismo se encarga de interpretar, mediante la unidad de decodificación, y ejecutar las instrucciones almacenadas en la memoria principal.

Junto a las dos unidades anteriores, podemos encontrarnos dentro de ellas con otros elementos, los cuales son:

- Registros. Estos elementos se emplean para controlar las instrucciones en ejecución, manejar direccionamiento de memoria, proporcionar capacidad aritmética y almacenar temporalmente los datos de una instrucción que se está ejecutando en ese momento. Los registros se consideran espacios físicos dentro del procesador y su tamaño se mide en bits, pudiendo tener una capacidad de 4 bits a 64 bits dependiendo del procesador empleado, en la actualidad las capacidades más empleadas son de 32 bits y 64 bits. Esta capacidad determinará el número de datos que se pueden manipular en una sola operación. Algunos de los registros que podemos encontrarnos dentro de la CPU son: [22]
 - Registro de instrucción. Contiene la instrucción que se está ejecutando.
 - Registro contador de programas. Contiene la dirección de memoria de la siguiente instrucción a ejecutar.
 - Registros de entrada. Guarda los operandos de la operación empleados en la ALU.
 - Registros acumuladores (ACC). Almacena los resultados de las operaciones realizadas en la ALU.
 - Registro de estado. Registra las condiciones de la operación anterior.
 - Registro de apuntador de instrucciones (IP). Este registro de 16 bits contiene el desplazamiento de la siguiente instrucción que se realiza.

- Unidad de decodificación. Su función consiste en decodificar las instrucciones para determinar a cuál de ellas corresponde la secuencia de bits que está leyendo y así poder realizar el procesador la operación correspondiente.

- Reloj interno. Los elementos descritos anteriormente trabajan de forma sincronizada mediante impulsos, por tanto, el reloj se encarga de proporcionar estos impulsos a intervalos constantes para sincronizar estos elementos.

- Unidad de interfaz con el bus. Se encarga de recibir las instrucciones y los datos directamente de la memoria RAM a través del bus del sistema.

Análisis interno del procesador

Para analizar con mayor detalle el funcionamiento y rendimiento de un procesador debemos fijarnos en las siguientes características internas: [23]

- ***Frecuencia:***

La frecuencia es un parámetro dado por el reloj interno del procesador, esta se mide en Hertzios, aunque es habitual encontrarla dada en gigahertzios (GHz). La frecuencia indica el número de ciclos por segundo que se realiza una instrucción. Por tanto, un procesador que funcione a 1.8 GHz quiere decir que su reloj interno oscila 1.800.000.000 de veces por segundo, por lo que, al estar los elementos internos del procesador sincronizados con el reloj interno mediante impulsos, estos elementos trabajaran a dicha frecuencia.

- ***Arquitectura y tamaño de los registros:***

La arquitectura de un procesador hace referencia a su diseño interno. Pudiendo encontrar dos familias diferentes de arquitecturas: RISC y CISC

Las arquitecturas RISC (reduced instruction set computer) se basan en un conjunto de instrucciones reducidas y simples, lo cual no quiere decir que la potencia de estas familias se vea disminuida. Al tener un diseño simplificado, las instrucciones se ejecutan rápidamente, aunque sea necesario ejecutar varias de ellas para obtener el mismo resultado que con una sola instrucción más compleja. Este tipo de arquitectura es la empleada por multitud de plataformas móviles y videojuegos.

Las arquitecturas CISC (complex instruction set computer) disponen de un conjunto de instrucciones más complejo y elaborado, incluyendo instrucciones de carácter especial para la gestión de datos multimedia. Este tipo de arquitectura dificulta el paralelismo entre instrucciones, por lo que actualmente, los equipos que incorporan este tipo de arquitectura incluyen un sistema que convierte dichas instrucciones complejas en varias instrucciones del tipo RISC. Los ordenadores personales están basados en este tipo de arquitectura.

El tamaño de los registros también es una característica importante y a tener en cuenta ya que como se ha indicado anteriormente, estos registros permiten el almacenamiento temporal de los datos de una instrucción. Se puede observar que un incremento del doble de bits de almacenaje en el registro reduce el número de accesos al mismo en el caso de que no entrasen el número de bits almacenados en el registro inicialmente, lo que equivale a un ordenador más rápido, para el procesamiento de información.

- ***Tecnología de núcleo múltiple (multi procesamiento):***

Al haber un único procesador, las instrucciones de los programas abiertos se van intercalando por turnos para acceder al procesador. Estos cambios (marcados por la frecuencia del reloj interno) se realizan de manera tan rápida

que no son apreciables. Tras varios años de búsqueda en la mejora de la frecuencia de reloj del procesador, observaron que el esfuerzo requerido para incrementar el número de ciclos de oscilación del reloj interno del procesador era excesivo. Por lo que en 2006 Intel introdujo la revolución de los núcleos múltiples, sacando a la venta el primer procesador con doble núcleo. Esta tecnología duplicaba la potencia del procesador ya que permitía ejecutar de manera real dos programas simultáneamente. Con el paso de los años esta tecnología ha ido en aumento pudiendo encontrar equipos para uso personal y profesional con procesadores de hasta 6 núcleos y equipos para usos especiales que incorporan 80 núcleos de procesamiento en un mismo microchip.

- **Hyper-Threading:**

Es el precedente a la tecnología de núcleos múltiples. Intel desarrolló una tecnología que permitía acelerar la ejecución de dos hilos de un mismo programa en un solo procesador, esto ofrecía un cierto grado de paralelismo. Esta característica se eliminó de los primeros procesadores de doble núcleo, volviéndose a introducir posteriormente en procesadores de gama media y alta. Como podemos observar en la figura (15.2), a cada núcleo le llegan instrucciones procedentes de dos hilos diferentes de ejecución, como resultado se puede obtener un procesador de 4 núcleos que realiza 8 procesos en paralelo.

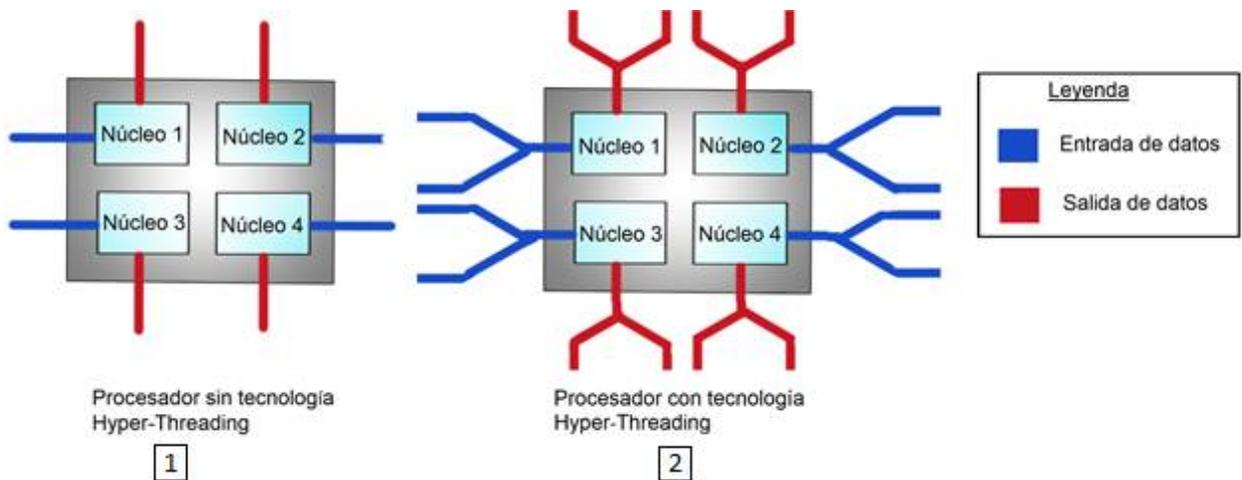


Figura 15 Hyper-Threading

- **Velocidad del bus del sistema:**

Esta característica repercute sobre el rendimiento global del procesador, ya que la velocidad total será la del componente más lento. El bus del sistema es el conducto por el que el procesador se comunica con la memoria RAM. Por tanto, aunque esta característica no es propia del procesador, si es una consecuencia directa de la arquitectura de Von Neumann afectando a su

rendimiento, ya que este se ve limitado a la tasa de transferencia de información que podemos almacenar o extraer de la memoria, haciendo que el procesador se vea forzado a esperar continuamente a que le lleguen los datos necesarios de la memoria. Esta limitación en el rendimiento del procesador debida a la tasa de transferencia de información entre el procesador y la memoria se conoce como embotellamiento de Von Neumann. Esta velocidad no se da como una tasa de transferencia de datos, si no como una medida de la frecuencia al igual que en el procesador. Por tanto, esta velocidad nos indica el número de operaciones de lectura/escritura que puede realizar el procesador por segundo.

En procesadores multi núcleo actuales Intel comienza a emplearse una nueva nomenclatura para hacer referencia a la transferencia de datos a través del bus del sistema. Esta nueva nomenclatura recibe el nombre de GT/s (Giga Transfer / second), lo cual indica las transferencias que se realizan en Gigas por segundo (2 GT/s equivale a 1 GHz).

3.2.2.2.La memoria

El procesador solo puede manipular una única instrucción a la vez, por lo que necesita almacenar el resto del programa y de los datos en un lugar hasta que la CPU necesite recuperar dicha información. Este elemento es la memoria RAM (random access memory; memoria de acceso aleatorio), que es el tipo más común de almacenamiento primario o de memoria. Esta memoria está formada por chips que almacenan temporalmente las instrucciones y los datos del programa. El ordenador divide cada chip de la memoria en muchas ubicaciones de memoria del mismo tamaño. Estas ubicaciones tienen direcciones únicas para localizar y recuperar la información más rápidamente. Este tipo de memoria también recibe el nombre de memoria volátil, ya que la información retenida no se mantiene permanentemente. Existe otro tipo de memoria no volátil, conocida como memoria ROM (read only memory; memoria de solo lectura), en este tipo de memoria la CPU solo podrá leer la información almacenada en su interior, en ningún momento podrá escribir información en ella. Los equipos modernos incluyen este tipo de memoria en el que se graban instrucciones de arranque y otra información crítica para el equipo. En la arquitectura inicial, la memoria principal era la memoria RAM, pero con el paso del tiempo esta ha evolucionado, añadiéndose nuevas memorias como son la cache e implementándose nuevos algoritmos que predicen los datos que se van a utilizar con mayor frecuencia. [21]

3.2.2.3.Buses de conexión

Son dispositivos que se encargan del transporte de datos y conexiones entre las distintas partes de un sistema informático. El procesador, la memoria y el resto de los componentes están integrados en la placa base. Esta información viaja entre los distintos elementos a través de un grupo de cables llamados buses del sistema. Estos buses

Para explicar el funcionamiento de la arquitectura de Von Neumann se procederá a describir paso a paso un programa que realiza la suma de dos valores (5 y 11) y se obtiene su producto (16): [24]

| | Instrucción | Operación | Comentario |
|----|-------------|-----------|-----------------|
| 1- | 0000 | + | Suma |
| | 0110 | M | Mover a memoria |
| | 0111 | - | Finalizar |

Tabla 25 Leyenda para explicación del ejemplo

- 1- El contador del programa se inicia con un valor nulo (0000) y por tanto la unidad de control envía una micro-orden para transferir el contenido del contador del programa al registro de direcciones.
- 2- Tras esto, el contador del programa incrementa en 1 su valor (0001), por lo que su contenido será la dirección de la próxima instrucción a ejecutar.
- 3- Se selecciona la posición de memoria indicada por el registro de direcciones, la cual se encuentra en su valor inicial (0000) y se realiza la lectura del contenido de la memoria (0000-0100). Introduciendo el valor leído en el registro de datos para ejecutar la instrucción.
- 4- Dicho valor se traslada al registro de instrucciones donde se almacena.
- 5- El decodificador interpreta la instrucción, la cual según se ha indicado al inicio de este apartado serán los 4 primeros bits (0000). Si nos vamos a la tabla (25) con el código de las instrucciones y su operación vemos que esta corresponde a la suma.
- 6- Finalizada la decodificación se envían los 4 últimos bits al registro de direcciones para indicar la próxima dirección de memoria a emplear (0100).
- 7- Selecciona dicha dirección de memoria (0100) y procede a leer su contenido (0000-0101), enviando dicha información al registro de datos.
- 8- El registro de datos traslada dicho valor al registro de entrada de la ALU. Como podemos observar, el valor obtenido en la memoria (0000-0101) corresponde al número 5 en binario con un tamaño de 8 bits.
- 9- El circuito operacional de la ALU realiza la operación con el registro acumulador (0000-0000) y el registro de entrada (0000-0101) y lo almacena de nuevo en el registro acumulador (0000-0101).
- 10- La unidad de control envía nuevamente una micro-orden y transfiere el contenido del contador (0001) al registro de direcciones para indicar la ubicación de la nueva instrucción.
- 11- Tras esto el contador vuelve a incrementar su valor en una unidad (0010).
- 12- Se selecciona la posición de memoria indicada por el registro de direcciones, la cual se encuentra ahora en la posición (0001) y se realiza la lectura del contenido de la memoria (0000-0101). Trasladando el valor contenido en la dirección de memoria seleccionada al registro de datos, para indicar la instrucción a realizar.

- 13-Este valor se traslada al registro de instrucciones donde se almacena.
- 14-El decodificador interpreta la instrucción, siendo esta los 4 primeros bits (0000). Podemos observar que dicha instrucción sigue siendo la suma de valores.
- 15-Finalizada la decodificación se envían los 4 últimos bits al registro de direcciones para indicar la próxima dirección de memoria a emplear (0101).
- 16-Se selecciona dicha dirección de memoria (0101) y se procede a leer su contenido (0000-1011), enviando dicha información al registro de datos.
- 17-El registro de datos traslada este valor al registro de entrada de la ALU. Cómo podemos observar, el valor obtenido en la memoria (0000-1011) corresponde al número 11 en binario con un tamaño de 8 bits.
- 18-El circuito operacional de la ALU realiza la operación con el registro acumulador (0000-0101) y el registro de entrada (0000-1011) y almacena el resultado de nuevo en el registro acumulador (0001-0000).
- 19-La unidad de control envía nuevamente una micro-orden y transfiere el contenido del contador (0010) al registro de direcciones para indicar la ubicación de la nueva instrucción.
- 20-Tras esto el contador vuelve a incrementar su valor en una unidad (0011).
- 21-Se selecciona la posición de memoria indicada por el registro de direcciones, la cual se encuentra ahora en la posición (0010) y se realiza la lectura del contenido de la memoria (0110-0111). Trasladando el valor contenido en la dirección de memoria seleccionada al registro de datos.
- 22-Este valor se envía al registro de instrucciones donde se almacena.
- 23-El decodificador interpreta la instrucción, siendo esta los 4 primeros bits (0110). En este caso vemos que la instrucción a realizar ha cambiado y según la tabla (25), el programa está indicando que se realice el movimiento del valor obtenido a la memoria.
- 24-Finalizada la decodificación se envían los 4 últimos bits al registro de direcciones para indicar la próxima dirección de memoria a emplear (0111).
- 25-El registro de direcciones busca la ubicación de la memoria (0111) donde será almacenado dicho valor.
- 26-El registro acumulador envía la información (0001-0000) solicitada por el registro de instrucciones al registro de datos.
- 27-El registro de datos escribe en la celda de la memoria seleccionada la información pedida.
- 28-La unidad de control envía nuevamente una micro-orden y transfiere el contenido del contador (0011) al registro de direcciones para indicar la ubicación de la nueva instrucción.
- 29-Tras esto el contador vuelve a incrementar su valor en una unidad (0100).
- 30-Se selecciona la posición de memoria indicada por el registro de direcciones, la cual se encuentra ahora en la posición (0011) y se realiza la lectura del contenido de la memoria (0111-0000). Enviando el valor contenido en la dirección de memoria seleccionada al registro de datos.
- 31-Este valor se traslada al registro de instrucciones donde se almacena.

32-El decodificador interpreta la instrucción, siendo esta los 4 primeros bits (0111). En este caso vemos que la instrucción a realizar ha cambiado y según la tabla (25), indica la finalización del programa. Por lo que tras esta instrucción el programa finaliza su ejecución.

Todos estos puntos se ejecutan continuamente y de manera cíclica hasta la finalización del programa. Variando las instrucciones y las direcciones de memoria a usar según el tipo de programa ejecutado. En los ordenadores actuales este funcionamiento podría variar, aumentando el número de elementos contenidos en la CPU o el tipo de arquitectura empleado. Así mismo el número de bits empleados para el manejo de instrucciones y direcciones de memoria, aumenta según sea para equipos de 16 bits, 32 bits o 64 bits.

3.3. Modelos matemáticos empleados:

El modelo lineal de Langmuir tiene la siguiente expresión:

$$C_b = \widetilde{C}_b * K * C_f$$

Donde K es una constante positiva en función de una temperatura dada y (C_f) es la concentración de cloruro libre en Kg/m³ de hormigón. Este modelo se emplea como aproximación para bajas concentraciones de cloruro.

El modelo de Langmuir se obtiene como:

$$C_b = \frac{\alpha * C_f}{1 + K * C_f}$$

Siendo α y K dos constantes positivas en función de una temperatura dada. Podemos observar que K viene dada en m³ de hormigón por Kg, por tanto, podemos reescribir la ecuación anterior como:

$$C_b = \widetilde{C}_b * \frac{K * C_f}{1 + K * C_f}$$

Sustituyendo α como el producto de K por otra constante con las mismas unidades que la concentración de cloruro de unión (C_b), denominándose a esta nueva constante como concentración máxima de cloruro de unión (\widetilde{C}_b) siendo sus unidades Kg/m³ de hormigón.

Para los dos modelos anteriores, la constante de equilibrio ha sido considerada isoterma. En el caso de que dicha constante de equilibrio estuviera en función de la temperatura, la concentración de cloruro de unión también dependería de dicha temperatura, por tanto, las ecuaciones para la solución no isoterma vendrán dadas como:

$$\text{Modelo linear de Langmuir} \rightarrow C_b = \widetilde{C}_b * K(T) * C_f$$

$$\text{Modelo de Langmuir} \rightarrow C_b = \widetilde{C}_b * \frac{K(T)*C_f}{1+K(T)*C_f}$$

Para este trabajo consideraremos que la constante de equilibrio tiene un valor constante para cada modelo empleado a una temperatura de 20° C.

