



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

ESCUELA UNIVERSITARIA DE ARQUITECTURA
TÉCNICA

TRABAJO FIN DE GRADO:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE NORMATIVAS:
“ACI 318-14 Y EHE-08”

DEPARTAMENTO DE LA TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

Akopova Alla
Director: Dr. Emilio Mosquera Rey
Julio 2016

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mi Director de TFG, a Dr. D. Emilio Mosquera Rey por su ayuda, orientación y conocimientos prestados a lo largo de este trabajo y durante los años que me impartió clase.

Mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que formaron parte de esta odisea, a mi familia, a mis amigos y compañeros de viaje. Gracias por ese apoyo incondicional recibido por vuestra parte y los ánimos para seguir adelante.

Gracias.

RESUMEN

El presente Trabajo Fin de Grado trata sobre cómo vemos la *Durabilidad* y qué métodos usamos para cumplir con una *Vida útil* satisfactoria. Durante todo el trabajo, como se podrá observar, se habla de los factores que más afectan a la Durabilidad, de los cuales se puede destacar la relación a/c.

Si nos referimos a los *mecanismos de deterioro* hablamos de mecanismos de deterioro físicos y químicos. Lo más subrayado de estos mecanismos es la permeabilidad del material, la calidad del mismo en cuestión de la formación de poros, su capacidad de absorción y difusión. Esto nos lleva a la *Corrosión*, uno de los deterioros más común en las estructuras de hormigón armado. La Corrosión se produce por dos razones: la Carbonatación o por penetración de iones de Cloruros.

Asimismo este trabajo analiza la normativa Española *EHE-08* y la normativa Americana *ACI 318-14* con respecto a la comprobación de *Estado Límite de Durabilidad*, la Corrosión. Se realizará un ejercicio en el que se podrán ver los métodos y modelos de cálculo usados por las dos normas y finalmente unas conclusiones.

PALABRAS CLAVE: Durabilidad, Vida útil, Mecanismos de deterioro, Corrosión, 2ª ley de Fick.

ABSTRACT

This Final Project is about how we see the *Durability* and what methods we use to meet a satisfactory *Service Life*. Throughout the work, as you can see, we talk about the factors that affect the durability, which can highlight the w/c.

If we refer to the *mechanisms of deterioration*, we talk about mechanisms of physical and chemical deterioration. The most stressed of these mechanisms is the permeability of the material, the quality of it within pore formation, their absorption capacity and diffusion. This leads to *Corrosion*, one of the most common deterioration in reinforced concrete structures. Corrosion occurs for two reasons: the Carbonation or penetration of Chloride ions.

This paper also analyzes the Spanish legislation *EHE-08* and *ACI 318-14 USA* legislation regarding checking *Durability Limit State*, Corrosion. An exercise in which you can see the calculation methods and models used by the two standards and finally conclusions will be made.

KEY WORDS: Durability, Service Life, Deterioration Mechanisms, Corrosion; Fick's Second Law.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Breve historia del hormigón	2
1.1.1 El hormigón armado en España	3
1.1.2 El hormigón armado al otro lado de las fronteras	3
2. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN	5
2.1 Factores que afectan a la durabilidad	5
2.2 Vida útil de una estructura	6
2.2.1 Diseñar para la vida útil	8
2.2.2 Aspectos de diseño que pueden reducir el riesgo de mecanismos de deterioro	11
2.2.3 Estrategias de durabilidad	12
2.2.4 Requisitos	13
2.3 Mecanismos de deterioro físico	13
2.3.1 Ciclos de hielo- deshielo:	14
2.3.2 Abrasión- Erosión	18
2.3.3 Cavitación	20
2.3.4 Exfoliación	20
2.3.5 Fuego	20
2.4 Fisuración	22
2.4.1 Fisuración por retracción plástica	22
2.4.2 Retracción por secado	23
2.4.3 Método de reparación de fisuras	25
2.5 Mecanismos de deterioro químicos	26
2.5.1 Ataque por sulfatos	27
2.5.2 Reacción álcali-árido	29
3. EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN	31
3.1 Principios de la corrosión	32
3.1.1 Tipos de corrosión	33
3.1.2 Pasivación del acero en el hormigón	33
3.2 La Carbonatación	34
3.2.1 El proceso de carbonatación	34
3.3 Ataque de iones de cloruro	36
3.3.1 Método de penetración de cloruros	37

3.4	Métodos de ensayo de corrosión de armaduras.....	37
3.4.1	Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112010:2011.....	37
3.4.2	Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:2011.....	41
3.5	Métodos de prevención de la Corrosión.....	44
4.	PRESCRIPCIONES DE DURABILIDAD EN LA NORMATIVA.....	46
4.1	Tipo de ambiente:.....	46
4.2	Adecuada relación a/c y Resistencia mínima N/mm ²	49
4.3	Recubrimiento.....	52
5.	CONSIDERACIONES ADICIONALES SOBRE DURABILIDAD. ANEJO 9 – ACI 365.1R-00.....	57
5.1	Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión según el Anejo 9º de la EHE-08.....	58
5.1.1	El período de iniciación:.....	58
5.1.2	El período de propagación:.....	62
5.1.3	Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras.....	62
5.2	Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión según ACI 365.1R-00.....	64
5.2.1	Métodos de aproximación para predecir la vida útil de hormigones.....	64
5.2.2	Modelos matemáticos.....	65
6.	EJEMPLO NUMÉRICO DE ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEBIDA A LA CORROSIÓN.....	71
6.1	La corrosión según el Anejo 9º.....	72
6.1.1	Verificación numérica para los ataques por Carbonatación.....	72
6.1.2	Cuadros resúmenes:.....	76
6.1.3	Verificación numérica para los ataques de iones de Cloruros.....	80
6.1.4	Cuadros resúmenes:.....	114
6.2	La corrosión según ACI 365.1R-00.....	124
6.2.1	Verificación numérica para los ataques de iones de Cloruros.....	124
6.2.2	Cuadros Resúmenes:.....	135
7.	CONCLUSIONES.....	140
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	144
9.	ÍNDICE DE ILUSTRACIONES, GRÁFICAS Y ESQUEMAS:.....	147

1. INTRODUCCIÓN

El uso del hormigón como elemento constructivo lleva presente en una gran cantidad de estructuras y edificaciones desde el Imperio Romano hasta nuestros días por su versatilidad y bajo costo. Han ido evolucionando con él, tanto los elementos básicos de las obras en las que se ha utilizado este material como la propia puesta en obra del mismo, los ensayos que se realizan sobre éste para asegurar su calidad y los aditivos utilizados en la elaboración del propio hormigón.

En cuanto a las características del hormigón es un material cerámico que soporta bastante bien el esfuerzo de compresión pero es sensible a otros tipos de esfuerzos mecánicos, como flexión, tracción, torsión y cortante entre otros. A raíz de eso surgió el hormigón armado, que es una combinación de hormigón y acero estructural.

En la actualidad son muchos los factores que intervienen en el resultado de la resistencia final del material, pero este trabajo se va a centrar en la Durabilidad, a la que se le lleva dando mucha importancia desde hace más de veinte años en países Europeos y en EEUU.

El objeto de este Trabajo Fin de Grado es hacer un análisis comparativo entre la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08), normativa vigente en España, y American Concrete Institute (ACI 318-14), normativa vigente en USA y algunos países de Sudamérica. Se centrará principalmente en el apartado de la Durabilidad, en concreto en el Anejo 9º de la Instrucción.

1.1 Breve historia del hormigón

El empleo del cemento se remonta a la época prerromana en la construcción de obras de mampostería, pero fueron los romanos los que perfeccionaron la técnica. Se construyeron obras urbanas tales como el Panteón de Agripa y las termas del emperador Caracalla. Tras la caída del Imperio Romano hasta mediados del siglo XVIII no se produjeron avances importantes.

El Cemento Portland no llegó hasta 1824 patentado por Joseph Aspdin (1778-1855), quien lo bautizó así al ver la similitud que tenía el color del cemento con las rocas de la Isla de Portland. Este cemento es el que se usa actualmente a nivel mundial.

Durante los siguientes años se pueden los avances y aportes de ingenieros británicos y franceses ya con un producto llamado hormigón, que consistía en la mezcla de cemento, agua, arena y fragmentos de roca machacada. El mayor problema era el mal aguante que tenía respecto a los esfuerzos de tracción.

La solución no tardó en llegar de la mano de personajes de la época como François Coignet (1814-1888), con la construcción en 1853 de un inmueble de cuatro plantas en pleno París. En 1854 el británico William Boutland Wilkinson (1819-1902) ya había patentado el sistema de los forjados reticulados, que ya tenía una visión del hormigón como el “protector” del acero aparte de su resistencia al fuego.

El hormigón armado nació de la mano de Joseph Louis Lambot (1814-1887), que presentó un bote para navegar en 1855, y de Joseph Monier (1823-1906) que lo empleó en la fábrica de jardineras y su primera patente aparece en 1867. La principal ventaja de Monier ante otros competidores fue que vio desde el principio las posibilidades de este nuevo producto y su empleo en la construcción. En 1875 proyectó y construyó un puente de 13.80 m de luz y 4.25 m de ancho. Pero por desgracia todos estos logros no tenían una base teórica.

Otro nombre importante es el de François Hennebique (1843-1921) que empleó el hormigón como elemento de revestimiento de perfiles metálicos contra el fuego. Adquirió numerosas patentes y con su estrategia comercial expandió el negocio, pero su diseño se basaba en prototipos y no realizó ningún aporte teórico, al igual que Monier.

Otros logros dignos de mención fueron los forjados de hormigón sin vigas construidos por Claude A.P. Turner (1869-1955) en 1906 y paralelamente en 1908 por el francés Robert Maillard (1872-1940). La principal diferencia estaba en la disposición de las armaduras ya que Turner las colocaba según las direcciones de los momentos principales mientras que Maillard en forma de emparrillado ortogonal, la que se emplea actualmente.

Sin embargo, se puede atribuir el primer estudio serio del hormigón al margen de cualquier patente al ingeniero norteamericano Thadeus Hyatt (1816-1901). Hyatt se había dado cuenta de la importancia de aspectos como la adherencia entre la armadura y el hormigón que la recubre, la medida de recubrimiento frente al fuego del acero dentro del hormigón y la similitud entre los coeficientes de dilatación térmica de ambos materiales.

1.1.1 El hormigón armado en España

En España el hormigón armado entro a través de las franquicias francesas a finales del siglo XIX. Tenemos por ejemplo a Francesc Maciá (1859-1933) que era partidario del sistema Monier o a José Eugenio Ribera (1864-1936) que era partidario del sistema Hennebique. El primer edificio de hormigón armado fue construido en Bilbao en el año 1900.

A partir del año 1902 se desatendió del sistema Hennebique, después del uso del hormigón armada en más obras, y publicó un tratado del hormigón en España, "Hormigón y cemento armado: mi sistema y mis obras".

Una figura destacable en el desarrollo tecnológico del hormigón estructural es el ingeniero **Eduardo Torroja** (1899-1961). Fue alumno de Ribera y se encargó de difundir en España las ideas de la arquitectura contemporánea, el racionalismo en especial. Una de sus obras destacadas es la cubierta del Mercado de Abastos de Algeciras (1932-Málaga) cuya cúpula tiene casi 50 m de diámetro y 9 cm de espesor. En 1934 fundó la revista "Hormigón y Acero" y el *Instituto de la Construcción y de la Edificación*. Un año más tarde completó sus dos proyectos más impresionantes: las tribunas del Hipódromo de la Zarzuela y el Frontón de Recoletos.

Fue nombrado director del *Instituto Técnico de la construcción y del Cemento* en 1947 y a su muerte pasó a denominarse *Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torroja*.

La primera Instrucción fue publicada en 1936, promulgada por el Ministerio de Obras Públicas para el proyecto de obras, y fue revisada en 1944 y 1961. En el año 1968 se creó la Comisión Permanente del Hormigón (CPH) que sigue cargándose de la elaboración de normativas para la regulación del proyecto, ejecución y mantenimiento de las obras de hormigón. Se redactaron las instrucciones EH-68 y EP-77, hormigón armado y pretensado respectivamente, y en las revisiones del 80 nació el Código Modelo del 78.

A finales del siglo XX la EHE-98 refundió ambas técnicas e incorporó el método de cálculo de bielas y tirantes. La versión actual, **EHE-08** cumple con el objetivo de armonizar con los Eurocódigos.

1.1.2 El hormigón armado al otro lado de las fronteras.

La teoría del hormigón armado no dio por sentado sus bases hasta el año 1902 de la mano del ingeniero alemán Emil Mörsch (1872-1950) quien introdujo las bases del Método Elástico o Método Clásico para el cálculo de elementos de hormigón armado. Hasta entonces solo hubo algunas publicaciones de libros presentado el propio sistema y algunas realizaciones o como, por ejemplo, las clases que impartía Charles Rabut (1852-1925) en la Escuela de Ingenieros de Puentes y Caminos de Paris desde 1897 cuyo contenido, el curso de "Construcciones de Hormigón Armado", era también descriptivo y presentaba los diferentes sistemas y patentes pero no se trataron los temas de cálculo y dimensionado.

En Francia en 1902 se creó una Comisión del Cemento Armado formada por Rabut, Hennebique y Coignet, entre otros, tenían como objetivo redactar un reglamento específico para la construcción de estructuras de hormigón armado. Finalizaron sus trabajos con la publicación de la Circular Ministerial de 1906.

En Alemania se encargaron de la redacción la Asociación de Ingenieros y Arquitectos y la Asociación Alemana del Hormigón en 1904. La primera norma para el hormigón armado es la DIN 1045 de 1932 elaborada bajo la dirección de Emil Mörsch.

En Gran Bretaña se fundó el Instituto Británico del Hormigón a principios del siglo XX. El primer reglamento oficial es el Código de Londres de 1915, antecesor de la serie British Standard BS 8110.

En Estados Unidos la primera norma que consta es la **ACI-318** de 1947. La última revisión se realizó en el año 2014.

En Europa, año 1964, se fundó el Comité Europeo del Hormigón que publicó una serie de recomendaciones sobre el hormigón estructural. Fueron revisadas en 1970 y 1977 y se aprobó el Código Modelo de 1978 por CEB y FIP. Actualmente están vigentes los Eurocódigo.

2. DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

El hormigón es, debido a su versatilidad, un material de gran eficiencia, aparte de ser relativamente barato, que está incrementando su importancia para todo tipo de construcciones. Las estructuras hechas de este material pueden ser resistentes y duraderas, pero hay que considerar en el proceso de diseño el efecto que va a producir en él el medio ambiente al que se vaya a exponer. También es necesario distinguir entre la degradación del hormigón en sí y la pérdida de protección y la corrosión del acero al que protege.

Podemos definir la *Durabilidad* del hormigón como su capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Para que un hormigón sea durable deberá conservar su forma, su calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a un ambiente.

En un principio el hormigón fue considerado como un material de alta durabilidad, pero la experiencia ha demostrado que esto no es necesariamente así al menos que se diseñe pensando en la durabilidad y en el proceso constructivo. Hay que considerar todos los mecanismos de deterioro en el proceso de diseño con la intención de seleccionar una mezcla de hormigón adecuada desde el punto de vista de la durabilidad. Las especificaciones del hormigón basadas en la máxima relación agua/cemento recibió en los últimos años muchas críticas.

2.1 Factores que afectan a la durabilidad

El mecanismo por el que el hormigón sufre problemas de durabilidad y los daños posteriores son el ciclo de hielo- deshielo; flujo de iones, movimientos de absorción y humedad dentro del hormigón; los cuales se refieren a los aspectos de la durabilidad.

Una durabilidad satisfactoria en mayor parte se consigue gracias al cemento Portland, con o sin aditivos, y es una de las razones por el cual es el material constructivo más usado mundialmente.

Las áreas de interés que afectan negativamente a la durabilidad del hormigón son las limitaciones materiales; diseño y prácticas constructivas; condiciones de exposición severas que puede causar que el hormigón se deteriore, lo que puede derivar en problemas estéticos, funcionales o estructurales.

El hormigón puede deteriorarse por varias razones, y en muchas ocasiones los daños es el resultado de una combinación de factores, comenzando con la formación de grietas que conducen a procesos que implican reacciones químicas perjudiciales y desajuste hidrostático. La magnitud de la grieta es causada por un sistema de transporte de iones/moléculas, produciendo cambios microestructurales degradando propiedades físicas del hormigón.