El modelo de Freundlich podemos determinarlo a partir de la siguiente expresión:

$$C_b = K * C_f^\alpha$$

Donde α y K son dos constantes positivas en función de una temperatura dada. Esta ecuación se conoce como el modelo de absorción empírico.

Para el caso no isoterma de la constante de equilibrio, la ecuación toma la siguiente forma:

$$C_b = K(T) * C_f^\alpha$$

Si combinamos las ecuaciones de los modelos de Langmuir y de Freundlich, obtenemos una expresión que nos relaciona ambos modelos:

$$C_b = \widetilde{C}_b * \frac{K * C_f^\alpha}{1 + K * C_f^\alpha}$$

Donde α representa la fracción de cloruro libre susceptible al cloruro de unión, siendo válido su valor entre $0 < \alpha < 1$. La solución no isoterma de la expresión anterior tiene la siguiente forma:

$$C_b = \widetilde{C}_b * \frac{K(T) * C_f^\alpha}{1 + K(T) * C_f^\alpha}$$

En la tabla (26) se muestran los parámetros empleados para los distintos modelos simulados según el tipo de material seleccionado.

| Modelo | \widetilde{C}_b | K | α |
|---------------------|-------------------|----------|----------------------------|
| Langmuir | 9.0727 | 2.1336 | - |
| Freundlich | - | 6.2714 | 0.235 |
| Langmuir-Freundlich | 11.895 | 1.1007 | 0.5639 |

Tabla 26 Valores para las variables de los distintos modelos [26]

3.4. Entorno de simulación

3.4.1. Matlab:

- **Introducción:**

Matlab proviene de “Matriz Laboratoy” y fue creado para proporcionar un acceso más sencillo a las librerías LINPACK y EISPACK, que son dos de las más importantes en calculo matricial y computacional.

Es un programa interactivo que se emplea para realizar cálculos numéricos con vectores y matrices, procesamiento de señales y visualización de datos. Matlab permite trabajar con números escalares, cadenas de texto y otras estructuras computacionales más complejas.

Matlab es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado para realizar proyectos que impliquen complicados cálculos numéricos y posterior visualización de datos. Es un lenguaje de alto rendimiento que permite realizar todos estos cálculos sin ser necesario la escritura de un programa por lenguaje tradicional.

En la actualidad Matlab se emplea en multitud de centros educativos como son escuelas, universidades y centros de formación para facilitar su inmediata comprensión y utilización, ya que es una herramienta básica demandada por empresas de todo el mundo para la realización de tareas más complejas y de investigación, pudiendo realizar simulaciones complejas como son: los efectos de aerosoles sometidos a corrientes de aire con obstáculos para distintos gases, la influencia de cloruros sobre el hormigón armado en presencia de agua de mar, representación del vuelo de un avión a 6000 m de altitud y otras simulaciones

Actualmente Matlab también dispone de numerosos programas auxiliares que le permiten realizar programas especializados y aumentar considerablemente el número de funciones con las que puede trabajar Matlab. Algunos de estos programas auxiliares destacan en: análisis de señales, imágenes, control de PID, estadística, análisis financiero, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc.

Uno de los programas más empleados junto a Matlab es

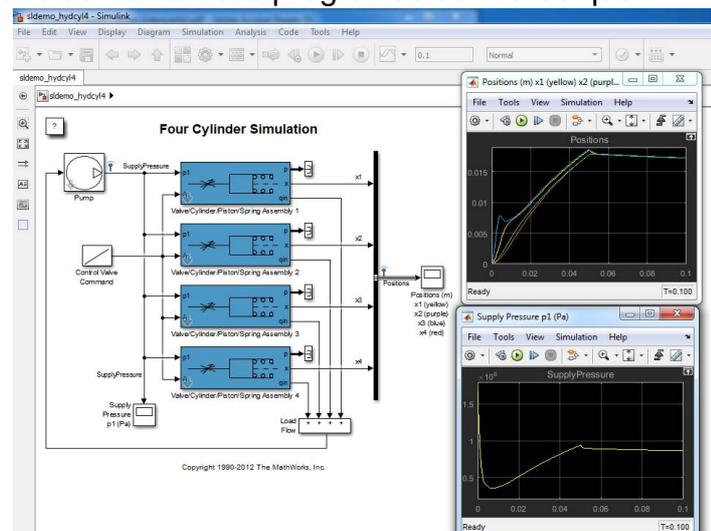


Figura 17 Ejemplo de simulación en Simulink

Simulink el cual nos ofrece un gran entorno grafico con el que poder analizar, modelizar y simular la dinámica de sistemas no lineales. Algunos de los ejemplos de simulación que nos ofrece Simulink de serie son: la simulación del rebote de una pelota, el modelado de un controlador de transmisión automática o el control de vuelo longitudinal de un avión entre otras funciones. La figura (17) muestra la simulación de cuatro cilindros hidráulicos realizada con Simulink.

Matlab emplea matrices para la resolución de problemas, ya que este conjunto de números o elementos puede describir el comportamiento de infinidad de situaciones al ser altamente flexible, tener un alto rendimiento matemático, describir relaciones lineales complejas entre los componentes de un modelo matemático, etc.

- **Entorno de simulación:**

Al iniciar Matlab encontramos la siguiente interfaz en la que podemos comenzar a realizar nuestras simulaciones.

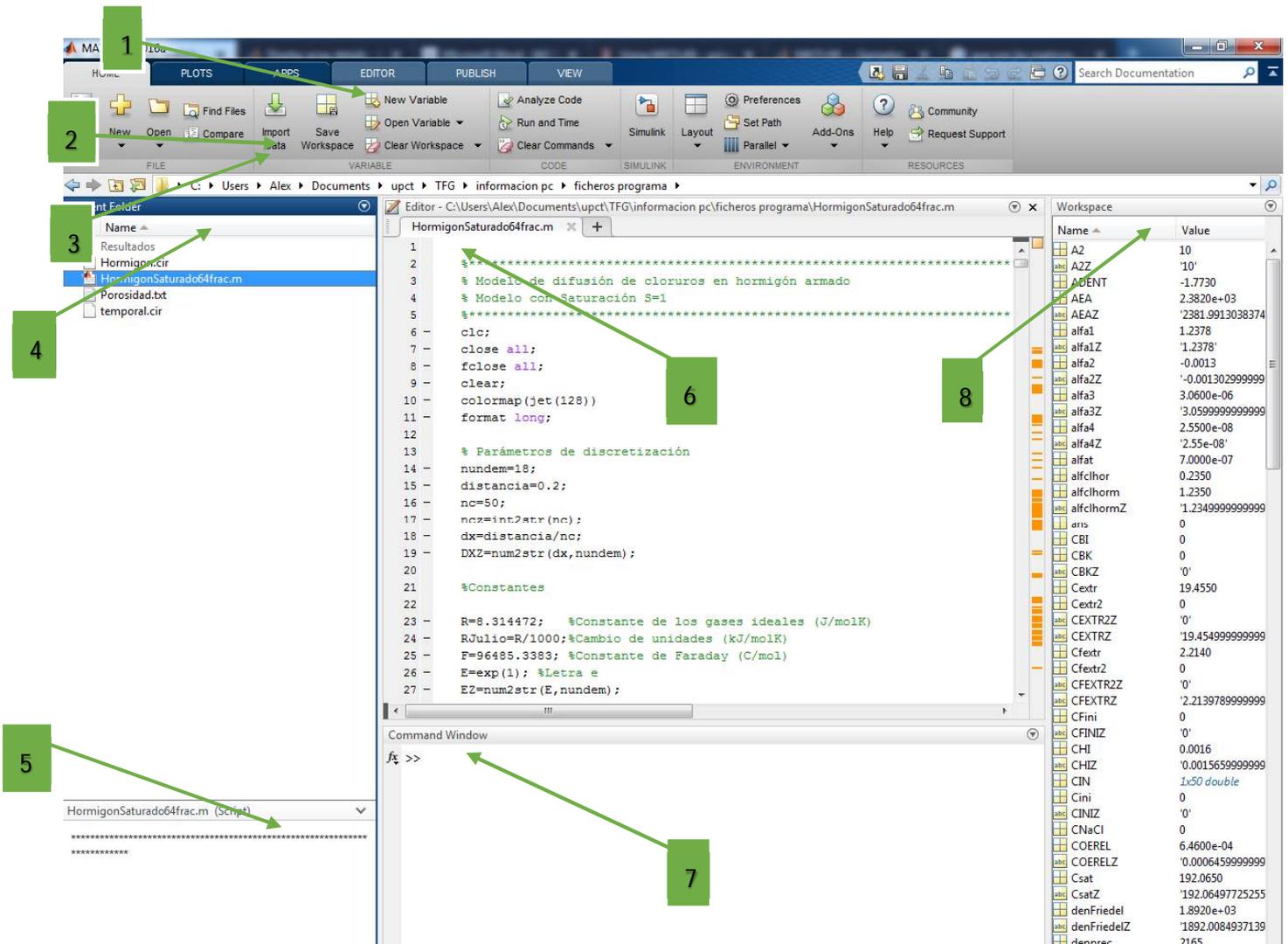


Figura 18 Entorno de simulación Matlab

A continuación se describen los distintos elementos que componen la interfaz del programa y su utilidad:

1. Este punto reúne las distintas pestañas del programa activadas que donde se incluyen la mayoría de las funciones que puede realizar el programa, estas pestañas son: home, plots, apps, shortcuts, editor, publish y view.
2. Este punto recoge las distintas paletas de funciones pertenecientes a cada una de las pestañas anteriormente descritas:
 - a. Home: esta pestaña recoge funciones básicas como son abrir archivos nuevos o guardados, guardar archivos, importar funciones y datos, guardar espacios de trabajo, etc. También tiene un botón de inicio a Simulink con el que se abre esta aplicación auxiliar comentada en el apartado anterior.
 - b. Plots: en esta pestaña tenemos todo lo necesario para la representación de datos mediante gráficas y funciones de todo tipo.
 - c. Apps: matlab incorpora funciones auxiliares denominadas toolbox las cuales nos permiten realizar multitud de funciones de apoyo como se ha indicado en el apartado anterior. Algunos de los grupos de funciones que incorpora el programa básico son:
 - I. Matemáticas, estadística y optimización.
 - II. Diseño de sistemas de control y análisis.
 - III. Procesamiento de señales y comunicaciones.
 - IV. Procesamiento de imágenes y visión computacional.
 - V. Test y mediciones.
 - VI. Computación financiera
 - VII. Computación biológica.
 - VIII. Generación y verificación de código
 - IX. Desarrollo de aplicaciones.
 - d. Shortcuts: en esta pestaña se pueden crear diferentes atajos para el rápido desarrollo de aplicaciones y evitar tener que repetir funciones repetidas.
 - e. Editor: Esta pestaña es similar a la de Home, diferenciándose únicamente en que en esta pestaña se realiza la puesta en marcha de las simulaciones y se lleva a cabo el control de ellas.

- f. Publish: esta pestaña se encarga de guardar, publicar y realizar cualquier tipo de acción específica sobre el código generado.
 - g. View: en esta última pestaña podemos encontrar un control de visualización de las distintas vistas de la interfaz para ocultar y mostrar aquellos elementos que nos interesen sin saturar de ventanas la pantalla.
3. Aquí encontramos la barra de dirección donde podemos localizar la carpeta de almacenamiento de nuestros archivos. Este punto, esta relacionando con el siguiente.
 4. En “Current folder” se nos muestran los distintos archivos que se encuentran localizados en la carpeta señalada por la barra de direcciones.
 5. Este punto nos muestra información acerca de los distintos archivos contenidos en la carpeta mostrada por la barra de direcciones. Si el archivo no contiene información para mostrar, nos mostrara el siguiente mensaje en la ventana “details”: “No details available”.
 6. Aquí encontramos el editor de los distintos programas y simulaciones. Se puede abrir en forma de ventanas o mediante pestañas pulsando el símbolo “+” ubicado en la parte superior.
 7. La ventana “command Windows” nos permite realizar todas las instrucciones necesarias para la resolución de los distintos cálculos numéricos requeridos. Por tanto, esta es nuestra ventana de control desde donde podemos realizar todas las funciones de Matlab (abrir, cerrar, guardar, abrir ventanas, cálculos, etc.) mediante diferentes comandos.
 8. La ventana workspace nos muestra información de todas las variables y objetos empleadas durante la simulación, así como los valores obtenidos ya sean variables double o string entre otras.

3.4.2. Código de simulación:

En este apartado se describen algunos puntos importantes del código empleado para la simulación. Este código realiza tareas de generación de datos en unas matrices a partir de unos modelos definidos y las condiciones iniciales y de contorno dadas. Una vez realizadas todas las simulaciones indicadas, Matlab abre Spice y representa todos los datos almacenados durante su ejecución.

- **Parámetros de discretización:**
En esta sección del código se definen las condiciones de contorno del modelo a estudiar indicando la distancia en metros. Incluyendo además ecuaciones de definición y cambio de unidades. La variable “nundem” se define en este apartado como la longitud de caracteres a guardar, empleándose a lo largo del código.

```
% Parámetros de discretización  
nundem=18;  
distancia=0.2;  
nc=50;  
ncz=int2str(nc);  
dx=distancia/nc;  
DXZ=num2str(dx,nundem);
```

Figura 19 Captura de pantalla parámetros de discretización

- **Constantes:**
Este apartado del código muestra los valores invariables y cambios de unidades necesarios para la implementación de las simulaciones. Entre las constantes empleadas destacan: la de Faraday y la de los gases ideales.

```
%Constantes  
R=8.314472;  
RJulio=R/1000;  
F=96485.3383;  
E=exp(1);  
EZ=num2str(E,nundem);
```

Figura 20 Captura de pantalla Constantes

- Parámetros:
En esta sección del código aparecen otros parámetros de definición y relaciones experimentales de constantes y variables ambientales. Destacan:

- Alfat: Parámetro de temperatura (m^2/s)
- denFriedel: Densidad de la sal de Friedel (Kg/m^3)
- denprec: Densidad de la sal precipitada (Kg/m^3)
- e: constante para la permeabilidad
- KW: coeficiente intrínseco de permeabilidad.
- DEXP: coeficiente de difusión experimental. Tomado para un valor ambiental de 20 °C (m^2/s)
- EA: energía de activación.
- DENREF: densidad del agua dulce referenciada a 20 °C (Kg/m^3)
- COERELZ: coeficiente de correlación de la densidad del agua (m^3/ Kg)
- MMCL: peso molecular del cloro (g/mol)
- MMNA: peso molecular del sodio (g/mol)
- MMNACL: peso molecular del cloruro de sodio (g/mol)
- CHI: coeficiente de viscosidad (m^3/Kg)
- VVO: viscosidad dinámica del agua a una temperatura ambiental de 20 °C (Pa-s)
- alfa1, 2, 3 y 4: son los coeficientes de viscosidad definidos para cada uno de los modelos estudiados.
- K: constante positiva de las ecuaciones de cloro combinado dada para los distintos modelos estudiados.
- alfclhor: valor de α presente en las distintas ecuaciones de cloro combinado.
- CBI: valor de la concentración de cloruro de unión (C_b) para cada uno de los modelos estudiados.
- modelochlor: indica el modelo seleccionado para la simulación. El "1" corresponde al modelo lineal de Langmuir, "2" al modelo de Langmuir, "3" al modelo de Freundlich y "4" al modelo de Langmuir-Freundlich.

```

§Parametros
alfat=7E-7;

denFriedel=561.34E-3/296.69E-6;
denFriedelZ=num2str(denFriedel,nundem);
denprec=2165;

e=0.5158;
eZ=num2str(e,nundem);
inve=1/e;
inveZ=num2str(inve,nundem);

KW=1E-21;
KWZ=num2str(KW,nundem);

DEXP=2.8e-11;
DEXPZ=num2str(DEXP,nundem);
EA=19805;
AEA=EA/R;
AEAZ=num2str(AEA,nundem);

DENREF=998.2;
DENREFZ=num2str(DENREF,nundem);
COEREL=6.46E-4;
COERELZ=num2str(COEREL,nundem);
MMCL=35.4532;
MMCLZ=num2str(MMCL,nundem);
MMNA=22.9898;
RELMM=(MMNA+MMCL)/MMCL;
RELMMZ=num2str(RELMM,nundem);
MMNACL=MMNA+MMCL;
MMNACLZ=num2str(MMNACL,nundem);

CHI=1.566E-3;
CHIZ=num2str(CHI,nundem);
VVO=1002;
VVOZ=num2str(VVO,nundem);
alfa1=1.2378;
alfa1Z=num2str(alfa1,nundem);
alfa2=-1.303E-3;
alfa2Z=num2str(alfa2,nundem);
alfa3=3.06E-6;
alfa3Z=num2str(alfa3,nundem);
alfa4=2.55E-8;
alfa4Z=num2str(alfa4,nundem);
K=6.2714;
KZ=num2str(K,nundem);
alfclhor=0.2350;
alfclhorm=1+alfclhor;
alfclhormZ=num2str(alfclhorm,nundem);
CBI=0;
CBK=CBI*K;
CBKZ=num2str(CBK,nundem);
modelochlor=3;

```

Figura 21 Captura de pantalla Parámetros

- Condiciones iniciales y de frontera:
Esta parte del código define las condiciones iniciales de la estructura de hormigón, así como fracciones y ecuaciones que definen otros parámetros. Podemos encontrar:

- POini: define el valor de la porosidad en el hormigón en tanto por ciento.
- Sat: indica el valor de saturación del ambiente marino que está en contacto con la estructura.
- CFiní: es la concentración de cloro libre inicial en la estructura, en kg/m³ de hormigón.
- Cextr: son los kg/m³ de solución en los poros con una concentración de cloro libre inicial.

```

% Condiciones iniciales y frontera
POini=0.1138;
POiniZ=num2str(POini,nundem);
sat=1;
POLini=POini*sat;
POLINIZ=num2str(POLini,nundem);

CFiní=0;
CFINIZ=num2str(CFiní,nundem);
Cextr=19.455;
CEXTRZ=num2str(Cextr,nundem);
Cfextr=POLini*Cextr;
CFEXTRZ=num2str(Cfextr,nundem);
Cextr2=0;
CEXTR2Z=num2str(Cextr2,nundem);
Cfextr2=POLini*Cextr2;
CFEXTR2Z=num2str(Cfextr2,nundem);
Cini=CFiní/POLini;
CINIZ=num2str(Cini,nundem);

```

Figura 22 Captura de pantalla condiciones iniciales y de frontera

- Humedad y temperatura:
Aquí se definen las condiciones ambientales del aire a las que será sometido el modelo a estudiar durante las simulaciones. Algunos de los parámetros definidos son:

- hr: es la humedad relativa del ambiente en tanto por ciento.
- TAMB: es la temperatura del ambiente convertida de grados centígrados a grados kelvin.
- TREF: temperatura de referencia a la que se trabaja en la simulación, convertida de grados centígrados a grados kelvin.
- Tpr, Tse, Ttr, ..., Ton, Tdo, definen las temperaturas ambientales para cada uno de los 12 meses del año correspondientes a una zona climática concreta. Para este trabajo, las temperaturas seleccionadas podrían corresponder a la zona climática mediterránea, ya que presenta temperaturas moderadas en invierno y cálidas en verano.

```

%Humedad y temperatura
hr=0.3;

TAMB=20+273;
TAMBZ=num2str(TAMB,nundem);
TREF=20+273;
TREFZ=num2str(TREF,nundem);
TINI=TAMB;
TINIZ=num2str(TINI,nundem);

Tpr=15+273;
Tse=16+273;
Ttr=18+273;
Tcu=20+273;
Tci=22+273;
Tsei=23+273;
Tsi=26+273;
Toc=30+273;
Tnu=27+273;
Tdi=22+273;
Ton=18+273;
Tdo=17+273;
Tul=Tdo;

```

Figura 23 Captura de pantalla Humedad y temperatura

- **Parámetros temporales:**
En este apartado del código se definen los valores temporales para indicar los tiempos de simulación. Esta sección se divide así mismo en dos procesos: el “proceso 1” corresponde a una estructura sumergida completamente en agua de mar sometida a una saturación de cloro definida por las condiciones iniciales y de frontera, el proceso 2 indica una situación similar al proceso 1 con la peculiaridad de que tras este tiempo sumergida, se realiza una limpieza de la superficie con agua pura. En el proceso 1, el parámetro “días” representa el número de estos que permanece la estructura de hormigón expuesta al ambiente marino. Para optimizar la capacidad de procesamiento y almacenamiento del ordenador, se realizan las simulaciones de estos días en fracciones indicadas por el parámetro “frac1”. En el proceso 2, el parámetro “días2” representa el número de días al que está sometida la estructura a este proceso de limpieza. Al igual que en el “proceso 1”, se divide el tiempo de simulación en fracciones (frac2) para simplificar el trabajo realizado por el ordenador.

```

%Valores del .TRAN (Temporales)
%Proceso 1
dias=300;
princ=0;
princz=num2str(princ);
final=dias*3600*24;
frac1=30;
fin=final/frac1;
finz=num2str(fin);
intervalo=5;
titer=intervalo*3600;
titerz=num2str(titer);
inter=intervalo*3600;
interz=num2str(inter);
%Proceso 2
if proceso==2
dias2=2;
frac2=2;
final2=dias2*3600*24;
fin2=final2/frac2;
fin2z=num2str(fin2);
else
frac2=0;
end

```

Figura 24 Captura de pantalla valores temporales

El resto de elementos que aparecen en el código de simulación son las ecuaciones y conjunto de instrucciones para la realización de las distintas funciones que desempeña la simulación. Entre ellas podemos destacar:

- La creación y borrado de carpetas iniciales antes de comenzar la simulación y evitar el almacenamiento innecesario de archivos creados en simulaciones anteriores.
- Gestión de archivos, donde se inicia la escritura de estos archivos con información nueva de las simulaciones realizándose en ese momento.
- Definición de los distintos circuitos creados para la simulación. Como sabemos Matlab trabaja con matrices y otras funciones que nos permiten realizar estas simulaciones como si de circuitos se tratasen. Esta sección del código se encarga de la creación y gestión de los distintos circuitos empleados: cloro sobre cemento, agua limpia sobre cemento y sus soluciones.
- Ejecución del programa SPICE. En esta parte del código, se inicia la aplicación auxiliar SPICE para realizar la simulación y representación de los datos obtenidos.
- Creación de los ficheros de seguridad. Una vez finalizadas todas las simulaciones se procede a la creación de unos ficheros de seguridad, en los que se almacenan los datos de las distintas simulaciones realizadas para su posterior manipulación.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4. Desarrollo experimental

Este trabajo experimental consiste en la realización de simulaciones mediante código computacional para determinar la influencia de iones cloruro en una estructura de hormigón completamente sumergida en presencia de agua de mar 100% saturada de cloro. Para realizar este trabajo, se realizan simulaciones de 4 modelos diferentes (Linear Langmuir, Langmuir, Freundlich y Langmuir-Freundlich) durante los mismos periodos de exposición a este medio agresivo (100, 200, 300 y 400 días) en el que la estructura de hormigón no cambiará su exposición frente al medio agresivo.

El método de trabajo seguido consiste en:

- Preparar el código con el modelo a estudiar e indicando el periodo de simulación.
- Iniciar la simulación, controlando los tiempos de inicio y finalización de esta.
- Recoger las gráficas obtenidas y analizar los datos.

A continuación, se exponen las condiciones iniciales y de contorno puestas en común para todos los modelos analizados, así como las características de los equipos empleados para su posterior análisis.

4.1. Condiciones iniciales y de contorno del modelo:

En la descripción del código de simulación se han indicado unas condiciones iniciales y de contorno para la simulación. Estas condiciones iniciales las podemos clasificar según sean ambientales o estructurales:

- *Ambientales:*
 - Humedad relativa del ambiente. Para la simulación se ha especificado una humedad relativa del 30 %, como vimos en el punto 3.1.9, una humedad relativa inferior al 50 % implica un incremento considerablemente del proceso de degradación del acero por carbonatación. Este valor permanece constante a lo largo del tiempo de simulación estudiado.
 - Temperatura ambiente. La temperatura ambiente tomada como referencia es de 20 °C (293 K). esta temperatura va variando con el paso de los días simulados, ya que el código define las temperaturas de un año completo correspondientes a una zona climática localizada. En esta simulación se han definido las temperaturas medias de la zona climática mediterránea. La temperatura no es un valor constante ya que una simulación de 100 días supondrá una variación de la temperatura correspondientes a los tres primeros meses y medio del año, mientras

que una simulación de 400 días supondrá una variación de temperatura correspondiente a un año y un mes del siguiente.

- Saturación de cloro en el agua. Vamos a suponer una saturación del 100% de cloro en el agua del mar.

- **Estructurales:**

- Porosidad. La estructura de hormigón se ha definido con una porosidad del 11.38 %. Esta porosidad puede ser calculada mediante la siguiente expresión: [25]

$$\varphi_0 = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_l}$$

Donde " ρ_l " es la densidad del agua, " ρ_s " la densidad del hormigón seco ($\rho_s = \frac{m_s}{V}$) y " ρ_d " la densidad de la estructura de hormigón completamente saturada ($\rho_d = \frac{m_d}{V}$).

- Cloro libre inicial. Vamos a considerar una concentración ideal de cloro libre inicial en la estructura de hormigón del 0%, esta situación está por debajo de los límites establecidos por la instrucción EHE-08 para la fabricación de estructuras de hormigón amado, siendo este límite de 0.2 % para estas estructuras.
- Coeficiente de difusión. Indica la facilidad con la que un soluto se desplaza en un determinado disolvente. Este coeficiente depende de la temperatura y puede ser aproximado experimentalmente utilizando la siguiente expresión: [25]

$$D_e(T) = D_e(T_0) \cdot \exp\left(-\frac{\hat{E}_a}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right]\right)$$

Donde D_e es una constante de proporcionalidad entre el flujo de difusión y el gradiente de cloruros, para obtener su valor hay que medir experimentalmente la concentración de cloruro libre. El valor de \hat{E}_a corresponde a la energía de activación, para este trabajo se ha tomado un valor de 19805 J. El valor de R es el correspondiente al coeficiente de los gases ideales, 8.314472 J/mol·K. Los valores de T y T_0 corresponden a las temperaturas para el cálculo del coeficiente de difusión y la de referencia respectivamente. Para este trabajo se ha empleado un coeficiente de difusión constante a 20 °C, siendo este valor de $2.8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

- Coeficiente de permeabilidad. Como se ha visto la permeabilidad es un factor importante en la penetración de iones cloruro al interior de la estructura, para este trabajo se ha definido un valor constante de $1 \cdot 10^{-21} \text{ m}^2$.

Las condiciones de contorno también pueden ser definidas para el ambiente y la estructura, siendo estas:

- *Ambientales.* Para este trabajo se suponen como condiciones de contorno un ambiente marino cuya saturación de cloro es máxima y su localización se centra en clima mediterráneo.
- *Estructurales.* Como condiciones de contorno de la estructura, se establece para todas las simulaciones un muro de hormigón armado de 20 cm de espesor, en contacto con el ambiente marino por una de sus caras completamente sumergidas durante todo el periodo de simulación (proceso 1).

Los materiales y concentraciones de la estructura de hormigón armado empleada para realizar la simulación se muestran en la siguiente tabla:

| Material | | Composición (Kg/m ³) |
|--|------------------|----------------------------------|
| Cemento | | 380 |
| Agua | | 171 |
| Áridos | | 1022 |
| Adiciones | Cenizas volantes | 0 |
| | Humo de sílice | 0 |
| aditivos | | 787 |
| Superplastificantes (% peso del cemento) | | 0.97 |

Tabla 27 Composición Hormigón empleado [25]

Analizando el conjunto de las condiciones de contorno de nuestro modelo, vemos que la estructura de hormigón armado simulada está localizada en una clase III b de exposición, debido a que se encuentra sumergida en un ambiente marino. Si recurrimos a la instrucción EHE-08 nos muestra una relación A/C máxima y mínima del contenido de cemento según el tipo de exposición al que este expuesta la estructura. Esta relación la encontramos en las siguientes tablas:

| Parámetro de dosificación | Tipo de hormigón | Clase de exposición | | | | | | |
|--|------------------|---------------------|------|------|-------|-------|-------|------|
| | | I | II a | II b | III a | III b | III c | IV |
| Máxima relación A/C | Masa | 0.65 | - | - | - | - | - | - |
| | Armado | 0.65 | 0.60 | 0.55 | 0.50 | 0.50 | 0.45 | 0.50 |
| | Pretensado | 0.60 | 0.60 | 0.55 | 0.45 | 0.45 | 0.45 | 0.45 |
| Mínimo contenido de cemento (kg/m ³) | Masa | 200 | - | - | - | - | - | - |
| | Armado | 250 | 275 | 300 | 300 | 325 | 350 | 325 |
| | Pretensado | 275 | 300 | 300 | 300 | 325 | 350 | 325 |

Tabla 28 Máxima relación A/C para distintos hormigones en función de las clases de exposiciones generales [3]

| Parámetro de dosificación | Tipo de hormigón | Clase de exposición | | | | | |
|--|------------------|---------------------|------|------|------|------|------|
| | | Q a | Q b | Q c | H | F | E |
| Máxima relación A/C | Masa | 0.50 | 0.50 | 0.45 | 0.55 | 0.50 | 0.50 |
| | Armado | 0.50 | 0.50 | 0.45 | 0.55 | 0.50 | 0.50 |
| | Pretensado | 0.50 | 0.45 | 0.45 | 0.55 | 0.50 | 0.50 |
| Mínimo contenido de cemento (kg/m ³) | Masa | 275 | 300 | 325 | 275 | 300 | 275 |
| | Armado | 325 | 350 | 350 | 300 | 325 | 300 |
| | Pretensado | 325 | 350 | 350 | 300 | 325 | 300 |

Tabla 29 Máxima relación A/C para distintos hormigones en función de las clases de exposiciones específicas [3]

Donde podemos ver que nuestro material cumple con los requisitos de la instrucción puesto que para hormigón armado en clase III b de exposición la relación A/C tiene que ser como máximo de 0.50, mientras que nuestra relación es de 0.45 Esta relación mantiene correctamente los niveles de cristalización y porosidad del hormigón, ya que tiene la cantidad justa para que cristalice completamente sin dejar espacios muy grandes por excesiva acumulación de agua y posteriormente evaporarse.

4.2. Análisis del equipo empleado

En la tabla (30) se recogen las características de los equipos empleados para realizar las distintas simulaciones:

| Equipo | 1 | 2 |
|---------------------------|-------------------------------|------------------------|
| Procesador | Intel® Core™ i7-3770 | Intel® Core™ i5-4460 |
| frecuencia de procesador | 3.40 GHz | 3.20 GHz |
| Memoria interna instalada | 16.0 GB | 8.0 GB |
| Sistema utilizado | Windows 7 profesional 64 bits | Windows 10 Pro-64 bits |

Tabla 30 Características de los equipos empleados [26]

En la siguiente tabla se muestran las características más relevantes de los dos procesadores utilizados:

| Equipo | 1 | 2 |
|------------------------------------|----------------------|---|
| Información básica | | |
| Número de procesador | Intel® Core™ i7-3770 | Intel® Core™ i5-4460 |
| Tipo de arquitectura | Ivy Bridge | Haswell |
| litografía | 22 nm | 22 nm |
| Cantidad de núcleos | 4 | 4 |
| Cantidad de subprocesos | 8 | 4 |
| Frecuencia básica del procesador | 3.40 GHz | 3.20 GHz |
| Caché | 8 Mb | 6 Mb |
| Velocidad del bus | 5 GT/s DMI | 5 GT/s DMI2 |
| TDP | 77 W | 84 W |
| Especificaciones de memoria | | |
| Tamaño máximo de la memoria | 32 GB | 32 GB |
| Tipos de memoria | DDR3 1333/1600 | DDR3-1333/1600, DDR3L-1333/1600 @ 1.5 V |

| | | |
|--|--|---|
| Cantidad máxima de canales de memoria | 2 | 2 |
| Máximo ancho de banda de memoria | 25,6 GB/s | 25,6 GB/s |
| Tecnologías avanzadas | | |
| Tecnología Intel® Turbo Boost | 2.0 | 2.0 |
| Tecnología Intel® vPro™ ‡ | Si | No |
| Tecnología Hyper-Threading Intel® ‡ | Si | No |
| Tecnología de virtualización Intel® (VT-x) ‡ | Si | Si |
| Tecnología de virtualización Intel® para E/S dirigida (VT-d) ‡ | Si | Si |
| Intel® VT-x con tablas de páginas extendidas (EPT) ‡ | Si | Si |
| Intel® Transactional Synchronization Extensions – New Instructions | No | No |
| Intel® 64 ‡ | Si | Si |
| Conjunto de instrucciones | 64-bits | 64-bits |
| Extensiones de conjunto de instrucciones | Intel® SSE4.1, Intel® SSE4.2, Intel® AVX | Intel® SSE4.1, Intel® SSE4.2, Intel® AVX2 |
| Tecnología Intel® My WiFi | No | Si |
| Estados de inactividad | Si | Si |
| Tecnología Intel SpeedStep® mejorada | Si | Si |
| Tecnologías de monitoreo térmico | Si | No |
| Tecnología Intel® Identity Protection ‡ | Si | Si |
| Programa Intel® de imagen estable para plataformas (SIPP) | No | Si |

Tabla 31 Características de los procesadores empleados [26]

Si analizamos los dos equipos detenidamente con los datos obtenidos anteriormente, observamos algunas diferencias significativas. Sin analizar detenidamente cada uno de los procesadores, podemos ver que el equipo 1 cuenta con un procesador cuya frecuencia de oscilación es un 5% superior a la del equipo 2, esta diferencia de oscilación no parece un valor significativo, pero a tiempo real reduce $2 \cdot 10^8$ el número de operaciones por segundo que realiza un equipo. Así mismo, la memoria RAM instalada en el equipo 1 es dos veces superior a la del equipo 2. Con esta primera información podemos determinar que la velocidad de procesamiento y capacidad de almacenamiento de instrucciones en el equipo 1 es superior a la del equipo 2.

Si profundizamos en las características de los dos procesadores empleados, encontramos que trabajan con dos tipos de arquitectura diferente: la arquitectura Ivy Bridge sucede a la arquitectura Sandy bridge y está caracterizada como una arquitectura de tercera generación, mientras que la arquitectura Haswell sucede a la del procesador del equipo 1 y está caracterizada como una arquitectura de cuarta generación. Ambas arquitecturas están fabricadas mediante litografía de 22 nm. Si nos centramos en el número de núcleos que contienen ambas placas, no encontramos ninguna diferencia, ya que las dos placas están fabricadas con 4 núcleos. En cambio, el procesador del equipo 1 podría realizar 8 subprocesos mientras que el del equipo 2 solo puede realizar 4 subprocesos, es decir, solo podría hacer una única tarea por núcleo. Esta característica se debe a la tecnología Hyper-Threading, que está incluida únicamente en el procesador del equipo 1, esta nos permite duplicar el número de subprocesos realizados por el núcleo. El caché permite al procesador acceder a un área de memoria rápida y compartir esta memoria entre todos los núcleos, en el procesador del equipo 1 el tamaño de esta memoria es de 8 Mb mientras que la del segundo procesador es 2 Mb inferior. Otro elemento importante es la velocidad del bus, para los dos procesadores las velocidades son las mismas, salvo que la conexión entre la placa base y el resto de elementos se realiza por DMI (5 Gb/s) en el procesador del equipo 1 y por DMI2 (20 Gb/s) en el procesador del equipo 2. Para finalizar vemos que la potencia consumida por el procesador 2 es superior a la del procesador 1, debido a que este último incorpora menos elementos de alta tecnología que el procesador de cuarta generación.

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

5. Análisis de los resultados

En este apartado analizaremos el conjunto de datos obtenidos para las distintas simulaciones. Estará dividido en cuatro apartados, donde analizaremos en primer lugar los tiempos de simulación realizados y en los puntos siguientes analizaremos la porosidad del material frente a la distancia, la concentración de cloruros ligados frente a la distancia y los cloruros libres frente a la distancia.