El hormigón es objeto de deterioro causado por absorción de humedad y expansión térmica y la contracción. Las temperaturas extremas de frío y calor pueden causar desprendimientos. La humedad absorbida por el hormigón se expande y se contrae con los cambios de temperatura, y la resultante acción mecánica puede causar

fracturas y desprendimiento. Los contaminantes del aire, como la lluvia ácida o el dióxido de carbono, pueden causar reacciones químicas adversas que pueden acabar en deterioros superficiales.

La localización geográfica es un importante factor con respecto a la durabilidad, múltiplo de ciclos de hielo- deshielo severos, que es el peor estrés destructivo que puede sufrir el hormigón.

Todo proceso que afecte a la durabilidad está relacionado con el ingreso del agua o de iones dentro del hormigón.

Hay tres áreas que se deberán comprobar:

- Daños por ciclos de hielo- deshielo.
- Transferencia de iones.
- Factores que afectan a la difusión y absorción.

El hormigón está hecho de varias combinaciones de cemento, agua y adiciones de grano fino y grueso con aditivos para modificar las propiedades del hormigón. La absorción es el área clave para hacer pruebas en relación con el rendimiento de durabilidad.

El deterioro se relaciona con su permeabilidad. Un hormigón permeable permite el ingreso del agua lo que deja al mismo como objeto de daños provocados por ciclos de hielo- deshielo. La formación de escamas en la superficie es a lo mejor la forma más evidente y más común que provocan esos ciclos.

Aparte de lo ya mencionado, las principales causas que provocan el deterioro del hormigón las podemos dividir en mecanismos de deterioro físicas y químicas. Otros problemas importantes son la fisuración y la corrosión de los metales.

Para que en el hormigón se produzcan los procesos físicos y químicos, bien deseables o bien perjudiciales, son necesarias el agua y la energía, que activa los procesos. El conjunto agua – calor, junto con otros aspectos como elementos ambientales, son importantes. Es fundamental también la selección de materiales adecuados para que el hormigón sea durable y resistente.

Se tratarán algunas de las causas más dañinas y darles una posible solución y consejos de prevención.

2.2 Vida útil de una estructura.

Entendemos por Vida útil, según el CEB-FIP de 1990, *como el periodo de tiempo durante el cual la estructura es capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada*, sin necesidad de intervenciones no previstas.

Esta definición se acerca a la que aparece en la EHE-08, que es equivalente al “periodo de servicio” del CTE.

En la norma ACI aparecen estas tres definiciones de la vida útil:

- a) *Vida de servicio Técnica*: es el tiempo en servicio de la estructura hasta que un estado inaceptable de servicio es alcanzado. Tal es el caso del desprendimiento del recubrimiento, donde el grado de seguridad está por debajo del aceptable.
- b) *Vida de servicio funcional*: es el tiempo de servicio hasta que la estructura deja de cumplir con los requerimientos de funcionalidad o empieza a resultar obsoleta cuando por ejemplo se plantea un cambio de uso y este cambio implica un conjunto de nuevos requerimientos que la estructura no puede cumplir.
- c) *Vida de servicio económica*: es el tiempo de servicio hasta que el reemplazo de la estructura, o una parte de ella, resulta más económica que mantenerla en servicio.

La preocupación por la durabilidad de las estructuras nos lleva a la necesidad de enfocar el diseño de las estructuras basándonos en consideraciones relativas a la vida útil o de servicio, a tener en cuenta los efectos del medio ambiente, consideraciones de diseño y de cargas, aspectos relativos a la construcción y al mantenimiento a lo largo de su vida de servicio.

Existen algunos modelos de **predicción de la vida útil** de una estructura, pero no se pueden considerar de una ciencia exacta debido a la influencia de múltiples factores. Los métodos expuestos a continuación son los más utilizados:

1) Método determinista:

Son aquellos métodos que se basan en el estudio de los factores más influyentes en la degradación de los elementos, en la comprensión de sus mecanismos de actuación y en sus funciones de degradación. Estos factores se traducen en fórmulas que expresan su acción en función del tiempo. El método más utilizado es el método de los factores.

2) Métodos probabilísticos:

El método probabilístico trata la degradación como un proceso estocástico¹, donde se explica la probabilidad del deterioro para cada propiedad durante un periodo de tiempo. Es un método complicado y se aplica para grandes proyectos ya que es necesario tener datos reales durante un gran periodo de tiempo. El modelo más utilizado es el de Markov.

Se recomienda aplicar esta comprobación para obras de repercusión económica media y alta y expuesta a cualquier tipo de ambiente, siempre y cuando se tenga un conocimiento a partir de un ensayo acelerado.

3) Método de ingeniería:

Este método sería una combinación de los dos métodos anteriores, es un método semiprobabilista. Este método se usa para identificar los fenómenos de degradación de una forma analítica y a la vez controlarlos en proyecto a través de una planificación del mantenimiento. Los métodos más utilizados son el

¹ Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria.

Análisis Modal de Fallos y Efectos del Proceso AMFE y el Método de los Estado Límite.

La resistencia de una estructura de hormigón a la acción del agente agresivo, acciones físicas, químicas o biológicas, queda verificada para los estados de proyecto relevantes, según UNE 83944-1:2010 IN², si se cumplen la siguiente condición:

$$E_{d,env} \leq R_{d,env}$$

Dónde:

$E_{d,env}$: valor de cálculo del efecto de la acciones para un determinado estado de proyecto relevante

$R_{d,env}$: es el valor de cálculo de la resistencia a la acción del agresivo correspondiente

La aptitud al servicio de una estructura o parte de ella queda verificada si se cumple lo siguiente:

$$E_{d,env} \leq C_{d,env}$$

Dónde:

$E_{d,env}$: valor de cálculo del efecto de la acciones para un determinado estado de proyecto relevante

$C_{d,env}$: valor límite para el mismo efecto.

Se deben adoptar como valores límite para los distintos efectos de las acciones, los valores indicativos reflejados en los distintos documentos de carácter normativo o reglamentario.

2.2.1 Diseñar para la vida útil.

Sin un apropiado diseño y control de producción, el deterioro del hormigón puede comprometer la integridad estructural y plantean graves problemas de responsabilidad.

El diseño de estructuras de hormigón armado para garantizar una adecuada durabilidad es un proceso complicado. El proceso de deterioro físico y químico del hormigón o la reducción de la durabilidad, con el tiempo, depende de la presencia y transporte de sustancias deteriorante a través del hormigón, la frecuencia, la magnitud y el efecto que producen las cargas aplicadas. En la siguiente tabla podemos ver como la combinación del calor, la humedad y los productos químicos constituyen los principales elementos que reducen la durabilidad.

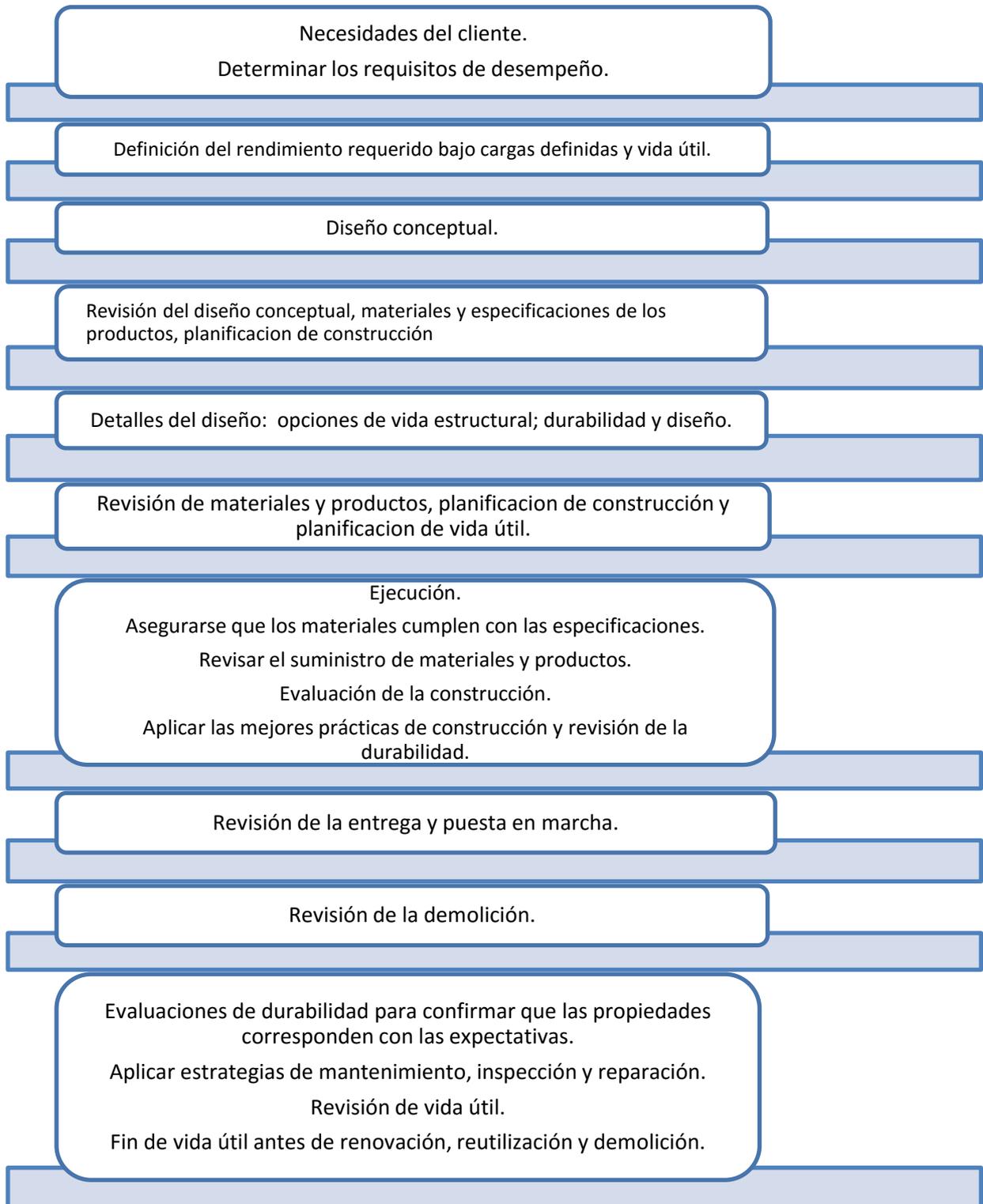
² UNE 83944-1:2010 IN: Durabilidad del hormigón. Estrategia de comprobación de la durabilidad en niveles. Parte 1: Método de comprobación.

Tabla 1. Relación entre el concepto de la durabilidad del hormigón y la manera de actuación. (CEB 1992)

DURABILIDAD			
<i>Diseño estructural:</i> - Formas - Detalles	<i>Materiales</i> - Hormigón - Refuerzo	<i>Ejecución:</i> - Mano de obra	<i>Curado:</i> - Humedad - Calor
Naturaleza y distribución de Poros			
Mecanismos de Transporte			
<i>Deterioro del hormigón</i>		<i>Deterioro del refuerzo (acero)</i>	
Físico	Químico y Bilógico	Corrosión	
Actuación			
Resistencia ↓ Seguridad	Rigidez ↓ Serviciabilidad	Condiciones de la superficie ↓ Apariencia	

El grado en el que afecta el transporte de fluidos y la extensión en gran parte dependen de la estructura de poros del hormigón (tamaño y distribución), la presencia de grietas y el microclima en la superficie del hormigón.

A continuación se describen factores de diseño que se deberían de tener en cuenta para lograr un buen servicio planificado. El esquema muestra los factores que afectan a la estructura de hormigón para lograr un buen rendimiento para una vida útil prevista.



Esquema 1. Diseño de estructuras de hormigón para una vida útil planificada.

2.2.2 Aspectos de diseño que pueden reducir el riesgo de mecanismos de deterioro.

En la mayoría de los casos una fiabilidad adecuada se puede lograr por la simple combinación de hormigón de buena calidad, un recubrimiento suficiente y buena mano de obra. Para un enfoque más detallado se debería tener en cuenta el siguiente número de razones que incluyen:

- a) Condiciones de exposición especialmente agresivas.
- b) Falta de disponibilidad o costos elevados de materiales adecuados.
- c) Altas consecuencias de fracaso inusuales.

Se establecen unos requisitos básicos para el diseño:

Una estructura debe ser diseñada y ejecutada de tal manera que tendrá, durante su vida útil prevista, unos grados adecuados de fiabilidad:

- d) Mantener todas las acciones e influencias que puedan producirse durante la ejecución y utilización, y
- e) Siendo aptas para el uso al que se requiere.

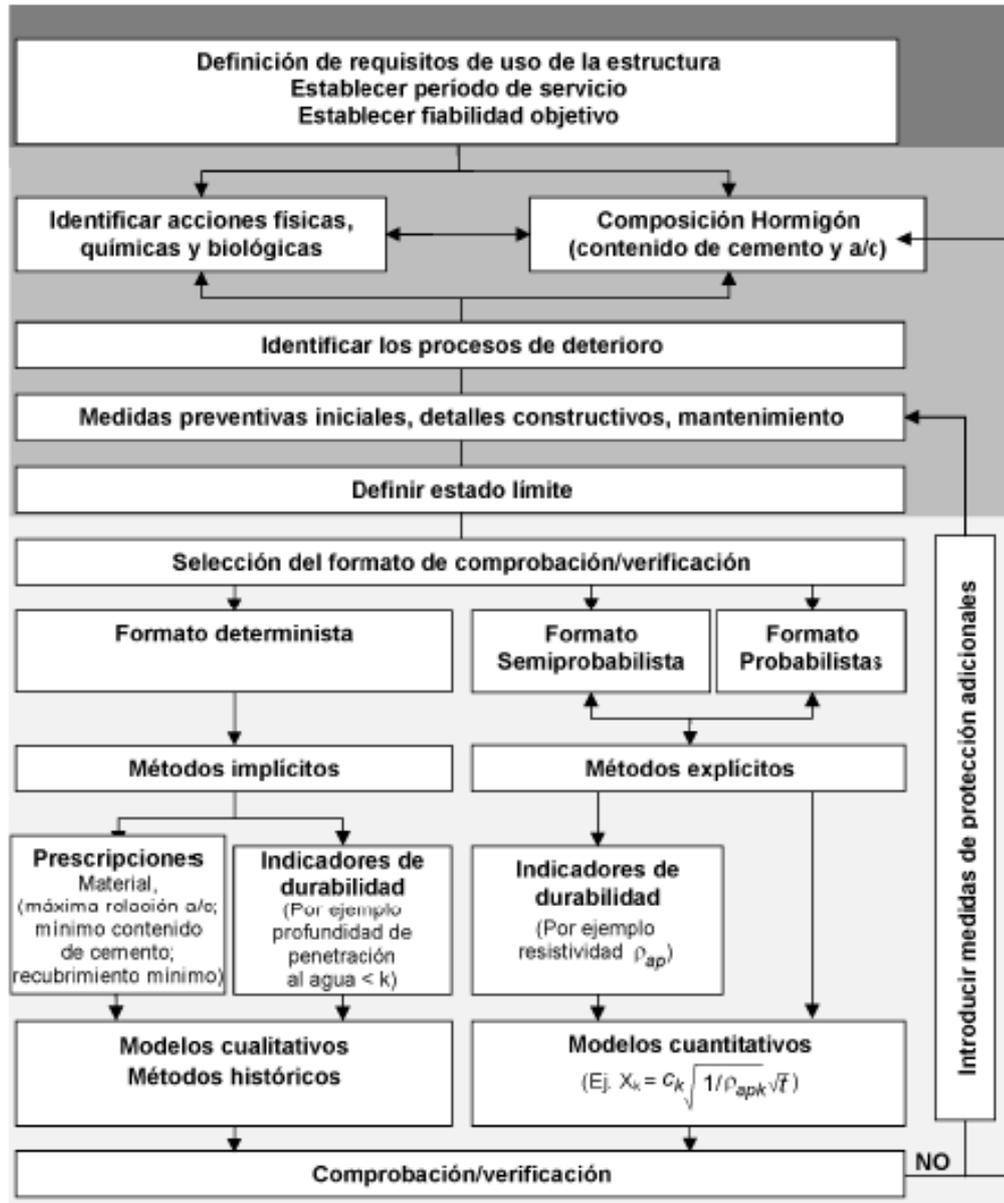
Añade que la estructura debe ser diseñada para tener una adecuada:

- f) Resistencia estructural
- g) Servicialidad, y
- h) Durabilidad

Y deben cumplirse estos requisitos básicos:

- i) Elección de materiales adecuados.
- j) Un diseño y detalles adecuados.
- k) Mediante la especificación de los procedimientos de control para el diseño, producción, ejecución y utilización para un proyecto particular.