5.1. Tiempos de simulación

Los tiempos de simulación en horas para cada modelo y equipo vienen dados en la siguiente tabla:

| Modelo | Tiempos simulados (días) | Tiempo de simulación (horas) | |
|----------|--------------------------|------------------------------|----------|
| | | Equipo 1 | Equipo 2 |
| Modelo 1 | 100 | 2,6667 | - |
| | 200 | 7,4833 | - |
| | 300 | 21,2000 | - |
| | 400 | 40,8000 | - |
| Modelo 2 | 100 | 3,0000 | 4,0000 |
| | 200 | 7,7667 | 10,1167 |
| | 300 | 21,6000 | - |
| | 400 | 43,6500 | - |
| | 500 | 68,1000 | - |
| Modelo 3 | 100 | 2,9667 | 4,2833 |
| | 200 | 7,8500 | 10,5000 |
| | 300 | 22,2833 | - |
| | 400 | 41,5000 | - |
| | 500 | 63,5333 | - |

| | | | |
|----------|-----|---------|---|
| Modelo 4 | 100 | 3,0833 | - |
| | 200 | 8,5167 | - |
| | 300 | 22,8833 | - |
| | 400 | 43,7500 | - |

Tabla 32 Tiempos de simulaciones de los equipos

Inicialmente se realizó la toma de datos de los 4 primeros tiempos de simulación del equipo 1, obteniendo con ello las siguientes graficas donde se ve representado el tiempo de simulación (en horas) frente a los días simulados de los 4 distintos modelos:

Modelo 1

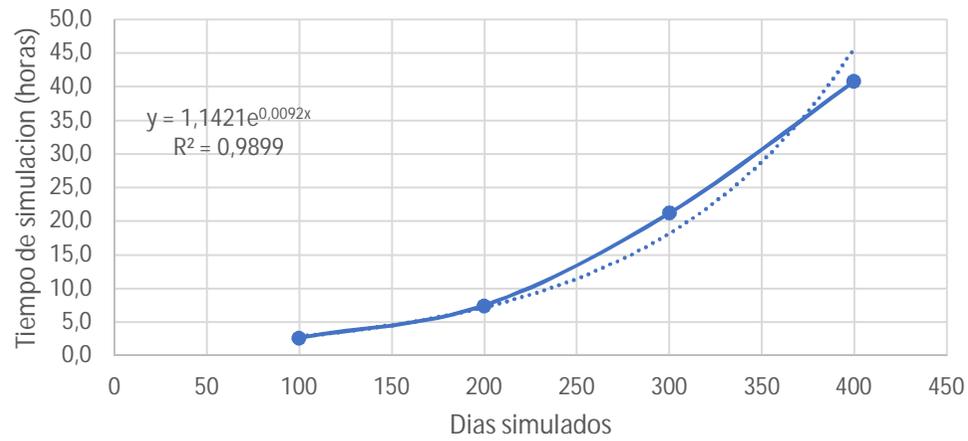


Figura 28 Tiempo de simulación para el modelo 1 del equipo 1

Modelo 2

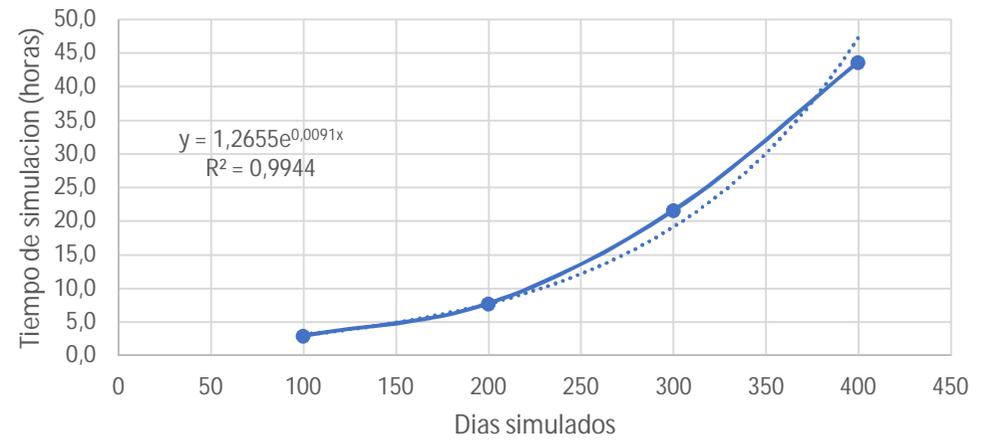


Figura 27 Tiempo de simulación para el modelo 2 del equipo 1

Modelo 3

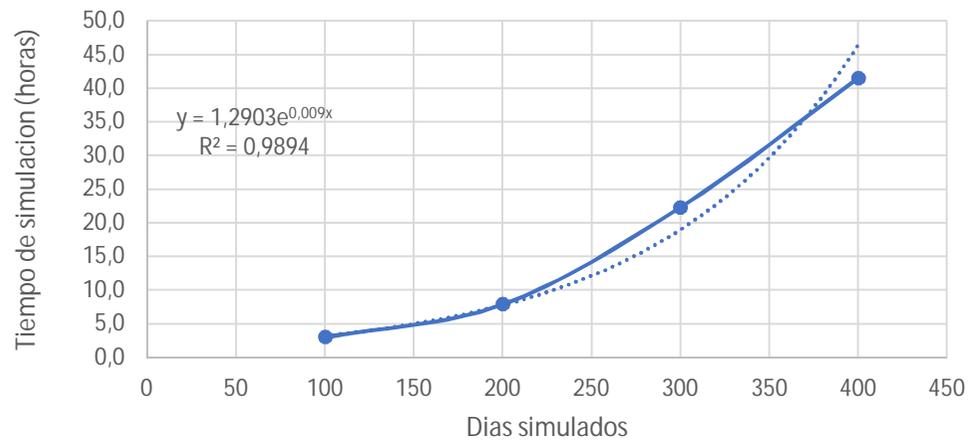


Figura 25 Tiempo de simulación para el modelo 3 del equipo 1

Modelo 4

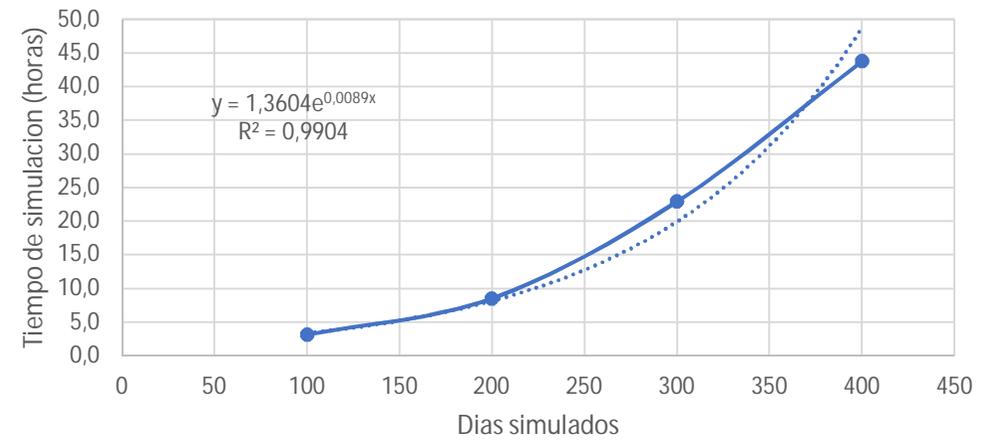


Figura 26 Tiempo de simulación para el modelo 4 del equipo 1

En las cuatro gráficas, se puede observar que los tres modelos pueden ajustarse perfectamente a una respuesta exponencial, ya que el coeficiente de correlación (R^2) es superior a 0.98 en el caso más desfavorable. Posteriormente se procedió a comprobar cual era el error cometido por la aproximación de la respuesta exponencial para 500 días simulados de dos de los modelos más influyentes (modelo 2 y 3).

Para el modelo 2 la ecuación de aproximación es $y = 1.2655 \cdot e^{0.0091 \cdot x}$, si despejamos en "x" el valor de los 500 días simulados, obtenemos que el tiempo de simulación "y" sería de: 119.757 horas.

Para el modelo 3 la ecuación de aproximación es $y = 1.2903 \cdot e^{0.009 \cdot x}$, del mismo modo que en el modelo anterior, si sustituimos "x" por 500 días simulados obtenemos un tiempo de simulación de $y = 116.149$ horas

Si lo comparamos con los tiempos de simulación reales obtenidos para dichos modelos, vemos que sus valores difieren en el doble:

- Modelo 2:
 - Valor calculado → 119.757 horas
 - Valor real medido → 68.1 horas
 - Error relativo calculado → $E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 75.86\ %$
- Modelo 3:
 - Valor calculado → 116.149 horas
 - Valor real medido → 63.533 horas
 - Error relativo calculado → $E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 82.82\ %$

Saliendo un error relativo para ambos modelos muy alto. Si introducimos el nuevo valor real medido, obtenemos las siguientes gráficas:

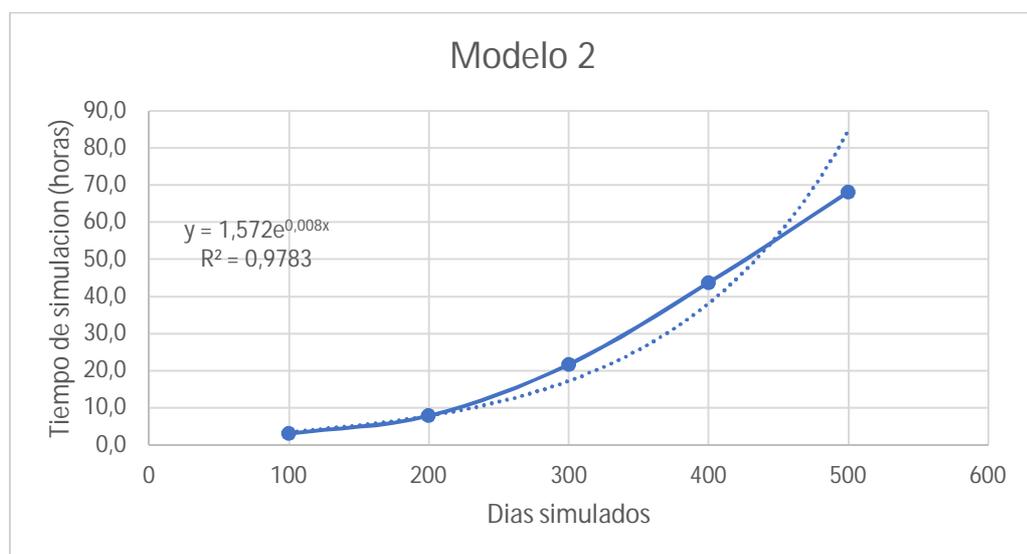


Figura 29 Tiempo de simulación para el modelo 2 del equipo 1

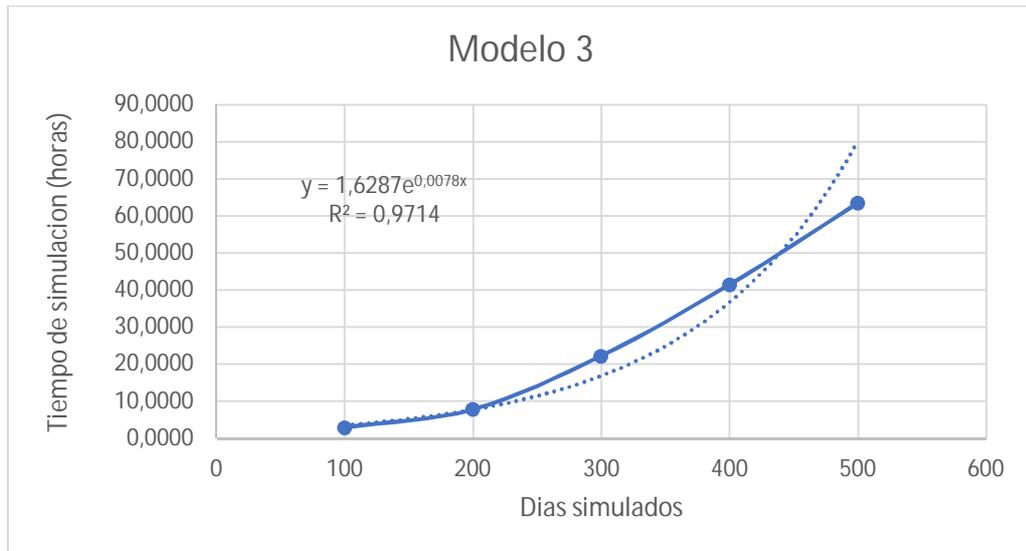


Figura 30 Tiempo de simulación para el modelo 3 del equipo 1

Donde vemos que el coeficiente de correlación (R^2) ha disminuido en ambos modelos por debajo de 0.98. Si calculamos el error cometido con los valores de las dos nuevas ecuaciones de los modelos, obtenemos:

- Modelo 2:
 - Ecuación $\rightarrow y = 1.572 \cdot e^{0.008 \cdot x}$
 - Valor calculado $\rightarrow 85.83$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 68.1$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 26.04 \%$

- Modelo 3:
 - Ecuación $\rightarrow y = 1.6287 \cdot e^{0.0078 \cdot x}$
 - Valor calculado $\rightarrow 80.462$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 63.533$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 26.65 \%$

Observamos que los errores cometidos para el cálculo del tiempo de simulación son elevados, por lo que comprobamos si la respuesta exponencial es la adecuada calculando estos tiempos de simulación para una respuesta diferente de los modelos. Obteniendo para las cuatro primeras simulaciones de ambos modelos las siguientes gráficas con una respuesta potencial:

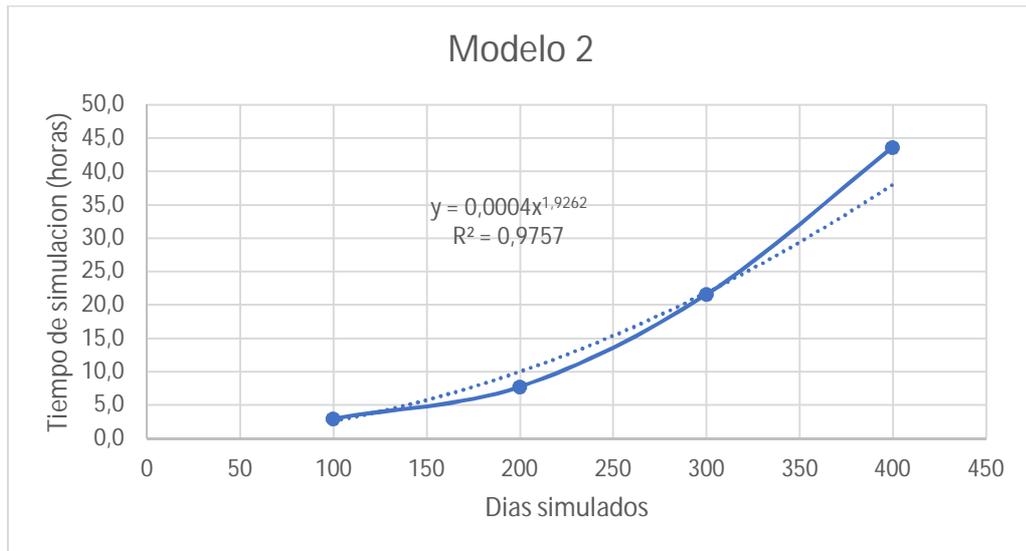


Figura 31 Tiempo de simulación para el modelo 2 del equipo 1

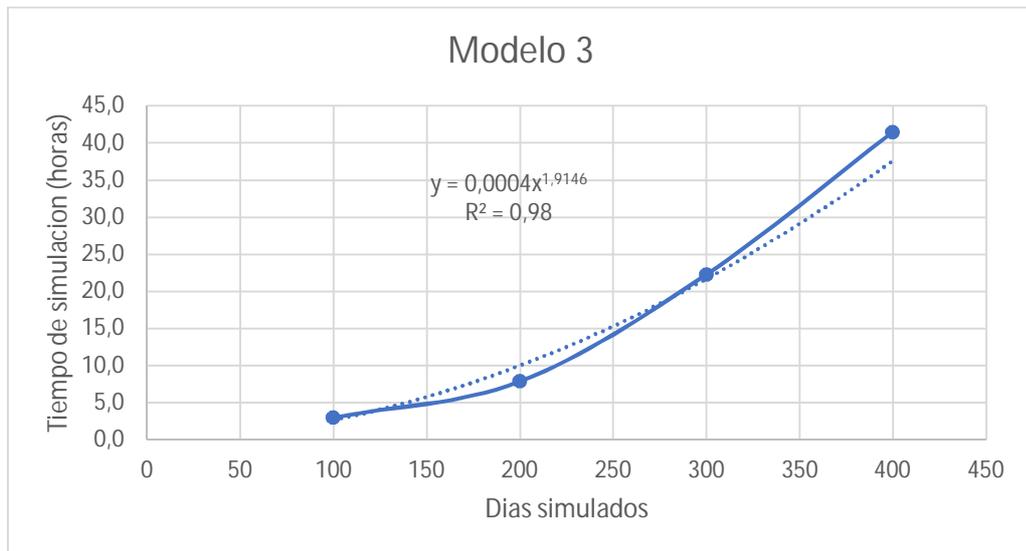


Figura 32 Tiempo de simulación para el modelo 3 del equipo 1

Para este caso, obtenemos los siguientes valores:

- Modelo 2:
 - Ecuación $\rightarrow y = 0.0004 \cdot x^{1.9262}$
 - Valor calculado $\rightarrow 63.214$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 68.1$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 7.175 \%$

- Modelo 3:
 - Ecuación $\rightarrow y = 0.0004 \cdot x^{1.9146}$
 - Valor calculado $\rightarrow 58.818$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 63.533$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 7.421\%$

A continuación, determinamos el valor de la respuesta potencial para las cinco primeras simulaciones realizadas a los dos modelos diferentes:



Figura 33 Tiempo de simulación para el modelo 2 del equipo 1

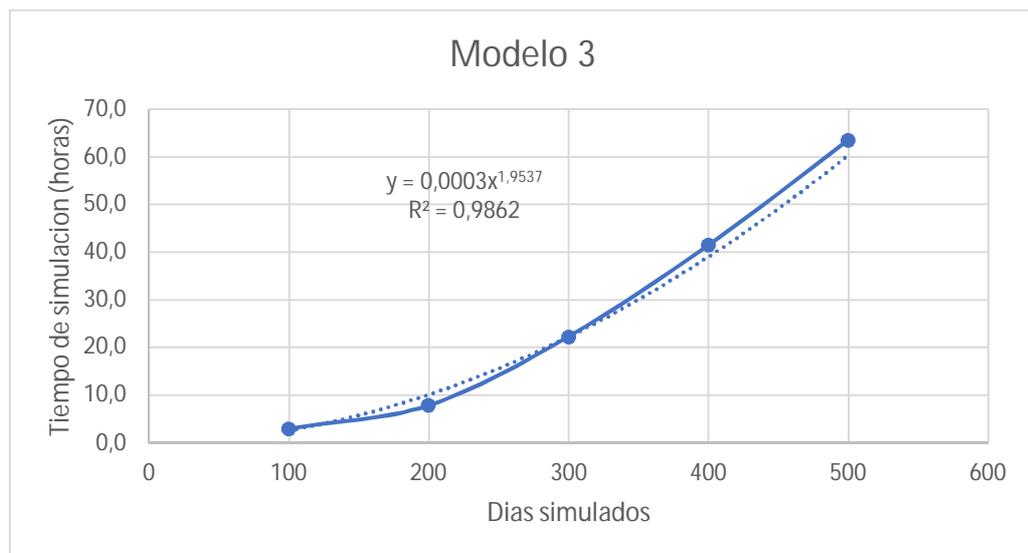


Figura 34 Tiempo de simulación para el modelo 3 del equipo 1

Los valores obtenidos en este caso son:

- Modelo 2:
 - Ecuación $\rightarrow y = 0.0003 \cdot x^{1.9875}$
 - Valor calculado $\rightarrow 69.394$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 68.1$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 1.9\%$
- Modelo 3:
 - Ecuación $\rightarrow y = 0.0003 \cdot x^{1.9537}$
 - Valor calculado $\rightarrow 56.247$ horas
 - Valor real medido $\rightarrow 63.533$ horas
 - Error relativo calculado $\rightarrow E = \frac{|valor\ real - valor\ aprox. |}{valor\ real} \cdot 100 = 11.47\%$

Con esta información, concluimos que la respuesta que mejor se aproxima a los modelos no es una respuesta exponencial, sino una respuesta potencial. Aunque para los cuatro primeros valores se obtenga una correlación inferior a 0.98 (inferior a la obtenida para la respuesta exponencial con el mismo número de datos), esta se mantiene con la siguiente simulación añadida, obteniéndose errores inferiores al 10% en el modelo 2 e inferiores al 12 % en el modelo 3.

Si comparamos la tendencia de los tiempos de simulación de los cuatro modelos obtenemos la siguiente gráfica:

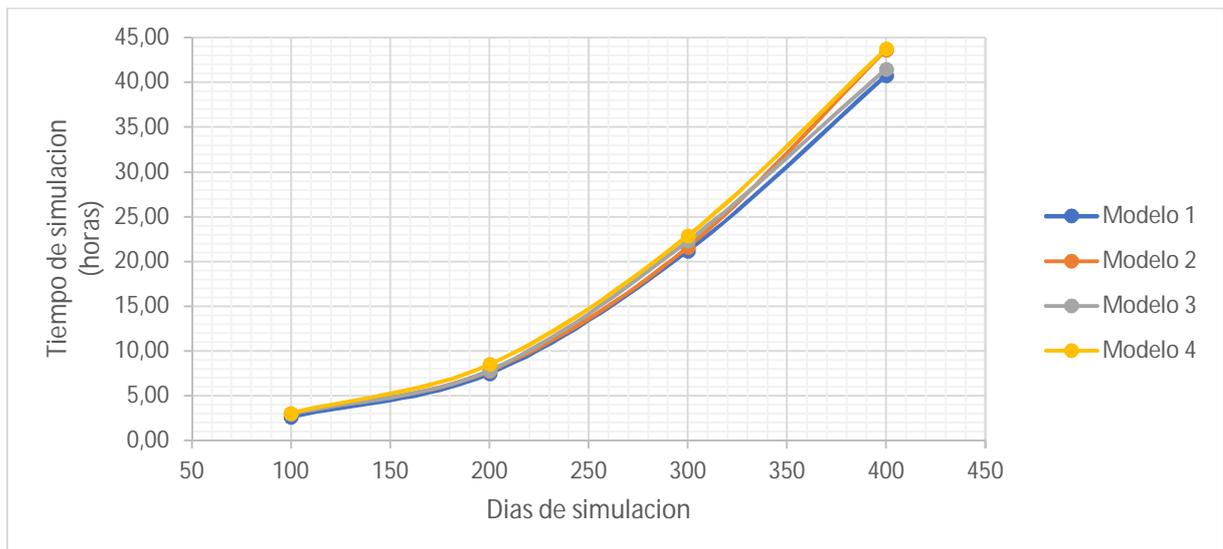


Figura 35 Tiempo de simulación para los cuatro modelos empleados

Si analizamos por tramos dicha gráfica podemos obtener:

- En el tramo de 100 a 200 días vemos que el modelo 4 es el que más tiempo tarda en resolver la simulación debido a su alto contenido de variables empleadas para su resolución. El resto de modelos tienen un tiempo de simulación inferior debido a que emplean un menor número de variables. Se puede observar que los modelos 2 y 3 siguen un tiempo de simulación muy similar.

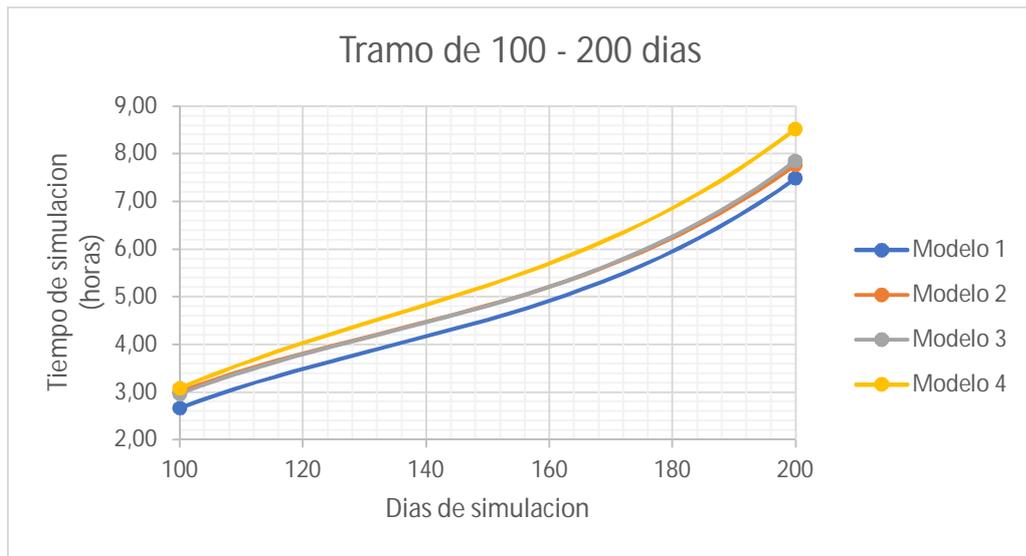


Figura 36 Tiempo de simulación para los cuatro modelos (tramo de 100 a 200 días)

- En el tramo de 200 a 300 días se puede destacar que los modelos 1 y 2 tienden a tener un tiempo de simulación prácticamente iguales mientras que los modelos 3 y 4 tienden a tener un tiempo de simulación muy similar.

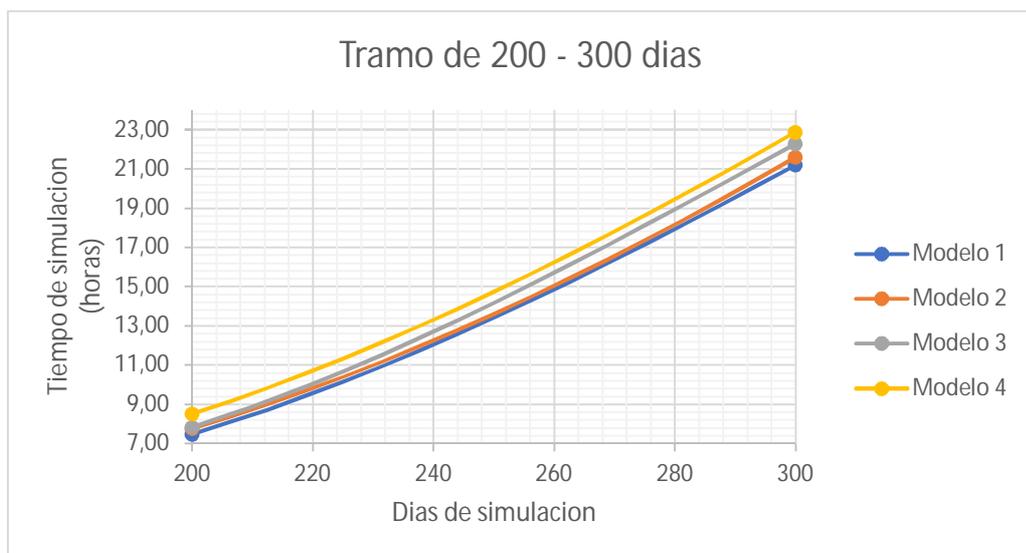


Figura 37 Tiempo de simulación para los cuatro modelos (Tramo de 200 a 300 días)

- En el tramo de 300 a 400 días observamos que el modelo 2 cambia su línea de tendencia, cruzándose por encima del modelo 3 y acercando sus tiempos de simulación a los del modelo 4. Esta peculiaridad puede deberse a un problema de saturación en el equipo 1 a la hora de realizar la simulación de 400 días para el modelo 2.

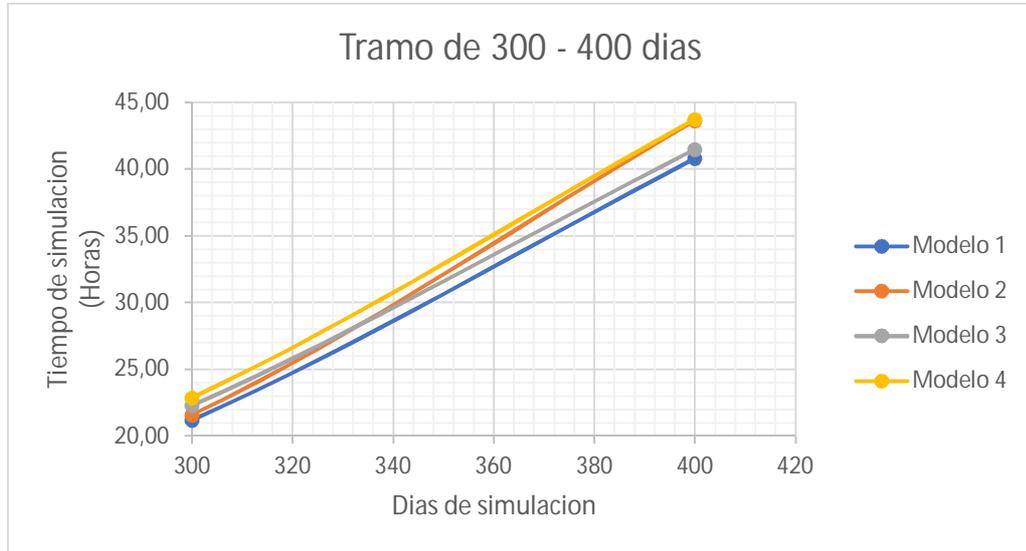


Figura 38 Tiempo de simulación para los cuatro modelos (Tramo de 300 a 400 días)

Para finalizar, se analizó la variación del tiempo de simulación en dos equipos con características técnicas diferentes de dos de los modelos más significativos (modelo 2 y 3). Las gráficas obtenidas para ambos modelos son:



Figura 39 Comparación de los tiempos de simulación de los dos equipos para el modelo 2



Figura 40 Comparación de los tiempos de simulación de los dos equipos para el modelo 3

Lo primero que observamos es que las gráficas solo están realizadas para las 2 primeras simulaciones (100 y 200 días), esto es debido a que, durante el proceso de realización de las simulaciones de 300 y 400 días para ambos modelos, el equipo 2 no disponía de la memoria RAM suficiente como para ejecutar las simulaciones, mostrándonos por pantalla el siguiente error:

```
Error using horzcat
Out of memory. Type HELP MEMORY for your options.

Error in HormigonSaturado64frac (line 834)
TIME1=[TIME1 timex];
```

Figura 41 Mensaje de error obtenido en equipo 2

También se puede ver una clara diferencia en los tiempos de simulación requeridos por ambos modelos para los dos equipos empleados. Si lo analizamos detenidamente, los tiempos de simulación del equipo 2 son un 25 % superiores a los del equipo 1. Esto se debe a que el equipo 1 cuenta con unas características técnicas superiores a las del equipo 2 a pesar de disponer este último de una tecnología más avanzada (procesador de 4º generación).

5.2. Porosidad del hormigón / distancia

En este punto analizaremos el avance de la porosidad en el hormigón con respecto a la distancia. Para el modelo 1 se ha obtenido la siguiente curva:

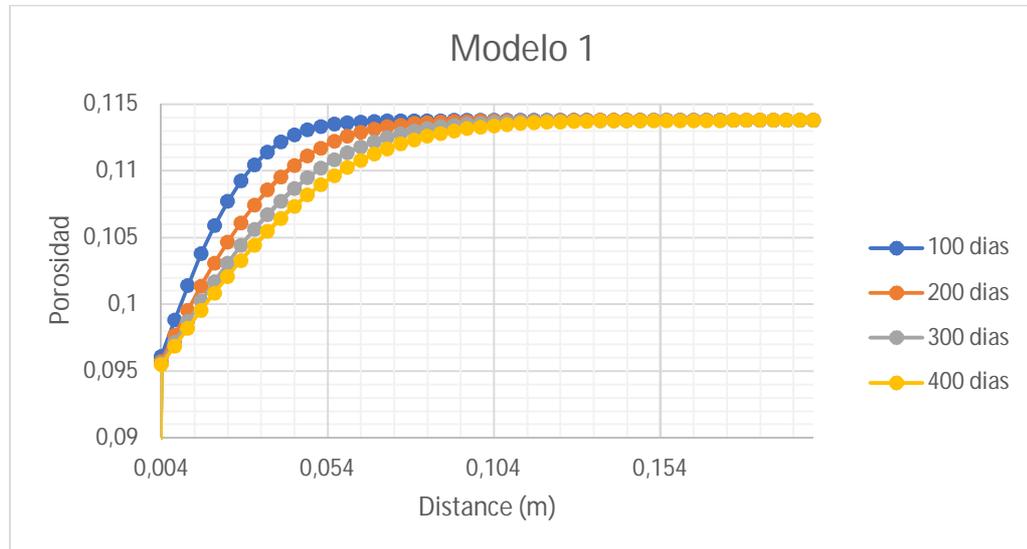


Figura 42 Relación porosidad frente a distancia para modelo 1

Si analizamos la gráfica anterior, vemos que este modelo sigue una tendencia lineal a lo largo de sus tiempos de simulación, acentuándose cada vez más cuando mayor es el tiempo simulado (400 días). Para analizar la gráfica, vemos que a una distancia de 0,2 m (distancia máxima del volumen de control) la concentración de poros es la inicial (11,38%). Cuando estamos en una distancia de 0 m, la superficie del muro se encuentra sumergida en agua de mar que está completamente saturada de iones cloruro y por tanto su concentración de poros en la superficie es mínima (9,5%). Si analizamos una distancia concreta del muro (0,044 m), vemos que la concentración de poros va disminuyendo desde un 11,27 % para 100 días hasta un 10,74 % para 400 días. Esto se debe a que una estructura de hormigón sometida a un ambiente marino saturado de ion cloruro durante un periodo prolongado de tiempo, va reduciendo el diámetro de los poros por acumulación de cloruros, por lo que el número de poros presentes en el hormigón se va reduciendo con el paso de los días.

Esta reducción de poros se verá más acentuada cuanto más cerca de la superficie nos encontremos ya que a mayor profundidad del hormigón los iones cloruro tendrán un mayor impedimento para avanzar.

De la gráfica podemos observar que para una distancia de 0,12 m la concentración de poros se estabiliza, no habiendo una gran acumulación de iones cloruro a partir de esta distancia.

A partir de los datos registrados con la simulación del modelo 2 se ha obtenido la siguiente gráfica:

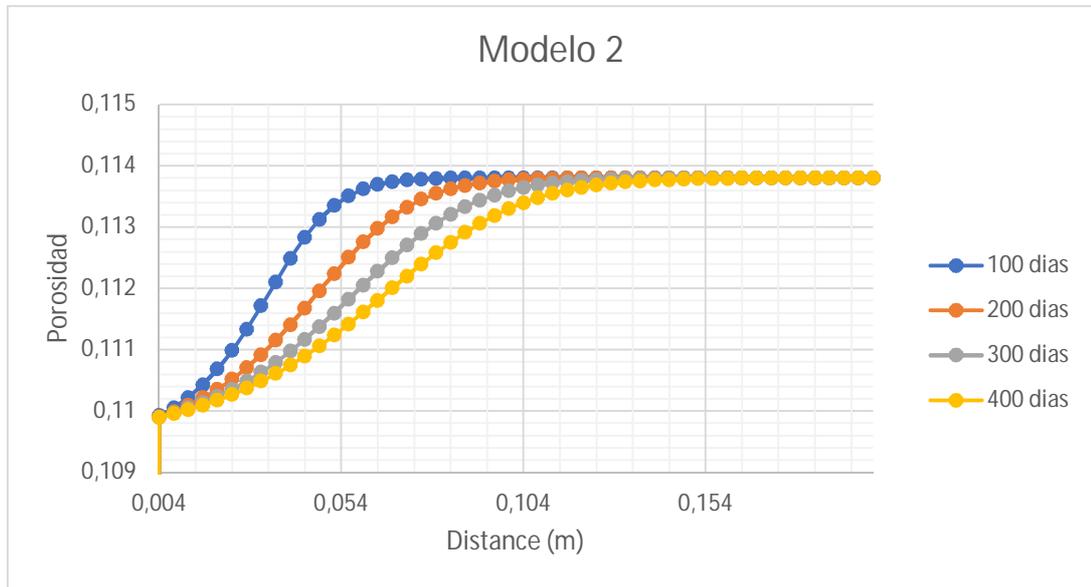


Figura 43 Relación porosidad frente a distancia para modelo 2

Esta curva tiene el mismo comportamiento que la del modelo 1, la única característica es que este modelo no sigue una tendencia lineal, por lo que su respuesta se acerca más al modelo real. Analizando la gráfica, vemos que para el mismo punto obtenido en el modelo 1, las diferencias entre ambos modelos son grandes. Por tanto, la porosidad del material del punto 0.044 m para 100 días es del 11.28% mientras que para 400 días es del 11.09%. En este modelo, la concentración de poros se estabiliza a una distancia de la superficie de 0.148 m.