El procedimiento general para la comprobación de la durabilidad de una estructura de hormigón sería, según UNE 83994-1:2010 IN, la siguiente:



Esquema 2. Esquema general de comprobación de la durabilidad. (UNE 83994-1:2010 IN)

2.2.3 Estrategias de durabilidad

Con el fin de conseguir una estructura adecuada y duradera debe tenerse en cuenta lo siguiente:

- El uso previsto de la estructura
- Los criterios de diseño requeridos
- Las condiciones ambientales previstas
- La composición, propiedades y el rendimiento de los materiales y productos.
- Las propiedades del suelo
- La elección del sistema constructivo
- La claridad y calidad de los detalles constructivos
- La calidad de mano de obra, y nivel de control

- Las medidas de protección particulares
- El mantenimiento previsto durante la vida útil calculada

2.2.4 Requisitos

Antes de tomar decisiones acerca de las estrategias de durabilidad es necesario conocer el rendimiento de la estructura o elemento en consideración. La mayoría de los mecanismos de deterioro dependen del tiempo de la vida útil prevista de la estructura.

TIPO DE ESTRUCTURA	VIDA ÚTIL NOMINAL
Estructuras de carácter temporal	Entre 3 y 10 años
<i>Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal</i>	<i>Entre 10 y 25 años</i>
Edificios agrícolas o industriales y obras marítimas	Entre 15 y 50 años
Edificios de viviendas u oficinas y estructuras de ingeniería civil	50 años
<i>Edificios de carácter monumental o de importancia especial</i>	<i>100 años</i>
<i>Puentes y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta</i>	<i>100 años</i>

Tabla 2. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructura.(EHE-08)

Cada tipo de estructura necesita diferentes soluciones de diseño para obtener mejores resultados.

2.3 Mecanismos de deterioro físico.

El hormigón es un material poroso. Esos poros son el resultado del exceso de agua añadido. Para una estructura normal el agua necesaria es del 30% de la masa total del cemento para que éste esté totalmente hidratado. Si añadimos agregados a la mezcla puede que la mezcla del hormigón no sea la correcta. La solución más fácil es añadiendo más agua y el resultado es que el exceso de agua no se combina bien a nivel químico y produce la formación de poros. Cuanta más agua añadimos más poros se forman, lo que hace que el hormigón tenga una baja resistencia.

Hay una serie de mecanismos que dan lugar a la degradación física:

- *Abrasión y cavitación.*
- *En lugares donde la superficie del hormigón está expuesta al tráfico pueden producirse grandes presiones hidrostáticas y eso puede acelerar la abrasión.*
- *Algunos mecanismos de deterioro físicos involucran materiales con poros lejos de la superficie a expandirse. Eso añade un estrés adicional al hormigón, y el resultado es que la superficie acaba descamándose.*
- *Finalmente, el fuego, y su posterior extinción, producen daño al hormigón.*

Deben de tenerse en cuenta también las articulaciones que a veces tienen las estructuras de hormigón. Suelen ser de unos materiales menos durables que el hormigón y puede ser sujeto de más daños. A las articulaciones y los bordes expuestos siempre se les debe dar una consideración especial en las zonas propensas a daños físicos.

2.3.1 Ciclos de hielo- deshielo:

Cuando exponemos el hormigón fresco a ciclos de hielo- deshielo ponemos su capacidad para sobrevivir sin sufrir daños. El hormigón con aire incorporado, con una dosificación correcta, elaborado con materiales de buena calidad, bien colocado, acabado y curado puede resistir ciclos de hielo- deshielo muchos años, salvo si se presentan condiciones extremadamente severas. Esta condición puede surgir cuando un elemento de hormigón está expuesto a aire cálido y húmedo en uno lado y del otro a expuesto a frío la evaporación es insuficiente o está restringida, o cuando el hormigón está a una columna de agua durante un período prolongado antes del congelamiento.

2.3.1.1 Acción de las heladas en el hormigón.

Cuando la temperatura ambiental disminuye a valores bajo 0°C, el agua que se encuentra en los poros del hormigón se congela lo que causa un aumento de volumen del orden del 9%. Como consecuencia aparecen esfuerzos de tensión, que originan grietas, laminación del hormigón y desintegración.

La acción de hielo- deshielo ocurre principalmente por el agua que se encuentra en los poros capilares, pero por otra parte la presencia de espacios con aire puede reducir el efecto causado del hielo en el hormigón.

Se consideran los siguientes mecanismos para explicar el fenómeno:

- *Presión hidráulica:* en los primeros trabajos por Powers atribuyo los daños que las heladas provocaban en el hormigón a las tensiones generadas por la presión hidráulica en los poros. La presión se debía a los movimientos del agua que se alejaba de las regiones de congelamiento. Se creía que la magnitud de presión dependía de la velocidad de congelamiento, del grado de saturación, del coeficiente de permeabilidad de la pasta y de la longitud del recorrido del flujo hasta el lugar más próximo que permitía el escape del agua. Los beneficios del aire incorporado se explicaban en términos del acortamiento de los recorridos del flujo hasta los sitios de escape.
- *Presión osmótica:* más tarde Powers y Helmuth descubrieron que al ocurrir el congelamiento en los poros capilares existe una diferencia de concentración entre el hielo y el agua remanente. Cuando la pasta contiene aire ocluido y la distancia media entre las burbujas de aire no es demasiado grande, las burbujas compiten con los capilares por el agua no congelada y normalmente ganan esta competencia.
- *Sobrepresión del hielo:* Litvan, que también estudió la acción de las heladas, cree que el agua absorbida en la superficie o contenida en los poros más pequeños no puede congelarse debido a la interacción entre la superficie y el agua. La diferencia entre la presión de vapor del líquido no congelado y superenfriado y la presión de vapor del hielo en los alrededores del sistema de la pasta, el agua migrara hacia los sitios donde puede congelarse, como los poros de mayor tamaño o hacia la superficie exterior. Este proceso produce una disecación parcial de la pasta y acumulación de hielo en las fisuras y grietas. La falla ocurre cuando el agua no puede redistribuirse de manera ordenada, ya sea porque la cantidad de agua es excesiva o el recorrido de

migración es demasiado largo. Esto puede crear un aumento de tensiones internas y la mala distribución puede crear tensiones adicionales.

Diferentes propiedades relacionadas con la estructura de los poros dentro de las partículas del agregado, tales como la absorción, la porosidad, el tamaño de los poros y la permeabilidad pueden ser indicadores de potenciales problemas de durabilidad si el agregado se utiliza en un hormigón que durante su vida útil se saturara y congelara. En general son las partículas de agregado grueso que tienen valores de porosidad o absorción relativamente elevados las que se saturan más fácilmente y contribuyen al deterioro y la aparición de desconchaduras individuales en el hormigón. Los poros de mayor tamaño no suelen llenarse por completo de agua y por tanto no se producen daños.

Sin el aire incorporado la matriz de la pasta puede fallar cuando se satura críticamente y se congela. Si la matriz tiene una adecuada distribución de vacíos de aire incorporado caracterizada por un factor de separación menos que aproximadamente 0,20 mm el congelamiento no produce tensiones destructivas (Verbeck 1978).

De acuerdo con la Norma Europea EN 206 se definen cuatro clases de severidad del ataque, y acorde estas clases la misma norma define los valores límites de la composición y propiedades del hormigón.

Tabla 3 Clase de exposición para ataque de hielo/deshielo- (Norma EN206)

Clase	Descripción	Ejemplos
XF1	Saturación de agua saturada, sin agentes de deshielo	Superficies verticales de hormigón expuestas a la lluvia y a la helada
XF2	Saturación de agua moderada, con agentes de deshielo	Superficies verticales de hormigón de estructuras de carreteras expuestas a la helada y al aire que transporta a los agentes de deshielo
XF3	Saturación de agua elevada, sin agentes de deshielo	Superficies horizontales de hormigón expuestas a la lluvia y a la helada
XF4	Saturación de agua elevada, con agentes de deshielo	Carreteras y puentes expuestos a agentes de deshielo y superficies verticales expuestas directamente a salpicaduras de agentes de deshielo y a la helada. Zonas de estructuras marinas sometidas a salpicaduras y a la helada.

Según la EHE-08 tenemos otras clases de exposición relativas a la corrosión, y la que no interesa ahora es la del Ciclo hielo/deshielo.

Tabla 4 Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras Tabla 8.2.2 EHE-08

Clase específica de exposición				Descripción	Ejemplos
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 T ^a por debajo de -5°C.	Construcciones en zonas de alta montaña. Estaciones invernales.
	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 T ^a mínima en los meses de invierno inferior a 0°C	Tablero de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña, en las que se utilizan sales fundentes.

Tabla 5 Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento tabla 37.3.2.a EHE-08

Parámetros de dosificación	Tipo de hormigón	Clases de exposición	
		H	F
Máxima relación a/c	Masa	0.55	0.50
	Armado	0.55	0.50
	Pretensado	0.55	0.50
Mínimo contenido de cemento kg/m ³	Masa	275	300
	Armado	300	325
	pretensado	300	325

Tabla 6 Resistencias mínimas recomendadas en función de los requisitos de durabilidad Tabla 37.3.2.b

Parámetros de dosificación	Tipo de hormigón	Clases de exposición	
		H	F
Resistencia mínima	Masa	30	30
	Armado	30	30
	Pretensado	30	30

2.3.1.2 Agentes utilizados para eliminar el hielo.

Los materiales más evidentes que provocan la desintegración superficial, como en pavimentos de hormigón, son las sales como el cloruro sódico o cloruro de calcio.

Los mecanismos mediante el cual los agentes descongelantes dañan el hormigón son de naturaleza física. Esto involucra el desarrollo de presiones osmóticas e hidráulicas durante el congelamiento. La concentración de descongelantes en el hormigón juega un papel importante. Litvan concluyó que los agentes descongelantes

pueden provocar un elevado grado de saturación en el hormigón, y que esta es la principal causa de su efecto perjudicial. Para una temperatura dada la presión de vapor de las soluciones salinas es menor que la del agua, por lo tanto, el secado que se produce entre ciclos de humedecimiento y enfriamiento es escaso o nulo.

Los beneficios que se obtienen incorporando aire al hormigón expuesto a productos descongelantes se explican de la misma manera que la acción de las heladas. Se confirma que la incorporación de aire mejora sustancialmente la resistencia a los descongelantes.

2.3.1.3 Recomendaciones para lograr estructuras durables

El hormigón que este expuesto a ciclos de hielo- deshielo tiene las siguientes exigencias:

- a) *Un diseño de la estructura que minimice su exposición a la humedad:* debemos tomar la precaución de minimizar el ingreso de agua y la geometría de la estructura debería promover un buen drenaje. Se deberían eliminar juntas que no estén relacionadas con los cambios de volumen. También se deberán tomar precauciones para minimizar las fisuras que pudieran acumular o transmitir el agua.
- b) *Baja relación a/c:* los valores de la relación a/c, que debería tener un hormigón de peso normal, son de 0.45 para unas secciones delgadas y expuesto a sales anticongelantes, y 0.50 para las demás estructuras.
- c) *Adecuada incorporación de aire:* una cantidad excesiva de aire incorporado no protegerá a la pasta, eso podría provocar una reducción de resistencia. El hormigón con aire incorporado se elabora agregando un aditivo en la hormigonera. El contenido depende de factores como los materiales utilizados, la correcta dosificación, el tiempo de mezclado, la temperatura, etc. Según la EHE-08 para la clase de exposición F el contenido de aire ocluido mínimo debe ser del 4,5%.

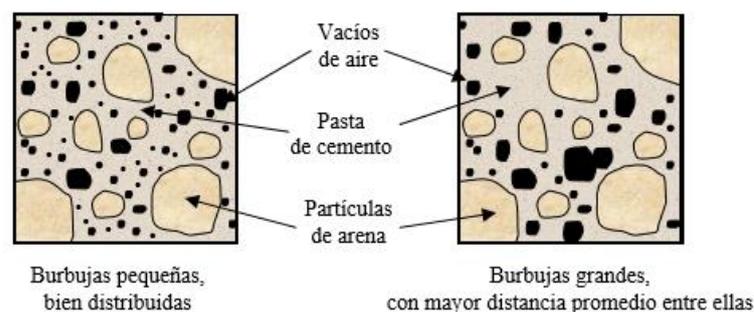


Ilustración 1. Un ejemplo de la forma correcta de integración del aire de forma intencional y la incorrecta. La cantidad de aire es la misma en ambos casos.

- d) *Materiales de buena calidad:* la mayoría de las cenizas volátiles y puzolanas que se usan como aditivos no afectan a la durabilidad del hormigón, siempre que el contenido de aire, la resistencia y el contenido de humedad del hormigón sean similares. Si los materiales no son los habitualmente utilizados se deberán hacer ensayos.

- e) *Un curado adecuado, antes del primer ciclo de congelamiento:* siempre que no haya una fuente de humedad externa el hormigón debería de soportar los efectos de congelamiento tan pronto como alcance una resistencia a compresión de aproximadamente 3.45 MPa. A una T^a de 10°C la mayoría de los hormigones correctamente dosificados alcanzan esta resistencia al segundo día. Antes de ser expuestos a un congelamiento en condición de saturación crítica el hormigón debería alcanzar una resistencia de unos 27.6 MPa. Es recomendable un periodo de secado posterior.
- f) *Prestar atención a las prácticas constructivas:* se debe prestar particular atención a la construcción de las losas de pavimentos que posteriormente estarán expuestas a agentes químicos descongelantes. Antes de aplicar cualquier descongelante, el hormigón deberá de recibir algún tipo de secado. En el caso de hormigones con aditivos, éstos no se deben de humedecer excesivamente antes del mezclado. Si se utilizan saturación por vacío o métodos térmicos es posible que los aditivos alcancen un nivel de humedad con el cual el agua absorbida provocara la falla del hormigón cuando este sea sometidos a ciclos de hielo- deshielo.

2.3.2 Abrasión- Erosión

La Abrasión o Erosión puede ser definida como el desgaste de la superficie para resistir el desgaste por frotamiento y fricción. A veces se considera que es necesaria la acción de un material duro en otro material más blando como requisito, pero este no es el caso. Después de un periodo significativo de tiempo el material blando puede llevarse poco a poco al material duro.

Es un proceso muy lento, al menos que esté sujeto a otro mecanismo. Para un hormigón armado convencional, la abrasión es probable que sea de la mayor parte de una preocupación si el resultado es una superficie irregular para el tráfico, o si reduce significativamente la parte superficial. Las superficies irregulares a veces forman charcos de agua lo puede acelerar el proceso de absorción. Cuando el agua está atrapada, mientras esté sujeta a una serie de cargas, en el plano horizontal se forma una presión significativa. Esto puede llevar rápidamente a socavar superficies circundantes, o sacar a la luz los defectos existentes, lo que conduce a generar más degradación en el hormigón. La habilidad que tiene el agua de buscar grietas y perturbar el hormigón ha llevado a usar la presión de agua super alta como un remedio efectivo de eliminación de hormigón, una técnica conocida como hidrodemolicion.

El acto de auto-reparación puede llevar a la degradación física de la matriz del hormigón. Para áreas digeridas al tráfico rodado es requerida una vuelta al servicio rápida por lo que se usan materiales de alta resistencia, por siguintes son materiales con un coeficiente de Young alto.

Un hormigón de alta calidad adecuadamente puesto en obra y bien curado puede minimizar el riesgo de abrasión.

2.3.2.1 Factores que afectan la resistencia a la abrasión del hormigón

La resistencia a la abrasión del hormigón es un fenómeno progresivo. Inicialmente la resistencia está relacionada con la resistencia a la compresión en la superficie de desgaste. A medida que la pasta se desgasta los agregados finos y gruesos quedan expuestos, la abrasión y los impactos provocaran una degradación

adicional relacionada con la resistencia de la adherencia entre la pasta y los agregados de los mismos.