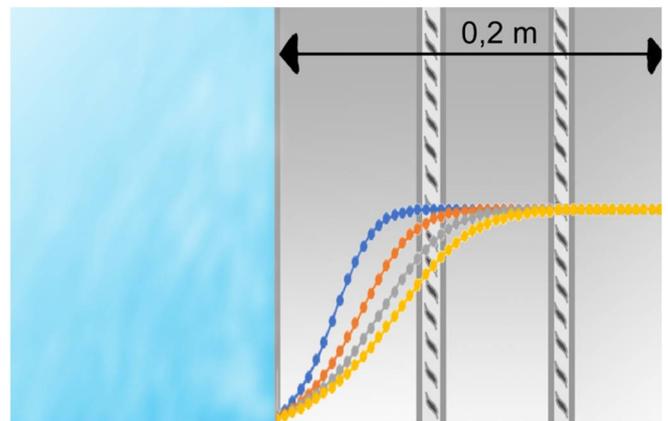


Figura 44 Representación esquemática del modelo simulado con la realidad

En la figura (44) se ha representado un muro de hormigón de las dimensiones indicadas por las condiciones de contorno y la gráfica obtenida para este modelo. En ella se puede ver con claridad que la concentración de poros en la superficie del hormigón es mínima, mientras que cuando más profundizamos en la estructura, esta concentración crece hasta alcanzar la porosidad inicial establecida en las condiciones iniciales. Así mismo, podemos observar que si las armaduras estuvieran colocadas en las posiciones

representadas en la figura, para 100 días de exposición ambas barras de acero no se verían perjudicadas aparentemente por este problema de porosidad, mientras que para una duración de 400 días, la concentración de cloruros, en la posición de la armadura más cercana a la superficie expuesta, tendría valores elevados y por consiguiente los poros comienzan a cerrarse y disminuye la concentración de estos.

Con la simulación del modelo 3 se ha obtenido la siguiente gráfica:

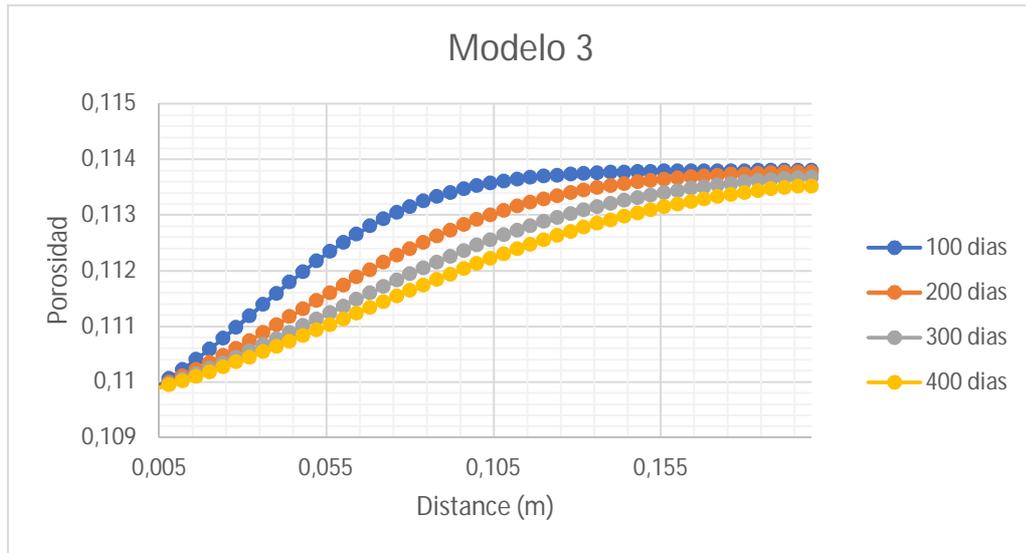


Figura 45 Relación porosidad frente a distancia para modelo 3

El comportamiento de este modelo es similar al del modelo 1. Con la peculiaridad de que la distancia analizada para este modelo no es suficiente para estabilizar la concentración de poros, es decir, la concentración de poros se estabilizará para una mayor profundidad del material. Para 100 días la concentración de poros se estabiliza a una distancia de 0.14 m, mientras que para un tiempo de simulación de 400 días, los iones cloruro penetran hasta la profundidad final de la estructura de hormigón haciendo que la concentración de poros disminuya por debajo de su valor inicial. Si vemos la concentración de poros a una distancia de 0.044 m de profundidad, observamos que para 100 días tiene una porosidad del 11.18% mientras que para ese mismo punto a 400 días la concentración de poros es del 11.07 %.

Para los datos del modelo 4 se ha obtenido la siguiente gráfica:

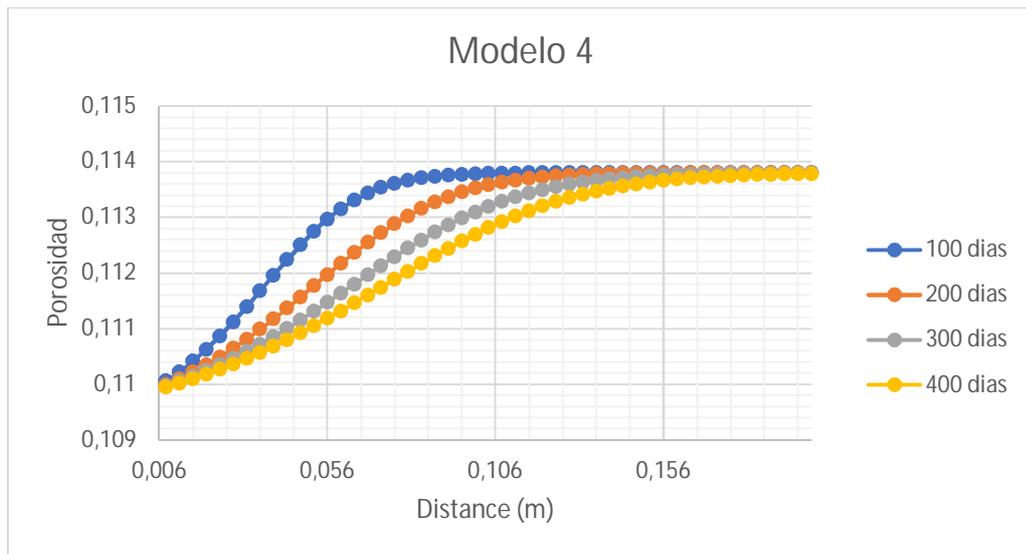


Figura 46 Relación porosidad frente a distancia para modelo 4

Este modelo tiene un comportamiento similar al del modelo 2. Si analizamos la gráfica en profundidad, observamos que la concentración de poros se estabiliza para una profundidad en el hormigón de 0.164 m. Así mismo, la concentración de poros para una profundidad de penetración de 0.044 m en el hormigón para 100 días es del 11.22 % mientras que en ese mismo punto para una simulación de 400 días, la concentración de poros en el hormigón es del 11.07 %. Vemos que son valores muy similares a los obtenidos para el modelo 2.

A continuación, se ha representado para una simulación de 400 días, ya que para el resto de los días simulados: 100, 200 y 300 días la gráfica comparativa es prácticamente la misma, una comparativa de la porosidad frente a la distancia de penetración en el hormigón de cada uno de los modelos estudiados:

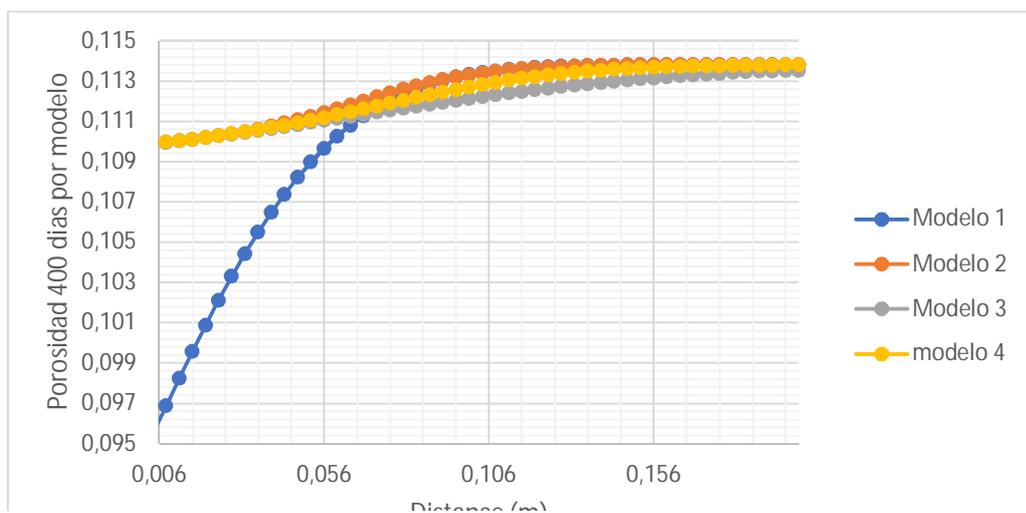


Figura 47 Relación porosidad frente a distancia para los modelos estudiados

En esta gráfica podemos ver con mayor claridad que el modelo 1 sigue una tendencia lineal de los datos, mientras que el resto de los modelos sigue una tendencia no lineal, más acorde con la realidad. Con esto podemos afirmar, que el modelo 1 no funciona correctamente debido a la linealidad de sus datos mientras que los modelos 2 y 3 se adaptan mejor a una simulación real y son más funcionales, debido a las pocas variables empleadas en estos modelos.

5.3. Concentración de cloruros ligados / distancia

Como se vio en los fundamentos teóricos, los cloros ligados no representan una amenaza muy significativa para el deterioro del hormigón armado por corrosión, ya que estos cloros se encuentran enlazados a otros elementos dentro de la estructura de hormigón. Aunque en circunstancias como la corrosión por carbonatación, los cloruros ligados pueden desprenderse y quedar libres.

En la siguiente gráfica se muestra la concentración de cloruros ligados frente a la profundidad de penetración del hormigón para el modelo 1:

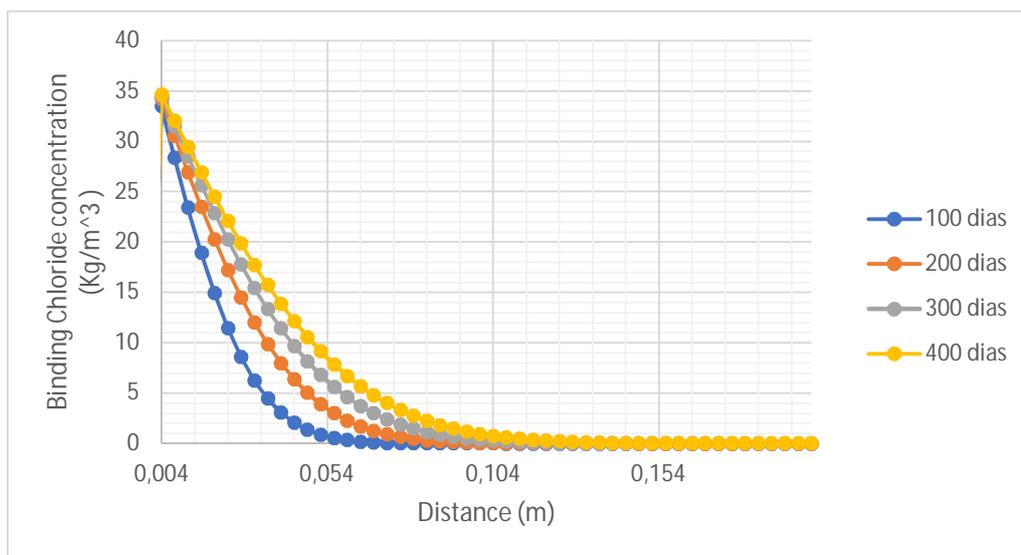


Figura 48 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 1

Si analizamos la gráfica de este modelo, vemos que inicialmente partimos de 35 Kg/m³ de concentración de cloruros ligados, este valor tan grande en la concentración de cloros ligados se debe a que el modelo 1 no se comporta bien para simulaciones de valores muy elevados. Según profundizamos en el hormigón, la concentración de estos cloruros se ve disminuida, debido a que las capas superficiales del hormigón comienzan a cerrar los poros y por tanto impiden el paso de los cloruros. Si analizamos una distancia de penetración (0,044 m) observamos que la concentración de cloruros ligados para 100 días es de 2,067 Kg/m³ mientras que, a esa misma distancia y una simulación de 400 días, la concentración de cloruros ligados es de 12,15 Kg/m³. Este crecimiento en la concentración de cloruros ligados es debido a que una exposición prolongada de una

estructura de hormigón en un ambiente marino, supone la acumulación de iones cloruro en ese punto a lo largo del tiempo de simulación. Por tanto, la concentración de cloruros ligados en un punto ira aumentando según se vaya incrementando el número de días simulados. En este modelo, para una profundidad en el material de 0.124 m, la concentración de cloruros ligados permanecerá constante y nula a lo largo del tiempo.

En la siguiente grafica aparecen representados los datos obtenidos para la concentración de cloruros ligados del modelo 2:

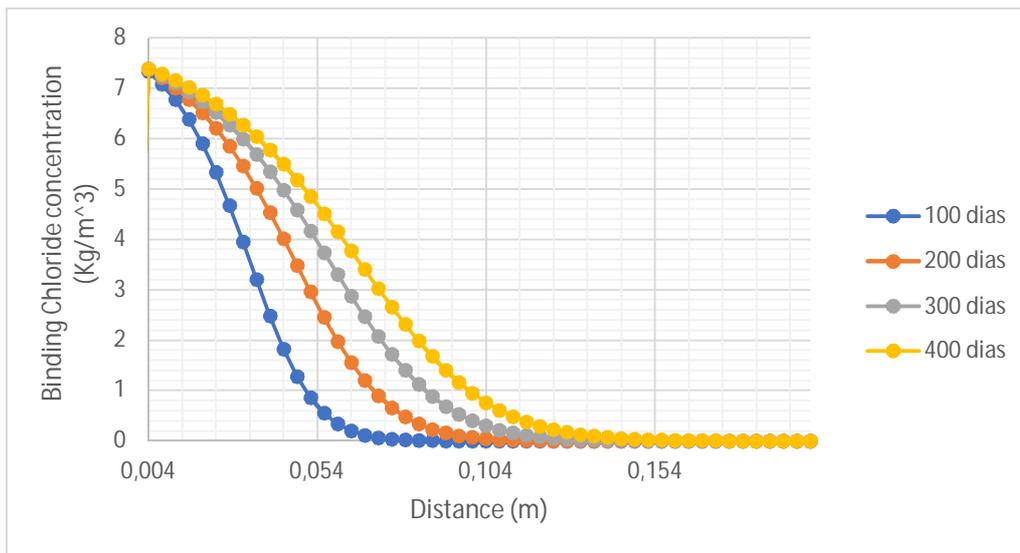


Figura 49 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 2

A diferencia del modelo anterior, para este partimos de una concentración de cloruro ligado de 7.39 Kg/m³ que va disminuyendo según profundizamos en el material. Esta concentración es muy inferior a la obtenida en el modelo anterior, debido a que el modelo 2 tiene un mejor comportamiento para grandes valores de simulación. Si analizamos la concentración de cloruro ligado para una profundidad en el hormigón de 0.044 m, obtenemos que su valor es de 1.828 Kg/m³ para 100 días mientras que para 400 días su valor es de 5.492 Kg/m³. Esto es debido a que con el paso del tiempo, los cloruros procedentes del ambiente agresivo van penetrando y acumulándose en el hormigón. Por lo que cuanto mayor sea el tiempo de exposición de la estructura al medio agresivo, mayor será la concentración de cloruro ligado en un punto. Para este modelo, la concentración de cloruro ligado se mantiene constante y nula a lo largo del tiempo, para una profundidad de 0.144 m.

A continuación, se presenta la gráfica donde se representa los datos obtenidos en la simulación del modelo 3:

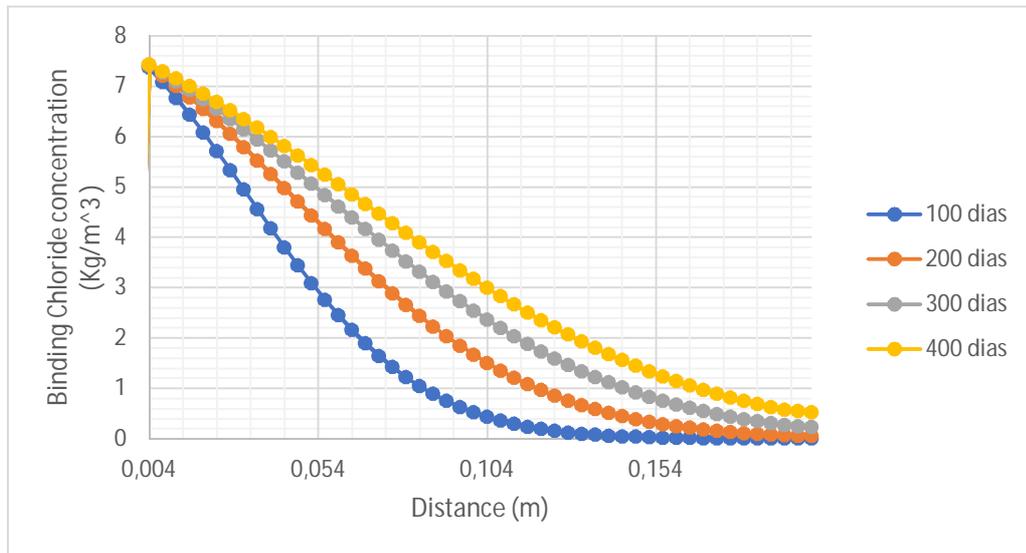


Figura 50 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 3

Analizando la gráfica de este modelo, vemos que parte de la misma concentración de cloruro ligado inicialmente que el modelo anterior (7.39 Kg/m^3), a partir de esa concentración, esta va disminuyendo con la distancia de penetración. En este modelo la concentración de cloruro ligado para 300 y 400 días no alcanza un valor nulo antes de alcanzar la profundidad total de la estructura, por lo que suponemos que este valor se alcanzara para una estructura cuyas dimensiones sean superiores a la del modelo estudiado. Si estudiamos la concentración de cloruro ligado a la distancia de 0.044 m obtenemos que esta tiene un valor de 3.802 Kg/m^3 para 100 días, mientras que para 400 días su valor es de 5.809 Kg/m^3 . El motivo de este crecimiento en la concentración con el aumento de los días simulados es el mismo que el argumentado para el modelo 2.

Los datos obtenidos en la simulación del modelo 4 vienen representados en la siguiente gráfica:

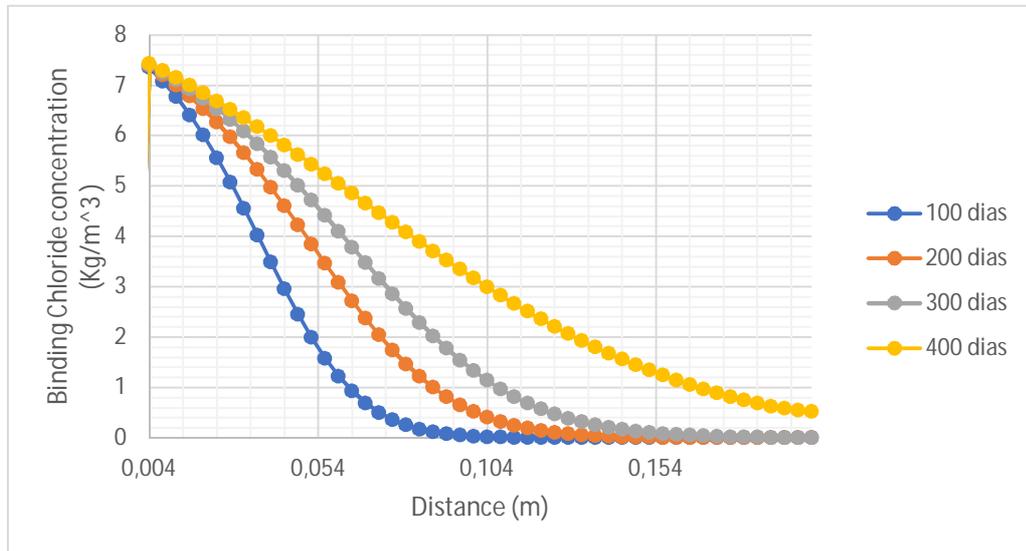


Figura 51 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 4

Al igual que en los dos modelos anteriores, partimos de una concentración en la superficie de la estructura de 7.39 Kg/m^3 . Según vamos profundizando en el hormigón, esta concentración va disminuyendo hasta alcanzar un valor nulo, exceptuando la simulación de 400 días que alcanza una concentración de 0.526 Kg/m^3 al finalizar la profundidad de la estructura. Si analizamos la concentración para una profundidad en el hormigón de 0.044 m , obtenemos que esta vale 2.954 Kg/m^3 para 100 días, mientras que para 400 días esta concentración vale 5.809 Kg/m^3 . Como se ha comentado para los modelos anteriores, este crecimiento en la concentración de cloruros ligados se debe a la exposición prolongada de la estructura de hormigón en un ambiente marino saturado de cloro y la continua penetración de estos iones.

En la siguiente gráfica comparativa se ha representado para una simulación de 400 días, ya que para el resto de los días simulados: 100, 200 y 300 días la gráfica es prácticamente la misma, de la concentración de cloruro ligado frente a la distancia de penetración en el hormigón para cada uno de los modelos estudiados:

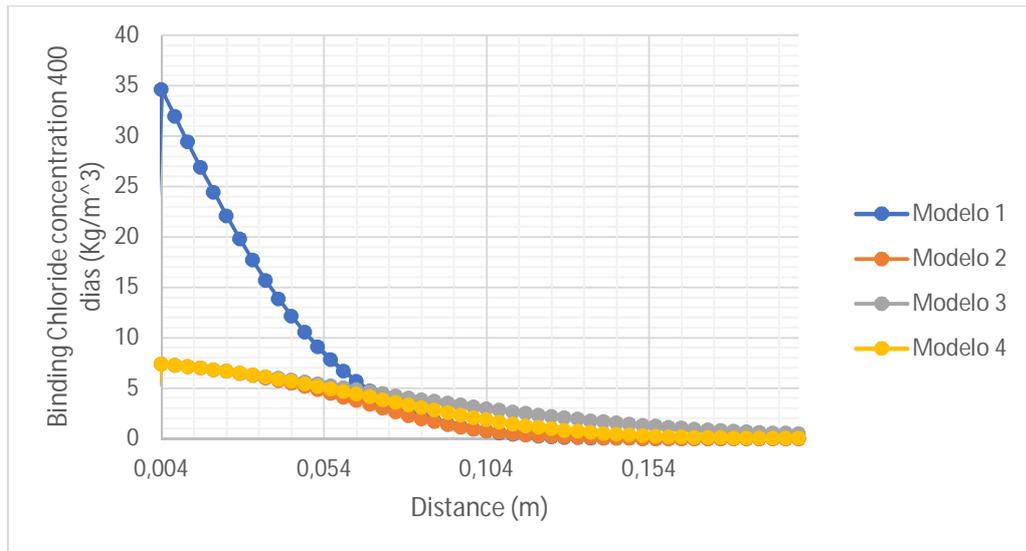


Figura 52 Relación cloruros ligados frente a distancia para los modelos estudiados

Si analizamos la gráfica presentada, observamos como la concentración inicial de cloruro ligado para el modelo 1 tiene un valor de 35 Kg/m³, lo que es un valor muy distinto de los 7.289 Kg/m³ de concentración de este ion para el resto de los modelos. También podemos ver que el modelo 1 sigue una tendencia distinta a la presentada por el resto de modelos, lo que nos indica que este modelo lineal no es válido ya que falla. Los modelos 2, 3 y 4 tienen una tendencia muy similar y próxima al comportamiento real de la estructura, por tanto, los modelos con los que se puede trabajar con mayor precisión es con los modelos 2 y 3, debido a la sencillez de sus ecuaciones.

5.4. Concentración de cloruros libres / distancia

Al contrario de lo que sucedía con los cloruros ligados, la concentración de cloruros libres en el hormigón es un tema importante a tratar, puesto que son los principales responsables de que se produzca la corrosión por iones cloruro en las armaduras de acero por picadura. Estos cloruros al no estar ligados con otros elementos pueden desplazarse libremente por la estructura de hormigón, alcanzando la armadura e iniciar o continuar la corrosión del acero.

A continuación se muestran los datos obtenidos de la simulación del modelo 1:

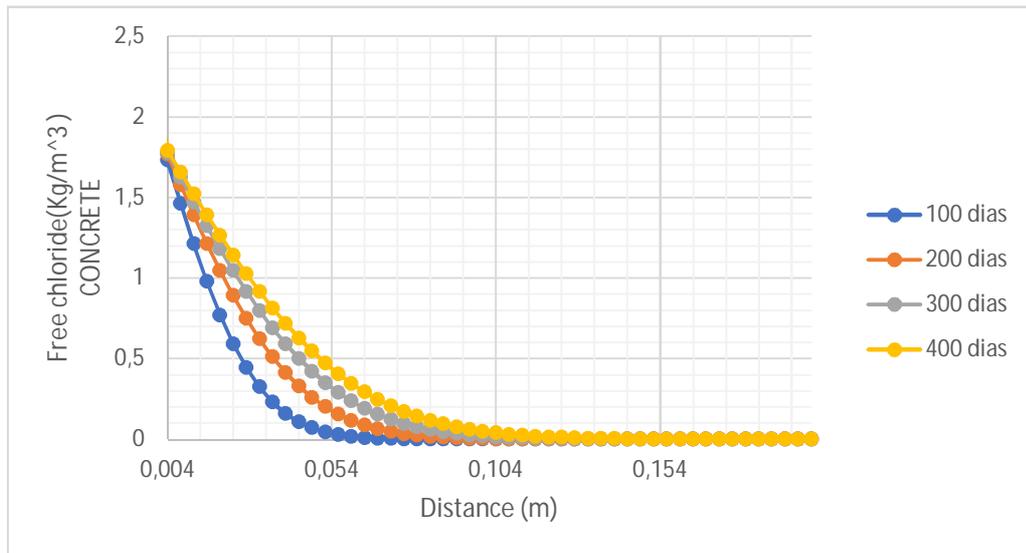


Figura 53 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 1

Analizando la gráfica, observamos que se parte de una concentración inicial de 1.789 Kg/m³ de cloruro libre. Esta concentración disminuye según profundizamos en la estructura de hormigón hasta alcanzar un valor nulo, alcanzando esta concentración a una distancia de 0.124 m. Esto nos indica, para este modelo, que a partir de este punto los iones cloruro no alcanzan en grandes cantidades esta profundidad, por lo que la concentración de cloruros libres es nula o prácticamente nula. Si analizamos la concentración de un punto de la estructura (0.044 m) obtenemos que su valor para 100 días es de 0.1068 Kg/m³ mientras que para 400 días su valor es de 0.628 Kg/m³. Al igual que sucedía con el cloruro ligado, la concentración de cloruro libre crece en un punto según aumente el tiempo de exposición de la estructura de hormigón al ambiente marino. Para este modelo. el crecimiento de esta concentración con el paso del tiempo se mantiene constante una vez alcanzada una profundidad de 0.124 m.

En la siguiente figura se muestran representados los datos obtenidos para la simulación del modelo 2:

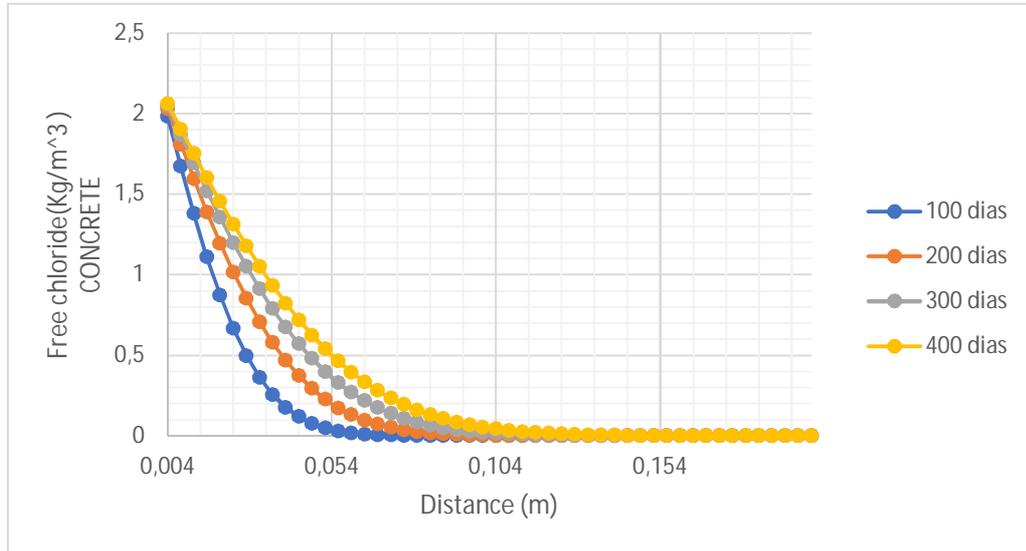


Figura 54 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 2

En este modelo partimos de una concentración inicial de cloruro libre en la superficie de la estructura de hormigón armado de 2 Kg/m^3 . Al igual que sucedía en el modelo anterior, esta concentración disminuye con la distancia de penetración en el hormigón. Esto se debe a que los cloros libres encuentran una mayor resistencia al paso según van profundizando en la estructura. Si analizamos la concentración de cloruro libre a una profundidad de la estructura, obtenemos que para $0,044 \text{ m}$ esta concentración vale $0,1183 \text{ Kg/m}^3$ para 100 días, mientras que para 400 días este valor es de $0,7189 \text{ Kg/m}^3$. Este incremento en la concentración de cloruro libre se debe a la acumulación de los iones en este punto a lo largo de un periodo prologando de simulación. Para este modelo, una vez alcanzada una profundidad en la estructura de $0,124 \text{ m}$ la concentración de cloruro libre se mantiene constante y nula a lo largo del tiempo de simulación.

Los datos obtenidos en la simulación del modelo 3 se representan en la siguiente gráfica:

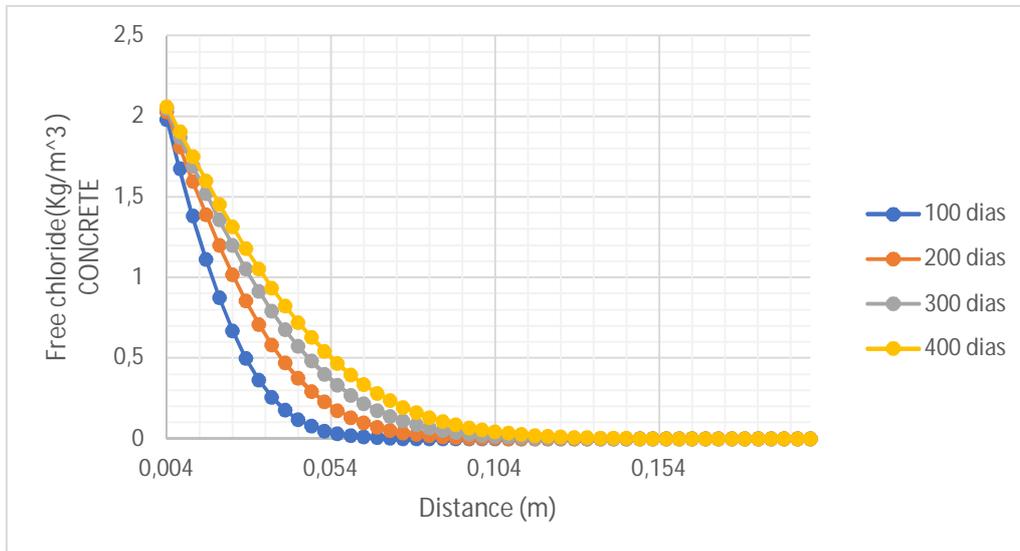


Figura 55 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 3

Para este modelo partimos de una concentración inicial de cloruros libres de 2 Kg/m^3 en la superficie de la estructura. Del mismo modo que sucedía en los modelos anteriores, la concentración se ve disminuida con la distancia de penetración en el hormigón. La argumentación de esta situación es la misma que la de los modelos anteriormente citados. Analizando la concentración de cloruro libre para una profundidad de 0.044 m obtenemos que para 100 días vale 0.1183 Kg/m^3 , mientras que su valor para 400 días de simulación es de 0.7219 Kg/m^3 . El incremento de esta concentración se debe a la acumulación de iones cloruro en este punto a lo largo de un periodo prologando de simulación. Para este modelo, una vez alcanzada una profundidad en el material de 0.124 m la concentración de cloruro libre se mantiene constante y nula a lo largo del tiempo de simulación.

En la figura (56) se muestran los datos obtenidos de la simulación del modelo 4:

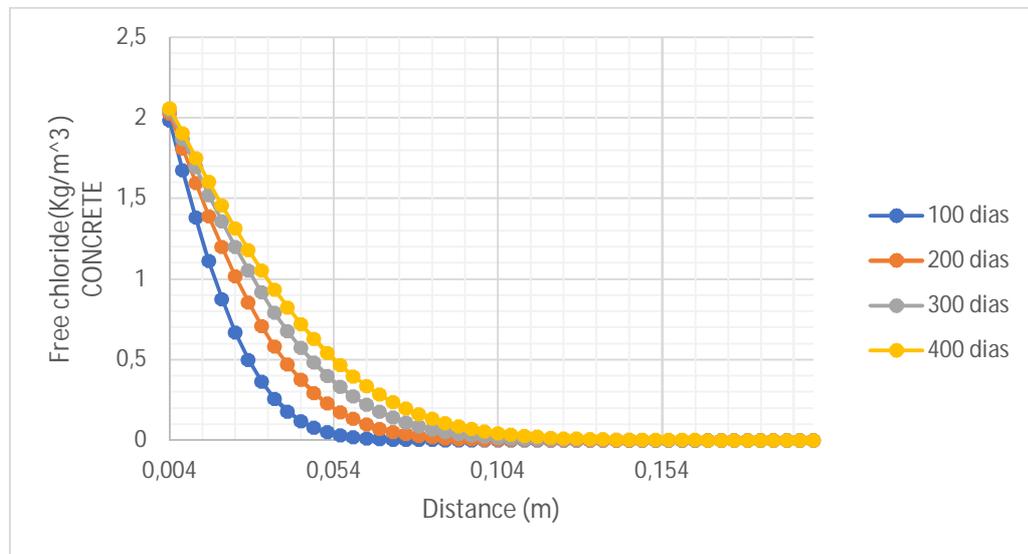


Figura 56 Relación cloruros ligados frente a distancia para el modelo 4

Al igual que en los modelos anteriores partimos de una concentración inicial de cloruros libres en la pared de la estructura de hormigón armado de 2 Kg/m^3 . Al igual que sucedía en los 4 modelos anteriormente estudiados, la concentración se ve disminuida con la distancia de penetración en el hormigón. La argumentación de esta situación es la misma que la vista en los modelos anteriormente citados. Analizando la concentración de cloruro libre para una profundidad de 0,044 m obtenemos que para 100 días vale $0,1184 \text{ Kg/m}^3$, mientras que su valor para 400 días de simulación es de $0,7205 \text{ Kg/m}^3$. Esta concentración se ve incrementada debido a la acumulación de iones cloruro en este punto a lo largo de un periodo prologando de simulación. Para este modelo, una vez alcanzada una profundidad en el material de 0,124 m la concentración de cloruro libre se mantiene constante y nula a lo largo del tiempo de simulación.