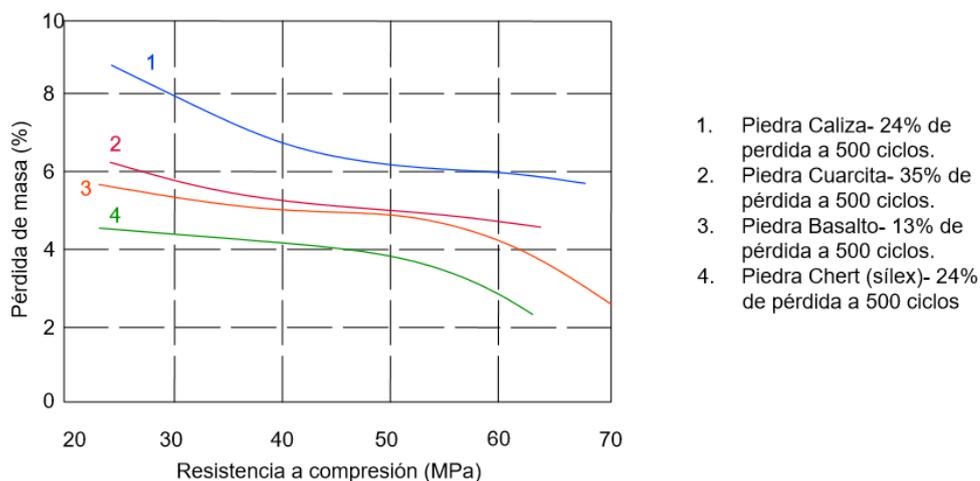
Algunos ensayos realizados y la experiencia en la obra nos indican que la resistencia a la compresión del hormigón es proporcional a su resistencia a la abrasión. Debido a que la abrasión ocurre en la superficie, es crítico maximizar la resistencia superficial. La resistencia se puede incrementar utilizando mezclas para espolvorear en seco y capas de acabado, técnicas de acabado y procedimientos de curado adecuados.

Para una mezcla de hormigón determinada, la resistencia a la compresión de la superficie se puede mejorar siguiendo los siguientes consejos:

- g) Evitando la segregación de los componentes
- h) Eliminando la exudación
- i) Estableciendo un adecuado cronograma para el acabado
- j) Minimizando la relación a/c superficial, prohibiendo agregar agua a la superficie para facilitar el acabado
- k) Trabajando la superficie con un fratás duro
- l) Utilizando procedimientos de curado adecuado.

Una dosificación económica para lograr mayor resistencia a la compresión incluye el uso de una relación a/c mínima y agregados de tamaño adecuado. La vida de servicio de algunos hormigones aumenta considerablemente si se utilizan agregados especialmente fuertes o resistentes.

Los agregados especiales se pueden incorporar ya sea utilizando el método de espolvoreado en seco o como parte de una mezcla para una capa de acabado de alta resistencia.



Grafica 1. La influencia del tipo de agregado y la resistencia del hormigón en la resistencia del desgaste por abrasión.

Si la abrasión es la principal consideración de diseño, incorporar agregados de cuarzo, trapa o esmeril de alta calidad y correctamente dosificados junto con el cemento puede

umentar la resistencia al desgaste, mejorando la resistencia a la compresión en la superficie. Para lograr aún más resistencia a la abrasión y prolongar la vida de servicio de la superficie se puede optar por utilizar una mezcla de agregados metálicos y cemento.

2.3.3 Cavitación.

La cavitación ocurre cuando los líquidos son sometidos a un cambio en la presión en el punto donde la presión en el líquido está por debajo de su presión de vapor. Esto produce burbujas en el líquido lo que posteriormente colapsa y producen ondas de choque. Esto puede ocurrir en un ambiente muy agresivo y en sitios donde la probabilidad de abrasión es alta. Este proceso es aceptado como un mecanismo de erosión costera, mediante el cual las bolsas de aire dentro del agua se ven obligados a fisurarse. El constante flujo de entrada de agua da como resultado el colapso de los bolsillos y acaba produciendo una serie de ondas de choque cuyo resultado es la degradación.

2.3.4 Exfoliación.

La exfoliación es causada por un mecanismo similar que el daño por heladas, en que la estructura de poros se rellena con un material que se expande posteriormente. En este caso se trata de una solución que contiene sales solubles. Como el contenido de humedad disminuye, la solución se concentra más y más hasta que las sales solubles vuelven a recristalizarse. Las sales recristalizadas pueden ser más grandes que las de la solución original, y así el estrés de las tensiones es repartido por todo el hormigón.

Se debe observar que la superficie del hormigón que está expuesta a la solución no es la única que sufre de exfoliación. Si una de las caras del hormigón se encuentra adyacente a una alta concentración de solución, y la otra está expuesta a un entorno seco, las sales pueden hacer un significativo recorrido hasta la cara seca, donde la recristalización toma el lugar.

En el proceso de la exfoliación están implicadas más de un tipo de sales solubles, el más común es el cloruro sódico aunque una sal más soluble que la anterior puede causar el mismo efecto. Como regla general las sales con alta solubilidad son todos los nitratos y sodios, potasio y amonio. Hay que decir también que la solubilidad incrementa con los cambios de temperatura, y con ella la densidad y el volumen.

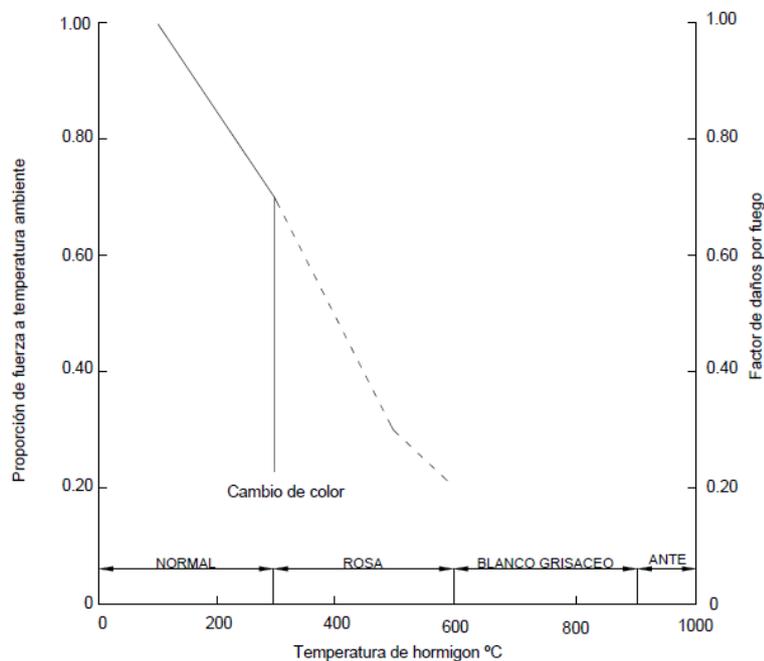
Para controlar el riesgo de exfoliación o ataques por heladas, un enfoque sería prevenir el ingreso significativo de sales o evitar el secado de la superficie. Normalmente un correcto revestimiento proporcionaría la protección contra el ingreso de sales, pero un revestimiento permeable al vapor incrementaría el secado de la superficie del hormigón, y el resultado sería la exfoliación.

2.3.5 Fuego

La primera cosa que tenemos que decir es que el hormigón es la forma básica de protección para el acero estructural. Cuando hidratamos el cemento empleamos una gran cantidad de agua. En el caso de fuego, la temperatura se incrementa, los componentes hidratados se descomponen y liberan el agua, disipando calor y energía. Esto significa que mientras la superficie del cemento sea el objetivo de altas temperaturas la gravedad y profundidad de daños puede ser limitada.

Si la temperatura del hormigón no supera los 300°C la resistencia residual, al enfriarse, consideramos que no se tiene daños significativos. La reducción de resistencia a menudo es compensada con que el hormigón tienda a tener más potencia de la requerida por la capacidad de la estructura original. A menudo creemos que la resistencia del hormigón con el paso del tiempo se eleva, pero no es así.

La temperatura a la que ocurren grandes deterioros en el hormigón a menudo coincide con el cambio de color en muchos hormigones, donde el material desarrolla un color rosa. Esta decoloración se debe a la presencia de sales de hierro en los agregados. El nivel de daño por calor y degradación del hormigón debe ser confirmado usando análisis petrográfico con muestras. Cuando las temperaturas exceden los 500°C la resistencia se ve gravemente comprometida.



Gráfica 2. Efecto del calor sobre la fuerza de compresión del hormigón después de enfriar.

La curva de degradación depende de muchos factores incluyendo el tipo de agregado. Los agregados de caliza empiezan a descomponerse a una temperatura relativa baja si lo comparamos con los de silicio, que se descomponen más gradualmente y a unas temperaturas más elevadas, hecho que afecta al rendimiento del hormigón.

En cuanto a efectos del fuego, el agua libre presente se calienta y empieza a expandirse. Si los poros son relativamente abiertos la presión puede disiparse. En hormigones densos e impermeables no existe el medio de disipación de presión debido a la rotura que se produce de forma explosiva. Este tipo de daño es más peligroso por la rápida pérdida de hormigón.

Es importante también tener en cuenta el efecto que tiene el calor sobre el acero. Si calentamos un acero a 450°C y después le permitimos volver a estar a una temperatura ambiente normalmente es poco probable que afecte al acero estructural.

Por encima de 550°C el acero empieza a deformarse de forma plástica, y si lo calentamos aún más pueden producirse cambios internos. Es normal que los aceros tengan tratamientos para lograr mayor resistencia pero que no aguantan bien el fuego. Estas cosas a tener en cuenta son importantes a la hora de evaluar los daños en una estructura.

En general, reparar una estructura dañada por el fuego implica retirar y sustituir el material deteriorado, normalmente, por un material cementicio. Antes de empezar la reparación es necesario comprobar la integridad de la estructura. El proceso de reparación implica la eliminación de hormigón abarcando un área mayor que la dañada. El material de reparación debe ser de una capacidad estructural similar a la requerida y se aplicara usando técnicas variadas, como por ejemplo, el rociado de hormigón, un hormigón autocompactante o aplicado a mano. Para más información sobre la reparación se puede consultar la norma europea EN 1504.

2.4 Fisuración

La *fisuración* del hormigón puede causarse por diversos motivos y la aparición de la misma nos indica importantes problemas estructurales y falta de durabilidad, además de afectar a la apariencia de la estructura. Pueden indicar la totalidad del daño o ser el principio de un problema mayor. Las fisuras solo se pueden reparar si se conocen las causas y para conseguir una reparación con éxito no solo se debe arreglar las propias fisuras sino también atacar las causas de las mismas.

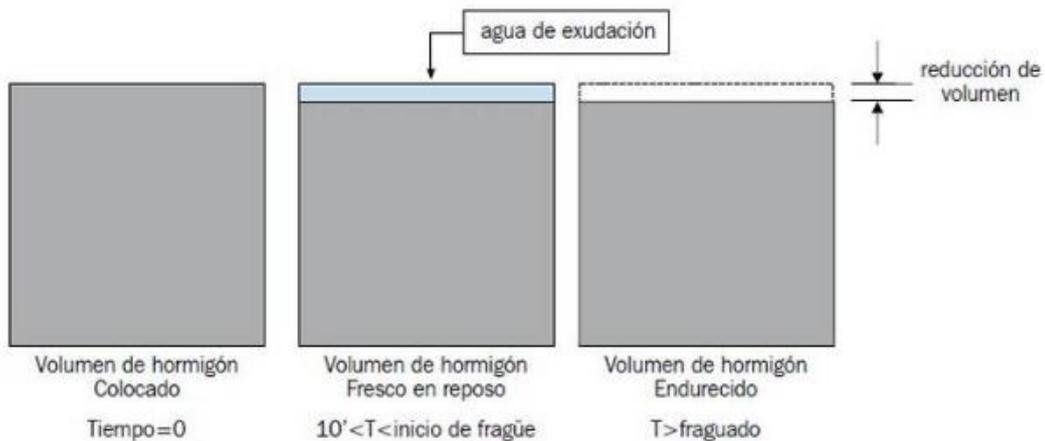
Las fisuras pueden producirse bien cuando el hormigón está en estado fresco, *fisuración por retracción plástica*, o bien cuando el hormigón ya pasa a estar endurecido, *retracción por secado*. Existen otras causas relacionadas con la respuesta del hormigón a las cargas, estructural, *microfisuración*, pero queda fuera del alcance de este trabajo.

2.4.1 Fisuración por retracción plástica

Este tipo de fisuración ocurre cuando está sujeto a una pérdida de humedad muy rápida provocada por factores como las temperaturas del aire y del hormigón, la humedad relativa y la velocidad del viento en la superficie del hormigón.

Después de colocado y compactado el hormigón experimenta una segregación de sólidos que se desplazan hacia abajo y el agua de amasado se desplaza hacia la superficie del hormigón, fenómeno llamado *exudación*. El *asentamiento plástico* se produce por la disminución del volumen.

Esquema 3. Proceso de fisuración en estado fresco. (Edgardo Becker)



En un hormigón recién colocado, en la fase de fraguado, si la humedad que se evapora, reacción exotérmica con desprendimiento de calor, de la superficie del mismo es más rápido de lo que puede ser reemplazada por el agua de exudación, la superficie del hormigón se contrae y se crean tensiones de tracción que provocan fisuras poco profundas, *fenómeno de retracción plástica*. En este fenómeno influyen la temperatura ambiente y el viento, la finura de molido, contenido de silicato tricálcico y de aluminato tricálcico. Suelen ser bastante anchas y de longitud variable.

Aun después de fraguado el hormigón sufre cambios de volumen debido a la pérdida del agua de cristalización del gel que rodea al cemento, produciéndose la *retracción hidráulica*, y por lo tanto fisurándose.

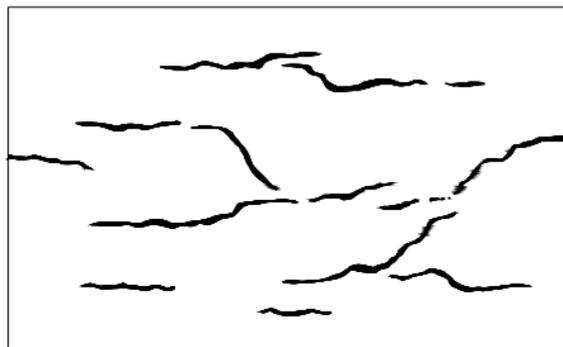
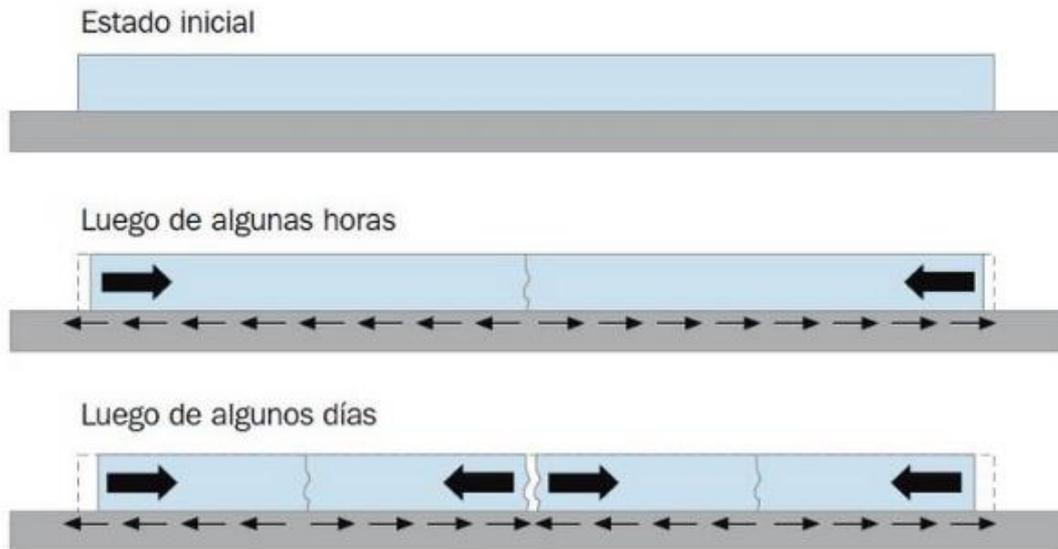


Ilustración 2. Fisuración por retracción plástica. (ACI 224)

2.4.2 Retracción por secado.

La retracción por secado se produce por la pérdida de humedad de la pasta de cemento, la cual se puede contraer hasta un 1% (si la pasta lleva agregados la contracción de volumen se reduce a un 0.06%). El hormigón húmedo tiende a expandirse y los cambios de volumen son inevitables. Estos cambios de volumen producen tensiones de tracción en el hormigón y cuando se supera la resistencia a tracción éste se fisura. Hay diversos factores que afectan a la magnitud de las

tensiones de tracción, como por ejemplo, el módulo de elasticidad, la magnitud de restricción, la magnitud de fluencia lenta o la magnitud de retracción. La magnitud de la retracción depende de tipo de agregados y del contenido de agua. Cuanta menos cantidad agua haya y mayor cantidad de agregados mayor será el efecto de reducir la retracción.



Esquema 4. Fisuración de una losa de hormigón. Es recomendable la realización de juntas de contracción. (Edgardo Becker)

El hormigón también es sensible a los cambios de temperatura. La diferencia de temperatura puede provocarse, dentro de la misma estructura de hormigón, porque o bien partes de la estructura pierden calor de hidratación a diferentes velocidades o por las condiciones climáticas que enfrían o calientan una parte de la estructura con temperatura o velocidad diferentes. Este fenómeno provoca cambios de volumen y se denomina como *fisuración por restricción*.

Algunas reacciones químicas también pueden ser causa de fisuración del hormigón. Pueden ser producto de los materiales utilizados para preparar el hormigón o materiales que entran en contacto con el mismo después de endurecerse. Después de algún tiempo el hormigón puede llegar a fisurarse como resultado de reacciones expansivas de adiciones que contiene sílice y los álcalis derivados de la hidratación del cemento, aditivos o fuentes externas como el agua de curado. A excepción de la carbonatación superficial, es poco lo que se puede hacer para proteger o reparar el hormigón que haya sido expuesto a ataques químicos adecuadamente.

Otro proceso que puede provocar la fisuración es el proceso de *meteorización*, esto incluye ciclos de hielo- deshielo, humedecimiento, secado, calentamiento y enfriamiento; además de prácticas inadecuadas constructivas, la corrosión de las armaduras y errores de diseño y de detalles entre otros.

2.4.3 Método de reparación de fisuras.

Antes de empezar a reparar las fisuras debemos identificar su ubicación y extensión. Es necesario establecer las causas de la fisuración y se deberá revisar los planos, especificaciones y registro de construcción y mantenimiento.

Se puede determinar la magnitud de la fisuración mediante observaciones directas e indirectas, ensayos no destructivos y destructivos, ensayos de testigos extraídos de la estructura. Es preferible la realización de ensayos no destructivos si es posible.

Una vez evaluada la causa y la magnitud de la fisura podemos seguir los siguientes procedimientos para lograr la mayor eficacia:

- a) Restablecer y aumentar la resistencia de la estructura
- b) Restablecer y aumentar la rigidez
- c) Mejorar la funcionalidad
- d) Lograr impermeabilidad
- e) Mejorar la apariencia de la superficie de hormigón
- f) Mejorar la durabilidad
- g) Impedir que se desarrolle un ambiente corrosivo en las armaduras.

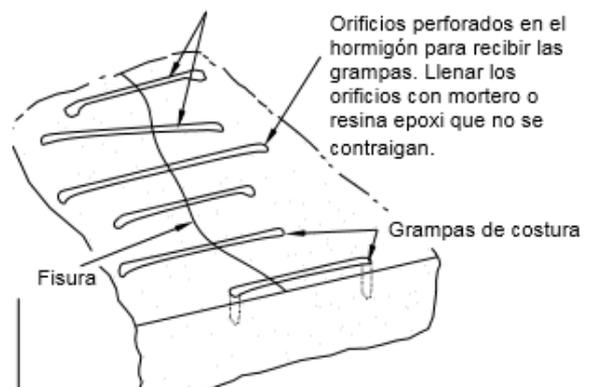
El método de reparación varía dependiendo de la naturaleza de los daños. Por ejemplo, si la fisuración se originó gracias a la retracción por secado es probable que después de un tiempo la fisura se estabilice. Por el contrario si las fisuras se deben a un proceso de asentamiento que aun continua, las reparaciones serán inútiles hasta que no se corrija el problema del asentamiento.

A continuación se explicarán algunos métodos de reparación y las fisuras que se puede reparar con ellas.

1. *Inyección de resinas epoxi*: con este método se puede adherir fisuras de muy poca abertura, hasta 0.05 mm. Esto consiste en establecer bocas de entrada y venteo a intervalos poco espaciados a lo largo de las fisuras, sellar la fisura en las superficies expuestas e inyectar la resina epoxi a presión.
2. *Perfilado y sellado*: se aplica para una reparación inmediata y cuando no es necesario hacer una reparación estructural. El método consiste en agrandar la fisura a lo largo de su cara expuesta, llenarla y sellarla con un sellado adecuado. Se usa tanto para fisuras finas de patrón irregular como para fisuras aisladas de mayor tamaño.
3. *Costura de fisuras*: consiste en perforar orificios a ambos lados de la fisura, insertar unidades metálicas en forma de U de patas cortas y asegurarlas con mortero. Se utilizan cuando es

Ilustración 3. Costura de una fisura. (ACI 224)

Observar longitud, ubicación y orientación variables de las grampas para distribuir la tensión a lo largo de la fisura y no concentrarla en un único plano.



necesario restablecer resistencia a la tracción en fisuras importantes. Es posible que al coser una fisura se provoquen otras fisuras.

4. *Llenado con mortero:* se suelen utilizar morteros de cemento portland y morteros químicos. Llenado con mortero de cemento portland se usan para detener fugas de agua, pero no unen estructuralmente las secciones fisuradas. Consiste en limpiar el hormigón, instalar asientos armados a intervalos sobre la fisura, sellar la fisura con pintura cementicia, sellador o mortero, lavar la fisura y probar el sellado, y al final llenar toda el área con mortero.

El mortero químico consiste en una solución de dos o más productos químicos, como uretanos, silicatos de sodio, que se combinan para formar un gel o precipitado sólido. Con este mortero se llenan fisuras de apertura de hasta 0.05 mm. Una de las ventajas de este mortero es su aplicación en ambientes húmedos.

5. *Llenado por gravedad:* se usan monómero y resinas de baja viscosidad para sellar fisuras con ancho superficial entre 0.03 a 2 mm. Se pueden usar también metacrilatos de alto peso molecular, uretanos y algunas resinas epoxi de baja viscosidad.

Otros métodos que no se explicaron son el autocurado; sobrecapas y tratamientos superficiales; impregnación con polímero; colocación de mortero como mezcla seca; inserción de armadura adicional; etc.

2.5 Mecanismos de deterioro químicos.

El hormigón se comporta bastante decente bajo exposición a diferentes condiciones atmosféricas, a la mayoría de la exposición de las aguas y suelos que contienen químicos. Sin embargo existen algunos ambientes químicos en los que la vida útil del mejor hormigón será breve.

El hormigón puede sufrir daños químicos por la contaminación añadida durante la fabricación o por la acción de agentes agresivos exteriores, o por la combinación de los dos. El deterioro del hormigón debido a reacciones químicas se manifiesta de diferentes maneras, como incremento de la porosidad y permeabilidad, disminución de la fuerza, agrietamiento, disolución y desprendimiento.

En la tabla de a continuación se puede ver la velocidad de degradación de distintos tipos de ataques químicos en el hormigón a temperatura ambiente.

Tabla 7. Velocidad de actuación de distintas sustancias químicas sobre el hormigón.

Velocidad de degradación	Ácidos Inorgánicos	Ácidos Orgánicos	Soluciones Alcalinas	Soluciones Salinas	Otras Sustancias
Rápido	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico Bromhídrico	Acético Fórmico Láctico		Cloruro de aluminio	

Moderado	Fosfórico	Tánico	$\text{Na}(\text{OH})_2 < 20\%$ (hidróxido de sodio) (*)	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gas)
Lento	Carbónico		$10\% < \text{Na}(\text{OH})_2 < 20\%$ (hidróxido de sodio)	Cloruro de magnesio Cloruro de amonio Cianuro de sodio	Agua de mar Aguas blandas Cloro (gas)
Sin ataque		Oxálico Tartárico	$\text{Na}(\text{OH})_2 < 10\%$ (hidróxido de amonio)	Cloruro de sodio Cloruro de calcio Nitrato de cinc Cromato de sodio	Amoníaco (líquido)

(*) Agresivo en presencia de agregados silíceos.

Los ataques químicos, como se observa, son múltiples pero nosotros vamos a destacar los ataques por sulfuros, reacción ácido-álcali y la corrosión de armaduras.

2.5.1 Ataque por sulfatos.

El ataque por sulfatos es la reacción química más importante que puede producirse en el hormigón. Estos ataques son generalmente formados por la sal y mezclas de sulfuros con otros componentes, como el sodio y el magnesio, formando Na_2SO_4 y MgSO_4 . Se producen debido a la reacción entre los productos destinados a hidratar el cemento y los sulfuros al que se expone el hormigón. El producto de estas reacciones ocupa un volumen mayor que los reactivos del propio cemento, y por lo tanto causan una expansión interna de la pasta, cosa que produce tensiones de tracción localizadas dentro del hormigón endurecido.

Los ataques de sulfatos se manifiestan en forma de agrietamiento, desprendimiento y pérdida de masa, cuya consecuencia es la pérdida de sección del área o un completo deterioro de los elementos estructurales del hormigón. Este completo deterioro del hormigón debido a ataques de sulfatos puede tardar años en llevarse a cabo.



Ilustración 4. Ejemplo de ataques por sulfatos en el hormigón.

2.5.1.1 Mecanismos de ataque

Hay estudios que revelan que los ataques de sulfatos se contribuyen en mayor parte a la formación de etringita³ expansiva ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) y el yeso que puede ir acompañado de la expansión o reblandecimiento del hormigón. El otro efecto es la formación de taumasita⁴, la descalcificación del gel silicato de calcio hidratado, y la pérdida eventual de la estructura del cemento. Podemos decir que hay dos tipos de ataques por sulfatos: ataques internos y externos.

2.5.1.2 Control de calidad del hormigón.

El grado en el que los ataques de sulfatos afectan al hormigón depende de muchos factores, incluyendo la composición química del cemento, la calidad del hormigón (la permeabilidad, tipo de materiales utilizados, la relación agua/cemento, calidad de colocación y buen curado), la concentración de iones de sulfuros que vienen de fuentes externas y la severidad de la exposición de hormigón al medio ambiente sulfurado.

Mientras que el aluminato de tricalcio reducido puede ayudar a crear una mezcla resistente al sulfato, muchos investigadores afirman que para lograr la máxima resistencia del hormigón éste debe ser de buena calidad y baja permeabilidad.

Como ya mencionamos en otros apartados, para mejorar la calidad y la permeabilidad del hormigón es recomendable una baja relación a/c; incrementar el contenido del cemento, consolidar el hormigón adecuadamente durante la colocación; proporcionar un curado adecuado; sustituir un porcentaje de cemento por adiciones. El objetivo de usar el hormigón de baja permeabilidad es minimizar la penetración de iones de sulfuros, esto disminuirá la formación de la perjudicial etringita.

El hormigón se considerara suficientemente impermeable al agua si los resultados obtenidos de ensayos⁵ de penetración de agua cumplen simultáneamente que:

Tabla 8. Profundidad de penetración de agua, s/EHE-08

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

El uso de materiales suplementarios como cenizas volantes, humo de sílice o puzolanas puede proporcionar una mejor resistencia a ataques de sulfuros que solo el cemento portland resistente a sulfatos sin adiciones.

³ Es un sulfoaluminato de calcio hidratado que se forma durante las primeras etapas de hidratación del cemento portland a partir de la reacción de la fase aluminato del Clinker con el yeso empleado para retardar el fraguado.

⁴ Es un mineral de la clase de los minerales sulfatos y su presencia produce daños irreparables de manera expansiva o por desintegración del gel C-S-H a una velocidad lenta.

⁵ UNE-EN 12390-8: Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.

2.5.2 Reacción álcali-árido

La reacción álcali-árido se produce cuando los áridos que contienen minerales silicatados reactivos interactúan con los álcalis del cemento. El resultado de esta reacción es la formación de geles que se expanden en presencia de humedad y se manifiestan en forma de grietas y movimientos diferenciales. Por consiguiente podemos decir que este proceso viene determinado en gran medida por la humedad relativa del ambiente y la tensión mecánica de la estructura.

2.5.2.1 Álcali- Silicato:

Las reacciones que se producen son principalmente dos:

- h) La neutralización de los radicales Si-OH a través de una reacción ácido-base por la solución alcalina con sosa caustica $\text{Na}^+ \text{OH}^-$.
- i) Ataques de los puentes siloxano (Si-O-Si) por parte de los iones OH^- , lo que provoca una desintegración de la estructura y el paso de la sílice en solución al estado de iones positivos (H_2SiO_4).

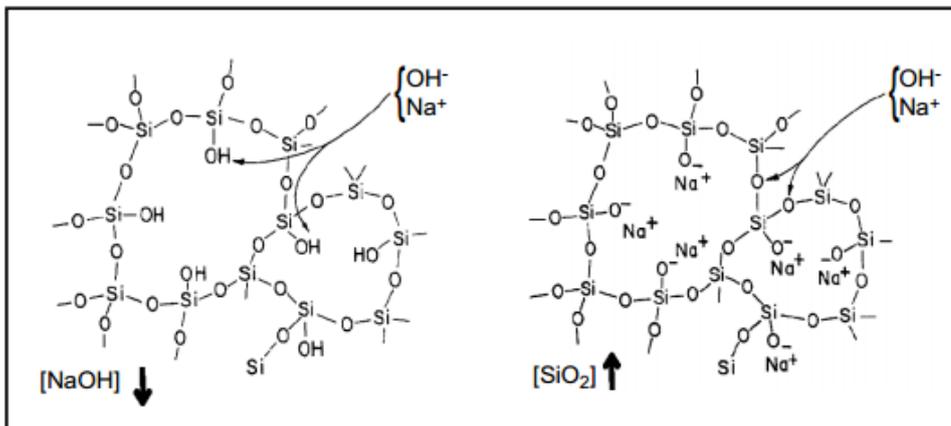


Ilustración 5. Fases de la reacción álcali- silicatos.

La expansión producida por la reacción álcali- silicatos está influenciada también por la geometría de la pieza del hormigón, la presencia de armadura y la carga aplicada.

La anchura de las macrofisuras en la superficie del hormigón puede oscilar desde menos de 0,1 mm hasta más de 10 mm en casos extremos. Si la expansión no ha finalizado, las anchuras de las fisuras se incrementarán durante periodos de prolongado tiempo húmedo.

Las macrofisuras se localizan normalmente en 25-50 mm de la superficie expuesta de la pieza de hormigón y están alineadas perpendiculares a la superficie expuesta.

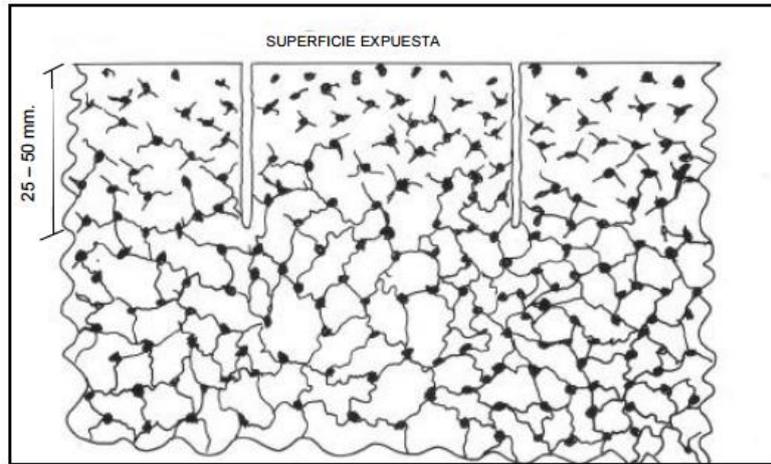


Ilustración 6. Modelo idealizado de micro y macro fisuras en el hormigón

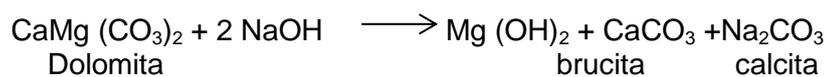
2.5.2.2 Álcali- Carbonato:

La reacción álcali- carbonato se produce cuando las rocas carbonatadas forman parte del hormigón como áridos. Puede haber dos formas de reacción:

- j) Una forma de reacción que se produce es entre los álcalis presentes en los poros del hormigón y las rocas carbonatadas;
- k) Cuando las partículas de los áridos entran en contacto con la pasta de cemento se modifican y forman bordes sobresalientes entre la partícula y la pasta.