Si representamos los datos obtenidos para una simulación de 400 días, ya que para el resto de los días simulados: 100, 200 y 300 días la gráfica es prácticamente la misma, de la concentración de cloruro libre frente a la profundidad de penetración en el hormigón para cada uno de los modelos estudiados, obtenemos la siguiente gráfica:

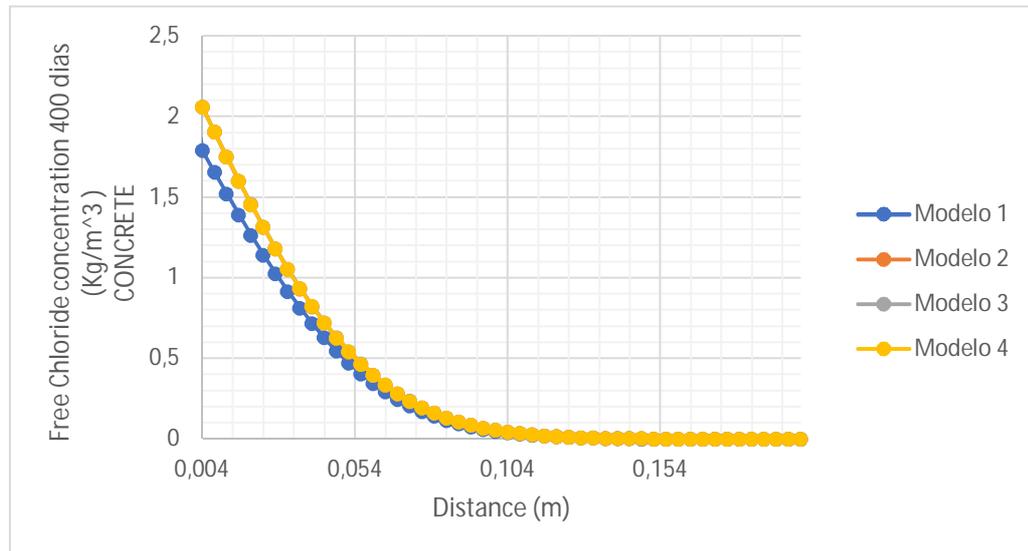


Figura 57 Relación cloruros ligados frente a distancia para los modelos estudiados

En esta gráfica, podemos observar que el modelo 1 sigue una tendencia distinta al resto de modelos empleados, por lo que descartamos nuevamente el modelo 1 como modelo de representación puesto que falla. En cambio, el resto de modelos siguen la misma tendencia y por tanto tomamos el modelo 2 y 3 como significativos de un modelo viable.

Comparación de la concentración de cloruros ligados y libres / distancia

Si comparamos las concentraciones de cloruros ligados y libres frente a la distancia de penetración en el hormigón, obtenemos las siguientes gráficas:

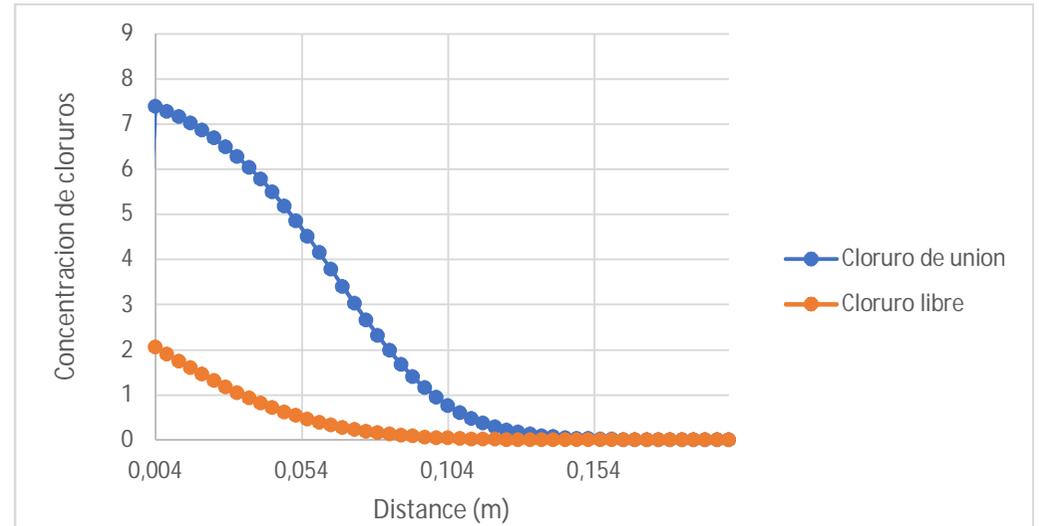
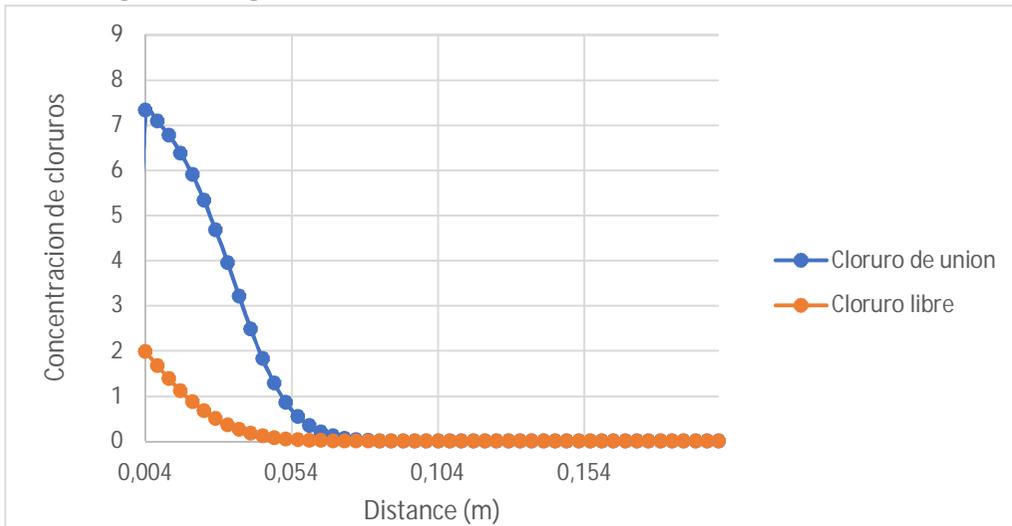


Figura 61 Comparación de cloruros ligados y libres frente a la distancia para el modelo 2 y 100 días

Figura 60 Comparación de cloruros ligados y libres frente a la distancia para el modelo 2 y 400 días

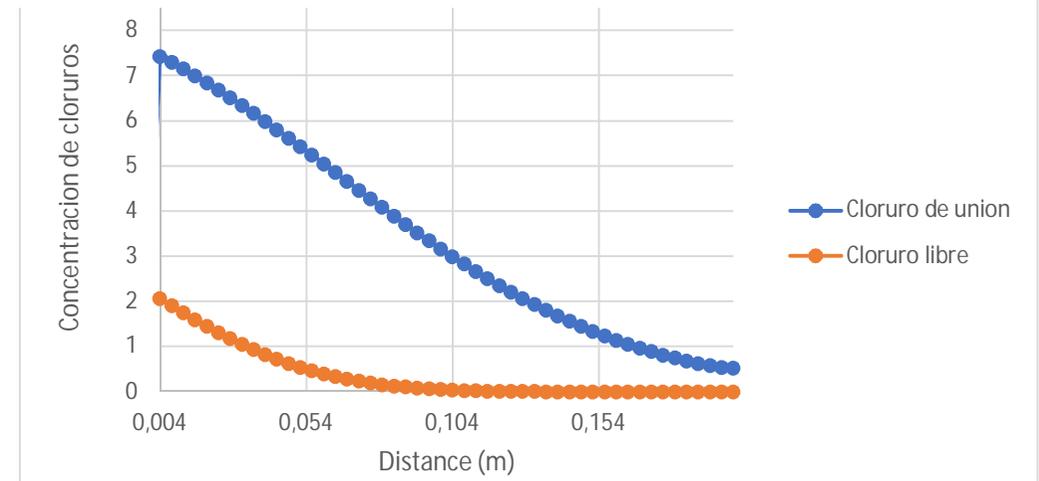
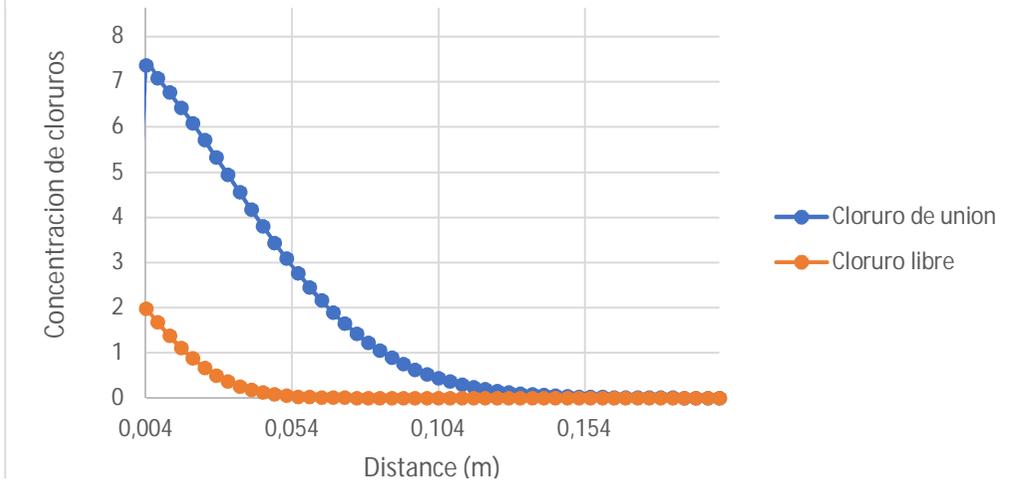


Figura 59 Comparación de cloruros ligados y libres frente a la distancia para el modelo 3 y 100 días

Figura 58 Comparación de cloruros ligados y libres frente a la distancia para el modelo 3 y 400 días

Nota: se han representado las dos gráficas más significativas de los modelos 2 y 3.

Si observamos las gráficas, vemos que las concentraciones de ambos cloruros no guardan mucha relación entre sí y la profundidad de penetración en el hormigón. Si es importante destacar que la concentración de cloruro ligado es mayor, a lo largo de toda la profundidad de la estructura, que la de cloruro libre. Esto es debido a que el cloro que penetra en el hormigón se enlaza con otros elementos quedando así fijado a la estructura el mayor número posible de iones. Por tanto, únicamente en estructuras expuestas largos tiempos de simulación (400 días) a ambientes marinos son las que mayor profundidad de penetración tienen de cloruros libres.

6. CONCLUSIONES

6. Conclusiones:

Las conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo se exponen a continuación:

- En primer lugar, hemos obtenido unas conclusiones relacionadas con el objetivo primario. A la vista de los datos obtenidos por las gráficas de la porosidad, podemos decir que una elevada exposición de la estructura de hormigón armado sumergida en un ambiente agresivo como es el medio marino, supone una alta penetración de iones cloruro al interior de la estructura cerrando progresivamente los poros desde los más externos (superficie en contacto con el medio agresivo) hacia los internos, debido a su deposición. Esto supone una protección adicional de la estructura de hormigón sobre las barras de acero impidiendo el paso de los iones cloruro a profundidades donde estos puedan afectar por corrosión a la estructura.

Con los datos obtenidos en las simulaciones de los cloruros ligados, podemos concluir que estos cloruros, que no son directamente una amenaza para la corrosión de la armadura, se encuentran en mayor medida en una estructura de hormigón armado y vienen limitados por la instrucción EHE-08 en un 0.4 % para este tipo de estructuras. También observamos que la concentración de estos cloruros tiende a estabilizarse a una determinada profundidad en el material, no aumentando esta concentración con el paso del tiempo.

Para los datos obtenidos del cloruro libre observamos que este tipo de cloruros, que son los más perjudiciales para una armadura de acero en una estructura de hormigón, tienen una concentración inferior en las estructuras de hormigón, ya que su presencia se debe a la adición de iones cloruro por parte del ambiente marino sobre la estructura que no se enlazan con otros elementos y por tanto progresan a lo largo del material. Así mismo, otro de los motivos por los que estos iones ven incrementada su concentración es por la desligación de cloruros debida a la carbonatación del material.

En general, comprobamos que el modelo 1 no se comporta bien para simulaciones con valores muy grandes, por lo que este modelo quedaría descartado. El resto de los modelos simulados tienen un comportamiento muy similar entre ellos, siendo el modelo 2 el que menos variables considera y por tanto el que tiene un mejor comportamiento.

- En cuanto a las conclusiones obtenidas en relación a los objetivos secundarios, podemos concluir que un equipo con un sistema de procesamiento más actualizado tecnológicamente no supone una ventaja (temporalmente hablando) a la hora de realizar simulaciones, puesto que estas dependen de la velocidad (frecuencia de reloj) y la arquitectura interna con la que trabaja el procesador. Aunque estas ventajas no están influidas únicamente por sistema de procesamiento, ya que también tienen una especial importancia los periféricos que rodean el procesador. Por lo que un equipo con

una capacidad de memoria RAM superior puede almacenar un mayor número de simulaciones, realizando estas con periodos de tiempos más largos.

El seguimiento continuo de los tiempos de simulación real para los dos equipos nos ha permitido comprobar que la tendencia seguida por estos modelos de simulación pertenece a una respuesta potencial y no exponencial como se creía inicialmente.

- En cuanto al software y código empleado, podemos decir, que Matlab ha realizado las simulaciones en un tiempo real medio-largo debido a la gran cantidad de datos con los que tenía que trabajar. Este código de simulación mejorado por el profesor Juan Francisco Sánchez Pérez, queda obsoleto frente a una nueva versión que reduce los tiempos reales de simulación a un nivel bajo-medio.
- Como futuras líneas de investigación, se propone la comparación de tiempos de simulación entre los dos códigos implementados y la comparación con un modelo real de los modelos simulados.

7. BIBLIOGRAFIA

7. Bibliografía

1. routledgehandbooks.com [en línea]. Disponible en:
<https://www.routledgehandbooks.com/doi/10.1201/9781315366692-4>
2. youtube.com [en línea], autor: profesor Antonio Garrido UPCT. Disponible en:
<https://www.youtube.com/watch?v=ay5SSo9SAFA>
3. Ministerio de fomento. Instrucción de hormigón estructural EHE-08. Disponible en: <https://www.fomento.gob.es>
4. González casado, María Dolores y Peláez Franco, Leocadio. Apuntes didácticos de hormigón. Universidad de salamanca.
5. Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Sevilla, 26-28 octubre 2000, eds. A. Graciani, S. Huerta, E. Rabasa, M. Tabales, Madrid: I. Juan de Herrera, SEdHC, U. Sevilla, Junta Andalucía, COAT Granada, CEHOPU, 2000.
6. todoedificacion.blogspot.com [en línea]. Disponible en:
<http://todoedificacion.blogspot.com/2012/01/durabilidad-en-las-estructuras-de.html>
7. Maya Miranda, Enrique. Hormigón armado. Estrategias de durabilidad frente a proceso patológico. Artículo [1998]. Universidad de navarra. Disponible en:
https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/17433/1/RE_Vol%2028_04.pdf
8. IECA (instituto español del cemento y sus aplicaciones). Hormigón en ambiente marino. Guía técnica [2013].
9. Cobo Escamilla, Alfonso. Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado y procedimientos de rehabilitación.
10. Bermúdez Odriozola, Miguel Ángel. Corrosión de las armaduras del hormigón en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida. Tesis doctoral [2007]. E.T.S.I. Caminos, Canales y puertos UPM. Disponible en:
<http://oa.upm.es>
11. Ministerio de la presidencia, relaciones con las cortes e igualdad. Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-16). Disponible en:
https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-6167

12. Fernández Cánovas, Manuel. Hormigón.
13. Luaces, Cesar. Los áridos. Artículo [2010]. Disponible en:
<http://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37082-Los-aridos.html>
14. Delegación de alumnos de topografía ETSI en topografía, geodesia y cartografía UPM. Apuntes ingeniería civil, tema 6: productos de acero. Disponibles en:
http://delegacion.topografia.upm.es/?page_id=1287
15. Carbonell de Masy, Manuel. Protección y reparación de estructuras de hormigón.
16. Fernández García, Susana. Corrosión de armaduras en el hormigón armado en ambiente marino aéreo. Tesis doctoral [2016]. E.T.S.I. Caminos, Canales y puertos UPM. Disponible en: <http://oa.upm.es>
17. Viedma Robles, Antonio. Apuntes Mecánica de fluidos. Escuela técnica superior de ingeniería industrial UPCT.
18. <https://definicion.de/> [en línea]. Disponible en:
<https://definicion.de/capilaridad/>
19. <https://definicion.de/> [en línea]. Disponible en:
<https://definicion.de/absorcion/>
20. Eugenia Rabanal, María. Bloque II, Tema 4.- Solidificación. Fenómeno de difusión. Factores que afectan a la difusión. Aplicaciones industriales del fenómeno de la difusión. Material de clase. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/tecnologia-de-materiales-industriales/material-de-clase>
21. Beekman, George. Introducción a la informática; 6º edición.
22. <https://mavunivia.wordpress.com> [en línea]. Disponible en:
<https://mavunivia.wordpress.com/tag/registros-apuntadores/>
23. Rebollo Pedruelo, Miguel. El procesador. Facultad de administración y dirección de empresas UPV. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/10673>
24. <https://www.genbeta.com> [en línea]. Disponible en:
<https://www.genbeta.com/desarrollo/como-funciona-la-computacion-actual-funcionamiento-de-la-arquitectura-de-von-neumann>

25. Fenaux, Michiel. Modelling of chloride transport in non-saturated concrete. From microscale to macroscale. Tesis doctoral [2013]. E.T.S.I. Caminos, Canales y puertos UPM. Disponible en: <http://oa.upm.es>
26. <https://www.intel.es> [en línea]. Disponible en: <https://ark.intel.com/#@PanelLabel122139>