Desdolomitización:

La desdolomitización, proceso por el cual la roca con dolomita se transforma en una roca con calcita, se asocia con la reacción álcali- carbonato expansivo⁶. La desdolomitización prosigue de acuerdo con la siguiente ecuación⁷:



La reacción de desdolomitización y la cristalización de la brucita (Mg (OH)₂) hace que la desdolomitización sea un proceso continuo y pueden causar una expansión considerable.

⁶ Hadley (1961)

⁷ Ozol (1994)

3. EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN.

La corrosión es una de las causas más comunes de deterioro en el hormigón armado. La EHE recoge algunos modelos de análisis de los procesos de degradación en el Anejo 9. Estado Límite de Durabilidad. El estado de límite se comprueba verificando que el valor estimado supere al valor de cálculo mínimo exigible.

Este fenómeno tiene lugar cuando se altera la protección de hormigón que le corresponde a cada estructura, al formarse una capa que pasiva la interfaz hormigón-acero. La pasta no carbonatada tiene un pH mínimo de 12.5 y con este pH el acero no se corroe. Si el pH disminuye es posible que haya corrosión. La carbonatación de la pasta de cemento portland puede disminuir el pH a valores de 8-9, cosa que provoca la corrosión. Si hay humedad y una fuente de oxígeno la presencia de iones cloruro solubles en agua por encima de un umbral de 0.2% (0.4% cloruro de calcio) en masa de cemento la corrosión se puede acelerar. El parámetro para el cloruro es como el porcentaje en masa de cemento portland.

La iniciación de la corrosión y su desarrollo lo explica el modelo de vida útil de **Tuutti** (1982), un modelo sencillo pero sin una base matemática, en la siguiente gráfica:

En la iniciación el agente agresivo atraviesa el recubrimiento del hormigón y alcanza el acero provocando el deterioro de la capa de óxido protector, y en el periodo de propagación se produce la corrosión activa del acero hasta llegar a un estado inaceptable.

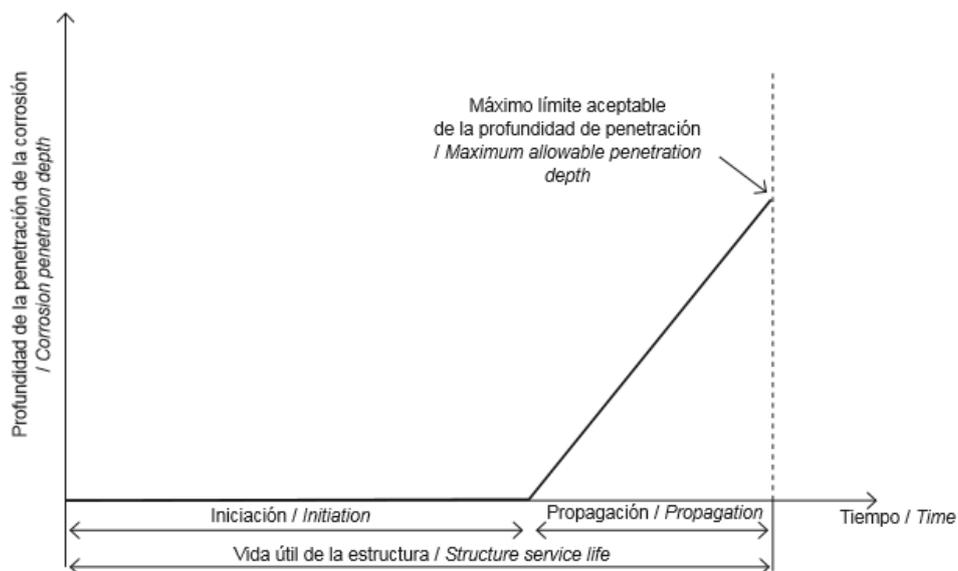


Ilustración 7. Modelo de vida útil de Tuutti

3.1 Principios de la corrosión.

La corrosión del acero generalmente es un proceso electroquímico en el cual se desarrolla un ánodo, donde se produce oxidación, y un cátodo, donde se produce reducción.

En el ánodo se liberan electrones y se forman iones ferrosos $\text{Fe} \leftrightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$; y en el cátodo se liberan los iones hidroxilo $\frac{1}{2} \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{4} \text{O}_2 + \text{e}^- \leftrightarrow \text{OH}^-$; y luego esos iones se combinan con el oxígeno.

Inicialmente se produce hidróxido ferroso de color verdoso y óxido ferroso-férrico de color negro e hidróxido férrico de color rojizo. Si no se dispone de suficiente oxígeno no se forma el óxido expansivo ya que no se podría formar el hidróxido ferroso.

- l) Hidróxido ferroso: $\text{Fe}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- m) Hidróxido férrico: $4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4 \text{Fe}(\text{OH})_3$
- n) Óxido de hierro hidratado: $2\text{Fe}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O}$

El agua y el oxígeno forman parte de la elaboración del óxido, aparte de eso necesitamos el agua solo para disolver los iones de hierro, ya que no toma partido en la reacción del ánodo.

La transformación del hierro en óxido nos lleva a un incremento de volumen 6,5 veces el tamaño original del metal, que es la principal causa de la expansión y fisuración del hormigón.

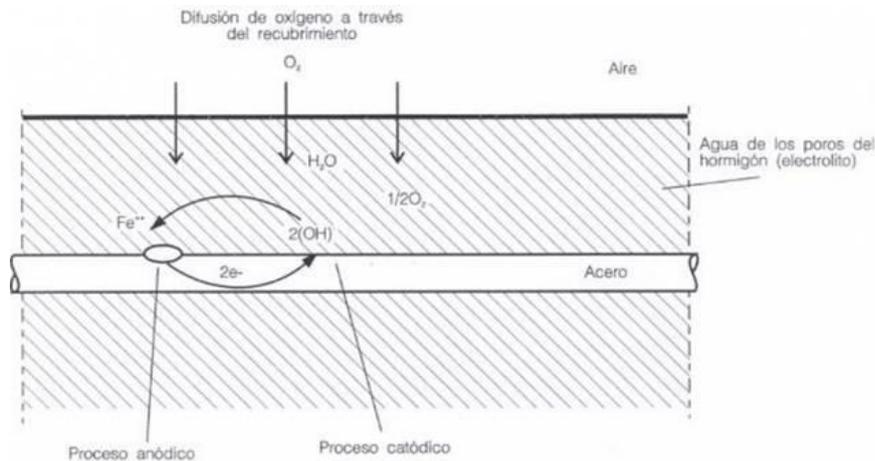


Ilustración 8. Formación de la corrosión de armaduras en el hormigón.

Puede haber dos tipos de expansión del oxígeno:

- o) *Formación de óxido expansivo*: este tipo de expansión lleva al hormigón al agrietamiento y desprendimiento. El origen pueden ser tanto las esquinas, zonas de bajo recubrimiento, y suele ocurrir en forma de láminas que se propaga entre las barras de la armadura.
- p) *Formación de óxido no expansivo*: para la formación del óxido es necesaria la presencia de la humedad para poder disolver los iones de hierro con la ayuda del oxígeno y del agua. Si el hormigón está saturado o cerca de saturarse, pero

con un cátodo oxigenado cerca y una baja resistencia eléctrica a través del acero y el hormigón, el hierro puede disolverse y quedar como solución. Este tipo de corrosión puede producirse muy rápidamente.

3.1.1 Tipos de corrosión.

Podemos clasificar los tipos de corrosión según su uniformidad, si esta picado, si es provocado por bacterias, corrosión galvánica, agrietamiento, etc. Los más importantes son los provocados por exposición a cloruros y carbonatación.

q) *Corrosión uniforme:*

La corrosión uniforme se produce cuando las zonas anódicas y catódicas se encuentran muy cerca unas a otras y eso hace que tiendan a unirse en la barra de acero. Este tipo de corrosión es más común en las estructuras expuestas a *carbonatación*.

r) *Corrosión por picado:*

Se produce cuando la zona anódica es mucho menor que la catódica pero actúa con mucha más rapidez y esto hace que la corrosión sea localizada. Suelen formarse unas pequeñas picaduras en la superficie del acero. Lo podemos observar en el ataque por *cloruros* y se genera un ambiente altamente agresivo. Este ataque es uno de los más severos que puede sufrir el acero ya que pierde zonas de masa localizada y resistencia.

3.1.2 Pasivación del acero en el hormigón.

Existen muchos tipos de óxido en hierro y acero formados en diferentes condiciones. El hierro puede corroerse en una rápida línea recta, una controlada parabólica o en una lenta logarítmica, dependiendo de las propiedades y calidad del óxido formado y del entorno en el que se forma.

En condiciones atmosféricas, el número de factores influyen en la naturaleza de la corrosión, y por lo tanto en la velocidad de la misma. Una de las cosas más importantes es el pH de la superficie del acero. Si el pH es más alto que 10.5, una capa de óxido pasivo se forma en la superficie del acero. Esta capa pasiva generalmente suele aparecer como una densa película de FeOOH de un orden de 1 nanómetro de espesor. Sin embargo, es difícil que en el hormigón se forme una densa capa de minerales con un espesor de varias micras (μm) en la superficie del acero, lo que se sustituye por una capa pasivante "real". Esta capa pasiva es dinámica-descompone y reorganiza- y se mantendrá mientras las condiciones correctas persistan.

Podemos encontrar el equilibrio entre el Potencial del electrodo y el pH en el diagrama de Pourbaix:

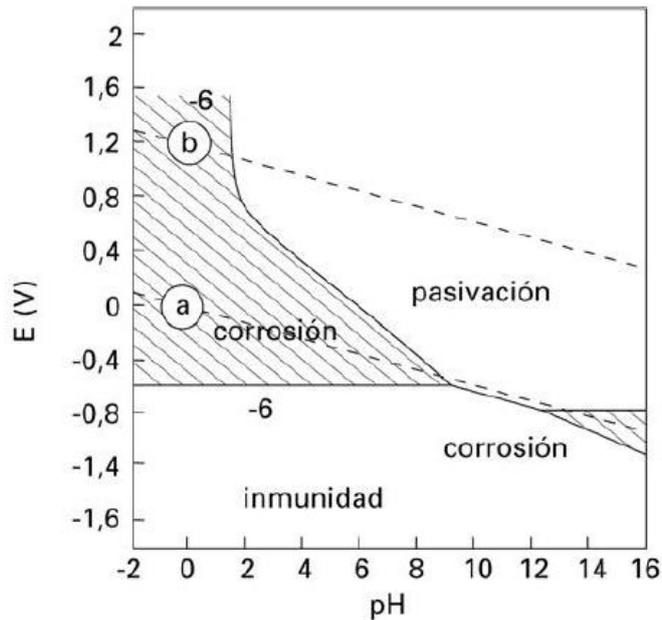


Ilustración 9. Diagrama simplificado de Pourbaix a 25°C

El hormigón por supuesto es vulnerable a los ataques, por ejemplo, como un ácido con un pH igual o menor que 7 va a atacar al hormigón así como el agua turbada. Esta forma de ataque es obvia y el acero reforzado que se encuentra embebido es vulnerable ante la corrosión una vez se haya expuesto y ya no esté protegido por el pH, mayor que 10,5. Sin embargo hay dos componentes químicos que rompen la capa pasiva sin destruir el hormigón en primer lugar. Esos componentes son los iones de cloruro y moléculas de dióxidos de carbono.

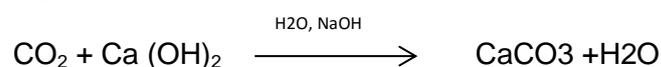
3.2 La Carbonatación.

En la atmósfera podemos encontrar entre 0.03 y 1% de dióxido de carbono (CO₂). Como la mayoría de los gases en una temperatura ambiente el CO₂ es un gas ácido. El ácido carbónico se forma cuando se disuelve en agua. Este ácido tan débil reaccionará con los hidróxidos de calcio, potasio y sodio en los poros de agua, reduciendo el pH por debajo del valor crítico de 10,5, que es el umbral para la corrosión del acero.

3.2.1 El proceso de carbonatación.

El proceso de carbonatación se puede resumir de la siguiente forma:

El gas CO₂ entra en los poros del hormigón y se disuelve con el agua contenida en dicho poro, hasta formar ácido carbónico, que después reacciona con los disueltos hidróxidos de calcio para formar carbonato cálcico insoluble, que precipita fuera de la solución de los poros.



También hay unas reacciones con otros componentes y alguna contracción de la matriz de menor importancia, sin embargo ningún efecto deteriorante significativo que

afecte al hormigón en sí. El daño es la reducción del pH, llevando el acero a despasivarse y comenzar a corroerse activamente.

Todo hormigón carbonizará de la misma manera. El grado de carbonización se determinara por cantidad de humedad presente, y en particular la cantidad veces que se humedece y se seca, lo que permitirá la entrada al CO₂ en el hormigón cuando este seco, y se transformarlo en ácido carbónico cuando humedezca. Además el grado carbonización también depende de la porosidad del hormigón y la cantidad de reservas alcalinas presentes en el mismo.

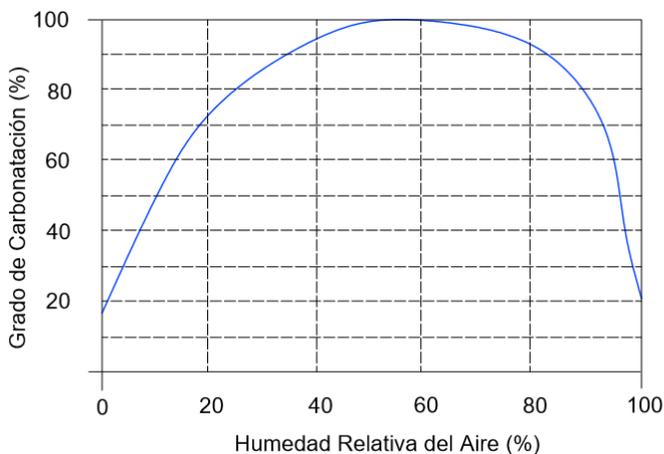
El grado de carbonización sigue una relación más o menos parabólica:

$$x = kt^{1/2}$$

Dónde:

- s) X= profundidad de carbonatación en mm
- t) K = coeficiente de carbonatación en mm/año^{1/2}
- u) T = tiempo en años

Esta ecuación es aproximadamente, y el exponente de la potencia puede variar desde 0.4 a 0.6, dependiendo de las condiciones de exposición y del hormigón. En la ilustración 4 podemos observar el fenómeno de carbonatación en el hormigón según las condiciones de exposición del mismo.



Gráfica 3. Grado de carbonatación del hormigón en función de la humedad relativa a la que está expuesta la estructura.

La profundidad de carbonatación puede medirse por una serie de técnicas. La más popular es la prueba del indicador de fenolftaleína⁸. En una investigación de una serie de estudios sobre el terreno encontraron relación de los siguientes valores de k:

- Para edificios de 8-24 años : de 1.2 a 6.7 mm/año^{1/2}, con un promedio de 3 mm/año^{1/2}

⁸ La solución de fenolftaleína al 1% es una prueba general que se le hace al hormigón para saber si está carbonatado. La fenolftaleína es un indicador de alcalinidad, indica si el pH del hormigón ha disminuido o no y lo hace cambiando de color a un rosa.

- Para un aparcamiento de siete coches de 14-41 años: va desde 2.2 mm/año^½ a 7.6 mm/año^½, con un promedio de 4.27 mm/año^½
- Para un embarcadero de 10 años y un puente de 90 años la k es de 1.8 mm/año^½ y 1.6 mm/año^½ respectivamente.

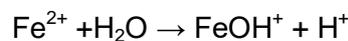
El avance de la carbonatación es directo. Esto puede producirse de manera irregular y desigual, pero práctico a la hora de definir máximos, mínimos y el promedio de la profundidad de carbonatación y compararlo con la profundidad de recubrimiento. Usando la ecuación explicada anteriormente es posible determinar el coeficiente de carbonatación k y estimar el tiempo de corrosión.

3.3 Ataque de iones de cloruro.

Existen otros agentes químicos que pueden iniciar la corrosión en el hormigón sin ser por iones de cloruro. Mientras que todo hormigón expuesto al medio ambiente va sufrir de corrosión, solo aquellos expuestos a cloruros van a sufrir de ataques de iones de cloruro. Ya que en décadas atrás la protección contra cloruros era pobre el coste de reparación y mantenimiento en la actualidad es alto.

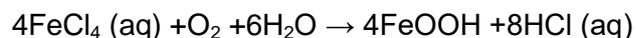
Los cloruros pueden provocar roturas localizadas en el hormigón debilitando la capa protectora del acero. El ion Cl^- penetra en la película de óxido a través de los poros y forman ánodos de metal activo rodeado por grandes áreas catódicas de metal pasivo.

La formación de ánodos en los puntos donde el pH no es suficiente o existe una fisura que genera diferencias de potencial que atraen cloruros. Cuando se elimina el oxígeno la superficie de acero se acidifica:



Los iones cloruro forman complejos solubles con los iones hierro y por consiguiente favorece la disolución del óxido de hierro.

El efecto catalítico aumenta en presencia del oxígeno, debido a la descomposición de los complejos de cloro al difundirse de la picadura de corrosión pobre en oxígeno al hormigón rico en oxígeno. Los complejos de cloro no son estables en presencia del oxígeno:



Como resultado obtenemos una liberación de cloruros y una mayor acidificación lo que acelera la corrosión. Esto es lo que diferencia la corrosión localizada de la galvánica. Los cloruros pueden encontrarse en el hormigón bien combinado o libre. Aun cuando se impide la penetración de los cloruros éstos pueden continuar durante años el proceso de transporte de iones desde zonas de alta concentración a las más bajas.

Los iones de cloruro son el 50% la sal común (NaCl) y se encuentran presentes en agua de mar, en sales para provocar el deshielo o presentes en el medio ambiente y en los aditivos.

3.3.1 Método de penetración de cloruros.

Los mecanismos de penetración de cloruros son los siguientes: capilaridad, permeabilidad, absorción y difusión. La difusión es un mecanismo de transporte mucho más lento comparado con la permeabilidad y la absorción. Cada mecanismo citado tendrá su relativa importancia según la condición de exposición, el contenido de humedad del hormigón y la estructura de poros.

Los primeros centímetros del recubrimiento sufrirán de recibir el daño dependiendo de la succión capilar, pero la penetración a profundidad mayor viene regida por la difusión.

En cuanto a la superficie del hormigón, si ésta está seca la toma de iones se realiza por absorción y si está húmeda la penetración se produce por permeabilidad o difusión.

A pesar de que varios modelos que participan en el ingreso de iones de cloruros en el hormigón, la mayoría de los modelos de penetración de cloruros están basados en la segunda ley de Fick⁹:

$$C_{x,t} = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_a t}} \right) \right]$$

Dónde:

$C_{x,t}$ corresponde a la concentración de cloruros a una profundidad x con un tiempo t

C_s es la concentración de cloruros en la superficie en kg/m^3

erf es la función error

D_a es el coeficiente de difusión en $\text{cm}^2/\text{año}$

Si obtenemos el coeficiente de difusión a partir de ensayos se debe indicar si se realizaron en condiciones de régimen estacionario o no estacionario.

3.4 Métodos de ensayo de corrosión de armaduras.

3.4.1 Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112010:2011.

Para determinar el contenido de cloruros en cualquier tipo hormigón de un elemento estructural, a lo largo de su vida útil, utilizaremos esta norma tanto para ensayos de laboratorio o toma de muestras directamente de la estructura.

⁹ Es una ley que describe la difusión de materia o energía en un medio en el que inicialmente no existe equilibrio químico o térmico.

Se deberá consultar la norma UNE 7050-2 *Tamices y tamizado de ensayo. Telas metálicas, chapas perforadas y láminas electroformadas. Medidas nominales de las aberturas*, como norma complementaria.

3.4.1.1 Método de ensayo

El método de ensayo consiste en determinar los cloruros totales, solubles o no, de un hormigón endurecido y puesto en servicio por el método volumétrico Volhard:

Se prepara la muestra de hormigón y se ataca con ácido nítrico diluido en ebullición. Los sulfuros se oxidan a sulfato y no interfieren. Disolvemos los cloruros añadiendo una disolución patrón de nitrato de plata. Después de ebullición el precipitado se lava con ácido nítrico diluido y se desecha. Enfriamos el filtrado y el agua de lavado por debajo de 25°C y el nitrato de plata en exceso se valora con una disolución patrón de tiocianato de amonio (NH_4SCN)¹⁰ en presencia de una sal de hierro (III) utilizada como indicador.

La muestra debe tomarse directamente del elemento objeto de estudio y debe ser representativa, teniendo en cuenta el máximo tamaño del árido. El laboratorio deberá recibir los datos de la toma, si ha sido tomado en seco o húmedo. En el caso de haberse tomado en húmedo se eliminara en torno a 10 mm del perímetro de la superficie exterior para evitar efectos de deslavado de cloruros. El tamaño mínimo de testigo recomendable es de 75 mm de diámetro. Se recomienda que sea de la menos 100 g y para el caso de perfiles calculados a partir de testigos extraídos a diferentes profundidades, el tamaño puede ser menor.

Se debe asegurar la estanquidad de la muestra hasta su ensayo.

a) Reactivos:

Se deben utilizar solo reactivos de calidad analítica reconocida y agua destilada o de pureza equivalente. El peso específico de ácido nítrico (HNO_3) tendrá un valor de 1.18 g/cm^3 a 1.19 g/cm^3 a 20°C.

- Ácido nítrico diluido (1+2)
- Ácido nítrico diluido (1+100)
- Disolución de nitrato de plata (AgNO_3); 0.05M
- Disolución de sulfocianuro de amonio (NH_4SCN); 0.5M
- Indicador de sulfato de amonio y de hierro (III) [$\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$]

b) Aparatos:

- Balanza que permita pesar con una precisión de 0.001g
- Bureta de 10 ml graduada en 0.1 ml
- Desecador provisto de perclorato de magnesio anhidro [$\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$]
- Papel de filtro suelto (diámetro de poros: 20 μm aproximadamente)
- Pipeta de 5 ml y 10 ml.

¹⁰ NH_4SCN : la sal de amonio de ácido tiocianico. Se utiliza como reactivo para la determinación de iones de hierro (III) (Fe^{3+}), de color intenso rojo sangre.

- Probetas de 25 ml, 50 ml, 100 ml y 500 ml.
- Vaso de precipitaciones de 250 ml y 1000 ml.
- Matraces de 200 ml, 500 ml y 1000 ml.
- Frasco de vidrio.
- Frasco cuentagotas de vidrio.
- Cuentagotas.

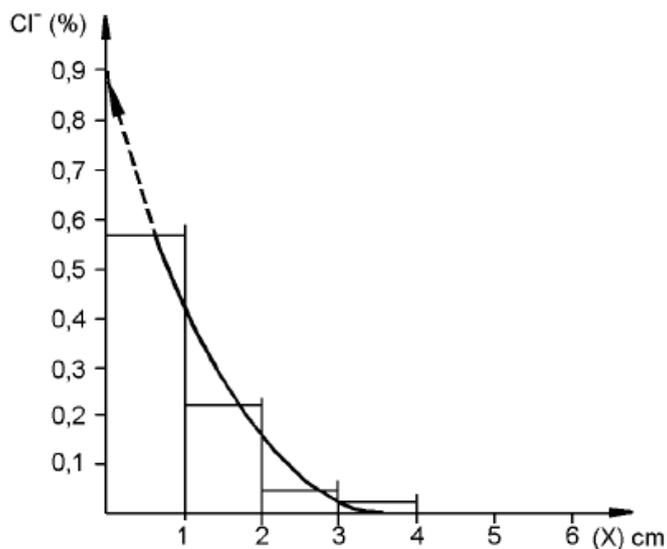
c) *Preparación de la muestra:*

La muestra debe de triturar hasta que todo el material pase por el tamiz de 160 μm según la Norma UNE 7050-2. Este material se homogeneiza cuidadosamente y se mantiene en estufa entre 105°C y 110°C durante 24 h.

De la muestra molida se toman al menos dos porciones de 5 ± 0.01 g, sobre las que se determina el contenido de cloruros. Cuando el contenido en cloruros sea muy elevado puede reducirse esta cantidad, sin que en ningún caso pueda ser inferior 1 ± 0.01 g.

d) *Procedimiento operatorio, cálculo y expresión de los resultados:*

1. Cada una de las muestras de 5 g se lleva un vaso de 250 ml y se añaden 50 ml de ácido nítrico diluido (1+2).
2. Se calienta la disolución hasta la ebullición agitando de vez en cuando y de se deja hervir durante 1 min. Se añaden con una pipeta 5 ml de la disolución valorada de nitrato de plata, se hierve durante 1 min y se filtra sobre papel de filtro lavado con ácido nítrico diluido (1+100) en un matraz de 500 ml.
3. Se lava el vaso, el agitador y el papel de filtro con ácido nítrico diluido (1+100) has que el volumen del filtrado y de las aguas de lavado sea 200 ml. Se deja enfriar el filtrado y las aguas de lavado hasta 25°C. se añaden 5 ml de solución indicadora, de sulfato de amonio y de hierro, y se valora con la disolución de sulfocianuro de amonio. Se agita con energía la disolución hasta que una gota de la disolución de sulfocianuro produzco una ligera colocación rojo- pardo, que no desaparece después de la agitación. Se anota el volumen (V_1) de disolución de sulfocianuro de amonio necesario para la valoración de la disolución de ensayo.
4. Si el contenido de cloruro en el hormigón es mayor del 0.17% en peso de la muestra, se debe iniciar la valoración con una cantidad menor de muestra.
5. Se repite el procedimiento anterior sin muestra de hormigón y se anota el volumen (V_2) de disolución de sulfocianuro de amonio necesario para la valoración en blanco.



Gráfica 4. Perfil de cloruros típico a partir de testigos extraídos del hormigón a varias profundidades. (UNE 112010:2011)

El contenido de cloruros, en tanto por ciento en peso, se debe calcular mediante la siguiente fórmula:

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

Dónde:

m_1 = es la masa de la muestra de ensayo de hormigón en *g*.

V_1 = es el volumen de la disolución de sulfocianuro de amonio requerido para la valoración de la disolución de ensayo en *ml*.

V_2 = es el volumen de la disolución de sulfocianuro de amonio requerido para la valoración en blanco en *ml*.

La desviación típica de repetibilidad es de 0.005%. La desviación típica de reproducibilidad es de 0.010%.

Si la diferencia entre dos determinaciones es superior a dos veces la desviación típica de repetibilidad, es decir, superior a 0.010%, se debe repetir el ensayo y se toman los dos valores más próximos.

El resultado del contenido de cloruros es la media aritmética de los valores individuales obtenidos, expresado en % y redondeando a dos decimales después de calcular la media.

3.4.1.2 Informe de ensayo

El informe debe contener al menos la siguiente información:

- a) Contenido de cloruros, calculado según el apartado anterior
- b) Identificación de la muestra y norma utilizada
- c) Descripción de la metodología seguida en la preparación de la muestra para ensayo.
- d) Geometría y tamaño de la muestra original especificando cómo ha sido tomada, si en seco o en húmedo mediante refrigeración.
- e) Fecha de la realización del ensayo y, en su caso, la de la toma de la muestra.

3.4.2 Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio. UNE 112011:2011.

El objeto de esta norma es determinar la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.

Se puede realizar el ensayo sobre la propia estructura o sobre muestras tomadas directamente de la estructura o sobre probetas del laboratorio que simule dicha estructura. Debido a la no homogeneidad de penetración es necesario siempre identificar la parte de la estructura de donde se ha realizado el ensayo.

La medida de la profundidad de la capa carbonatada en los hormigones se basa en la determinación de la reducción de la alcalinidad que supone la carbonatación, la cual puede ponerse de manifiesto mediante un indicador de pH, que la hace visible por cambios de colocación.

3.4.2.1 Método de ensayo

a) *Materiales:*

- i) *Indicador:* se utiliza una disolución de fenolftaleína al 1% disuelta en alcohol etílico al 70%. Para preparar 100 cm³ de indicador, se disuelve 1 g de fenolftaleína en 70 cm³ de alcohol etílico del 96% de pureza y se añaden después 30 cm³ de agua destilada.

La fenolftaleína toma un color rojo- púrpura para valores de pH > 9.5 y se vuelve incolora en valores inferiores a 8, caso de hormigón carbonatado. Para valores entre 8 y 9.5 toma una tonalidad entre rosa y rojo- púrpura.

- ii) *Dispositivo de medida:* puede utilizarse cualquier dispositivo con una precisión de 0,5 mm.

b) *Preparación:*

- i) La medición puede realizarse directamente sobre el elemento de estudio o in situ. Se realizará sobre una superficie limpia de partículas. El indicador debe aplicarse en el momento, si no es posible la muestra se guardará en un recipiente hermético con el menor contenido de aire posible. Es recomendable que el tiempo de espera no supere los 24 h que el elemento fracturado se carbona con rapidez.

- ii) La muestra debe tener un tamaño suficiente para medir la profundidad de la capa carbonatada, desde una de sus caras, que debe ser siempre la cara exterior del elemento. Se tomará en seco.
- iii) Si el ensayo se realiza *in situ* además de realizarse en seco se debe hacer en fracturas recientes evitando zonas donde el hormigón se encuentre suelto existan fisuras. Si solo se quiere conocer que zona ha alcanzado la carbonatación se debe eliminar capas de hormigón hasta el nivel de la armadura y aplicar el indicador en esa zona.

c) *Aplicador del indicador:*

Se aplicará directamente sobre la fractura reciente y con la superficie de aplicación del indicador hacia arriba. La disolución de indicador puede aplicarse con pulverizador, goteo o cualquier otro procedimiento que permita extender una capa fina y uniforme sobre la superficie seca.

Cuando no se aprecie la coloración se debe repetir el ensayo una vez que el indicador se haya secado, protegiendo la muestra del contacto con el aire durante este tiempo.

d) *Medida de la profundidad de la carbonatación:*

La profundidad de la capa carbonatada puede variar con el tiempo tras aplicar el indicador por lo que las medidas se deben de tomarse tras el mismo tiempo de espera en una serie de muestras. Se recomienda la lectura de medidas entre 15 y 30 minutos después de aplicar el indicador.

La precisión será de 0.5 mm.

Se tendrá en cuenta lo siguiente:

- i) Si la carbonatación presenta un frente homogéneo la profundidad de carbonatación se expresa como d_k .

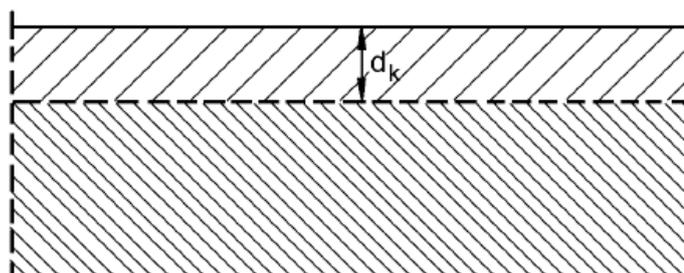


Ilustración 10. Frente homogéneo.(UNE 112011:2011)

- ii) Cuando el frente de carbonatación tenga una forma irregular la medida se expresa como la penetración media d_k , la penetración máxima $d_{k\text{ máx}}$, y la penetración mínima $d_{k\text{ mín}}$.

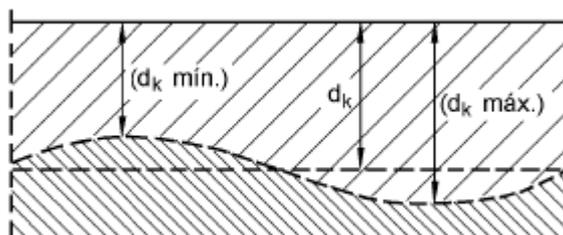


Ilustración 11. Frente irregular (UNE 112011:2011)

Cuando la carbonatación presente un frente singular se seguirá el mismo procedimiento.

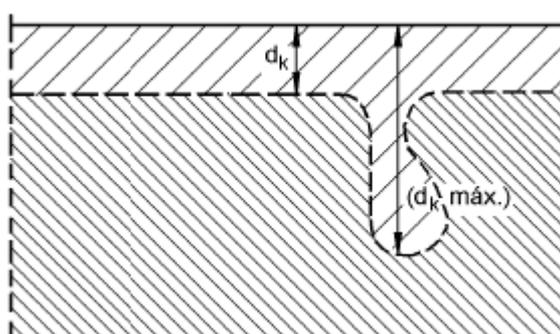


Ilustración 12. Frente singular (UNE 112011:2011)

- iii) Si deberá indicar si el color que adquiere es rojo- púrpura o rosado, y si es rosado se deberá indicar la profundidad y frecuencia.
- iv) Serán áreas de transición carbonatadas las que después de 24 h, protegidas del contacto con el aire, pierdan su color.
- v) La profundidad de la carbonatación se debe medir en zonas donde exista árido de pequeño tamaño. Se debe prescindir de las medidas en las zonas con grano de árido de gran tamaño.
- vi) No es aconsejable la medición en esquinas, es donde los componentes ácidos de la atmosfera han podido penetrar por dos caras a la vez, salvo que haya un interés especial en esa zona.

3.4.2.2 Informe del ensayo

El informe debe expresar la medida de la profundidad de la carbonatación para cada muestra ensayada, según se ha indicado en el apartado anterior, complementada con la siguiente información:

- a) Localización de la zona del elemento ensayado o de donde fue tomada la muestra e indicando, si es posible, la edad del elemento de ensayo, las condiciones de exposición de la superficie, la humedad relativa del ambiente, su temperatura, viento, concentración de elementos ácidos, curado efectuado

- en el elemento ensayado, etc. Si el ensayo se realiza en el laboratorio se deberán indicar las condiciones de conservación en el laboratorio.
- b) Fecha de realización del ensayo y de la toma de la muestra.
 - c) Tiempo transcurrido entre la aplicación del indicador y la medición.
 - d) Si el frente de carbonatación ha llegado hasta el nivel de la armadura y en qué zonas.

3.5 Métodos de prevención de la Corrosión.

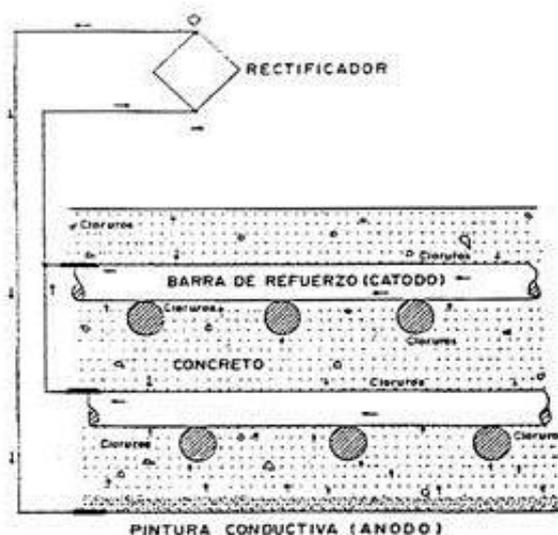
Como ya se ha dicho los cloruros pueden estar presentes en el hormigón desde su colocación en obra, bien en las adiciones, en la mezcla de agua o en los aditivos. Eso nos lleva en primer lugar a evaluar los materiales que forman parte del cemento para estimar si van a contribuir a la corrosión. En el caso de adiciones, se pueden someter a un lavado para reducir su concentración de cloruros.

Otra forma de actuar es directamente sobre los poros capilares del hormigón. Para que los cloruros lleguen hasta las armaduras el hormigón debe ser permeable, podemos aplicar los mismos métodos de prevención que mencionamos en el apartado de los sulfatos, poniendo atención al recubrimiento, que es la barrera principal contra estos ataques.

El uso de pinturas especiales para el acero también proporciona protección, pero hay que asegurarse de aplicarlas en todas las zonas catódicas sino las pinturas acaban siendo poco efectivas.

Si hablamos de los aditivos existen unos llamados inhibidores, que al añadirlos a la mezcla del cemento combaten la corrosión anulando los cloruros. Tenemos los inhibidores de Nitrito de Calcio, Nitrito de Sodio, Dicromato de Potasio, Cromato de Zinc, Cromato de Sodio, Benzoato de Sodio, etc. Sin embargo pueden aparecer efectos secundarios, modificando el tiempo de fraguado, disminuyendo la resistencia en compresión y favoreciendo la aparición de eflorescencias.

Ilustración 13. Principio de protección catódica en barras de refuerzo empleando pinturas conductivas como ánodo. (ACI)



Existe también el método de protección catódica. En el principio consiste en generar una corriente inversa a la originada por la celda electroquímica de modo de anular el flujo y eliminar el proceso de corrosión. Es un sistema poco barato, ya que la pintura conductiva es cara, pero el mantenimiento resulta bastante económico, como que compensa a lo largo del tiempo.

Si comparamos los ataques de sulfatos y los de cloruros, en un ambiente marino donde la estructura queda saturada con agua de mar, la acción de los sulfatos queda mitigada por presencia de cloruros. En las estructuras intactas la presencia de Aluminato Tricálcico (C3A) del orden de 8% o más en el cemento crea una barrera química protectora contra la corrosión, y hace que utilizar cementos con $C3A < 5\%$ sea una insensatez. En estos casos es conveniente el uso de cementos puzolánicos en vez de cemento de alta resistencia a sulfato.

4. PRESCRIPCIONES DE DURABILIDAD EN LA NORMATIVA

La Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), aprobada por el Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, constituye una revisión de las reglamentaciones anteriores como la EHE-98 y la EFHE. El nuevo enfoque de la Instrucción se adapta al Código Técnico de la Edificación y a los Eurocódigos Estructurales.

“El nuevo texto de la Instrucción profundiza en el tratamiento de la durabilidad de las estructuras de hormigón, incluyendo procedimientos para la estimación de su vida útil, con objeto de disminuir las patologías derivadas de la agresividad del ambiente en que se ubica la estructura.”

American Concrete Institute (ACI 318-14) es una modificación técnica de ACI 318-11, que ha sido reorganizada y reformateada. Los principales objetivos de esta reorganización fueron presentar todos los requisitos de diseño y detallado para sistemas estructurales y miembros individuales en capítulos dedicados a estos temas individuales y para organizar los capítulos en una forma que siga el proceso y cronología de diseño y construcción.

Según el aspecto normativo debemos tratar la durabilidad en la fase de proyecto para alcanzar una vida útil de la estructura deseada. Los encargados del apartado de la Durabilidad en la normativa son el Artículo 37º y el Anejo 9, que es un método de verificación alternativo, de la EHE-08 y el Capítulo 19 y 20 del Reglamento americano. El mismo Reglamento dice que *la durabilidad* del hormigón se ve afectada por la resistencia del hormigón a la penetración de fluidos, así como por la relación de a/c y la composición de los materiales cementantes utilizados en el hormigón.

Para ello es importante tener en cuenta el tipo de ambiente a la que está sometida cada parte de la estructura.

4.1 Tipo de ambiente:

Según *la ACI 318-14* las categorías de exposición definidas a continuación se subdividen en clases de exposición dependiendo de la severidad de la exposición. El Reglamento no incluye requisitos para exposiciones especialmente severas, tales como ácidos o temperaturas altas.

Este Reglamento contiene cuatro categorías de exposición para asegurar una durabilidad adecuada:

- **Categoría de Exposición F** se aplica para hormigones en el exterior expuestos a la humedad y a ciclos de hielo- deshielo, con o sin productos químicos descongelantes.
- **Categoría de Exposición S** se aplica para hormigones en contacto con el suelo o agua que contengan cantidades perjudiciales de iones sulfatos solubles en el agua.
- **Categoría de Exposición W** se aplica para hormigón en contacto con el agua pero no está expuesto a ciclos de hielo- deshielo, a cloruros o sulfatos.

- **Categoría de Exposición C** se aplica para hormigón no pretensado y pretensado no expuesto a condiciones que requieren protección adicional del refuerzo contra la corrosión.

Tabla 9. Categorías y clases de exposición ACI 318-14 (Tabla 19.3.1.1)

CATEGORÍA	CLASE	CONDICIÓN	
Hielo-deshielo (F)	F0	Hormigón no expuesto a ciclos de hielo-deshielo	
	F1	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	F2	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo y en contacto frecuente con la humedad	
	F3	Hormigón expuesto a ciclos de hielo-deshielo que estará en contacto frecuente con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
Sulfato (S)		Sulfatos solubles en agua en el suelo, % en masa	Sulfato disuelto en agua, ppm
	S0	$SO_4^{2-} < 0,10$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0,10 \leq SO_4^{2-} < 0,20$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1500$
	S2	$0,2 \leq SO_4^{2-} \leq 2,00$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$
	S3	$SO_4^{2-} > 2,00$	$SO_4^{2-} > 10000$
En contacto con el agua (W)	W0	Hormigón seco en servicio; Hormigón en contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	W1	En contacto con el agua donde se requiera baja permeabilidad	
Protección del refuerzo para la corrosión (C)	C0	Hormigón seco o protegido contra la humedad	
	C1	Hormigón expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	C2	Hormigón expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

- Según la *EHE-08* un elemento puede estar sometido a ninguna, a una o varias clases específicas de exposición relativas a otros procesos de degradación del hormigón.

Por el contrario, un elemento no podrá estar sometido simultáneamente a más de una de las subclases definidas para cada clase específica de exposición.

El tipo de ambiente viene definido por la combinación de una de las clases generales de exposición frente a la corrosión de la armadura y una clase

específica de exposición relativas a los otros procesos de degradación que procedan para cada caso.

Tabla 10. Clases generales de exposición relativas a la corrosión de las armaduras s/EHE-08. (Tabla 8.2.2)

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				Descripción
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso	
No agresiva		I	Ninguno	Interiores de edificios sin condensación. Elementos de hormigón en masa.
Normal	Humedad alta	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros	Interiores sometidos a humedades >65% o condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media superior a 600 mm. Elementos enterrados o sumergidos.
	Humedad media	Ilb	Corrosión de origen diferente de los cloruros	Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia con precipitación media anual inferior a 600 mm.
Marina	Aérea	IIIa	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 (a menos de 5 km).
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentes, por debajo del nivel mínimo de bajamar.
	En zonas de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	Corrosión por cloruros	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras 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 que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.

Es importante calcular un recubrimiento adecuado que proteja la armadura contra las acciones que degradan el hormigón y corroen la misma. Pero antes de eso hay que asegurarse de haber elegido unos materiales que cumplan con todas las exigencias expuestas en este trabajo con el fin de conseguir una buena durabilidad.

4.2 Adecuada relación a/c y Resistencia mínima N/mm²

Se pretende lograr una baja permeabilidad del hormigón para reducir la absorción y por consiguiente la difusión de gases e iones. Es aconsejable una relación a/c baja con una compactación correcta del hormigón y su cuidadoso curado. Debe haber un adecuado contenido de cemento, no es aconsejable que el contenido máximo de cemento supere los 500 kg/m³, e hidratación suficiente. Dichas limitaciones se exponen en las tablas de a continuación, según la EHE-08 y la ACI 318-14.

Tabla 11. Máxima relación a/c y mínimo contenido de cemento EHE-08

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición													
		I	Ila	Ilb	Illa	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c	Masa	0.65	-	-	-	-	-	-	-	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.50
	Armado	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.45	0.50	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.50	0.50
	Pretensado	0.60	0.60	0.55	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.45	0.45	0.55	0.50	0.50	0.50
Mínimo contenido de cemento kg/m^3	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275	300
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	325	300

Tabla 12. Resistencia mínima recomendada EHE-08

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	Clase de exposición													
		I	Ila	Ilb	Illa	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia mínima N/mm^2	Masa	20	-	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	30	35	35	30	30	35	30	30	30	30

Cuando el hormigón este sometido a una clase de exposición F el contenido mínimo de aire ocluido debe ser 4.5% según la norma UNE-EN 12350-7.

En la norma ACI hace hincapié en la correcta relación de a/c, para lograr la permeabilidad baja que se requiere para cumplir con los requisitos de durabilidad, y en la composición de los materiales cementantes utilizados en el hormigón. La norma ASTM C1202 puede utilizarse para indicar la resistencia del hormigón a la penetración de fluidos.

“Debido a que es difícil verificar con precisión la relación a/c del concreto, el valor seleccionado para $f'c$ debe ser congruente con la máxima relación a/c requerida por efectos de durabilidad. La selección de un $f'c$ que sea congruente con la máxima a/c requerida por durabilidad permite que se puedan utilizar los resultados de ensayos de resistencia como un substitutivo de a/c, y así ayudar a que no se exceda en obra la máxima a/c.”

Tabla 13. Requisitos para el hormigón s/clase de exposición ACI 318-14 (Tabla 19.3.2.1)

Clase de exposición	Relación a/c máx.	$f'c$ mínimo en N/mm ²	Requisitos mínimos adicionales			Límites en los materiales cementantes
			Contenido de aire			
F0	-	17.50≈20	-			-
F1	0.55	24.50≈25	Tabla			-
F2	0.45	31.50≈30	Tabla			-
F3	0.40	35.00	Tabla			Tabla
			Tipo de material cementante			Aditivo cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	-	17.50	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0.50	28.00	II	Tipos IP, IS o IT con designación (MS)	MS	Sin restricción
S2	0.45	31.50	V	Tipos IP, IS o IT con designación (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31.50	V más puzolanas o cemento de escoria	Tipos IP, IS o IT con designación (HS) más puzolanas o escoria	HS más puzolanas o escoria	No se permite
W0	-	17.50	Ninguna			

W1	0.50	28.00	Ninguna		
			Contenido máximo de iones de cloruro soluble en agua en el hormigón, % peso del cemento		Requisitos adicionales
			Hormigón armado	Hormigón pretensado	
C0	-	17.50	1.00	0.06	Ninguno
C1	-	17.50	0.30	0.06	
C2	0.40	35.00	0.15	0.06	Recubrimiento del hormigón

- Estos límites para la máxima relación a/c no se aplican a hormigón ligero.
- En la clase de exposición F3 para hormigón en masa la máxima relación a/c debe ser 0.45 y el mínimo $f'c$ debe ser de 31.50 N/mm².
- Para exposición a agua marina se permite otro tipo de cemento Portland con aluminato tricálcico hasta 10% si la relación a/c no excede 0.40
- Se permite tipos de cemento Tipo I o Tipo III en la clase de exposición S1 o S2 si el contenido de aluminato tricálcico es menor del 8% o 5% respectivamente.
- El contenido de ion cloruro soluble en agua debe determinarse en la mezcla del hormigón por medio de la norma ASTM C1218 a una edad entre 28 y 42 días.
- El recubrimiento debe cumplir con la siguiente tabla del siguiente apartado.

Tabla 14. Contenido total de aire para el hormigón expuesto a ciclos de hielo- deshielo s/ ACI 318-14 (Tabla 19.3.3.1)

Tamaño máximo nominal del agregado en mm	Contenido de aire en porcentaje	
	F1	F2 y F3
9.50	6	7.5
12.70	5.5	7
19.05	5	6
25.40	4.5	6
38.10	4.5	5.5
50.80	4	5
76.20	3.5	4.5

4.3 Recubrimiento.

Se define, bien en la Instrucción o bien en el Reglamento, como “la distancia entre la superficie exterior de la armadura (incluyendo cercos y estribos) y la superficie del hormigón más cercana”.

Los métodos de cálculo de una norma a otra cambian de manera considerable, ya que en una de ellas ya vienen tabuladas. Empezaremos con los requisitos de la EHE:

- La Instrucción define un recubrimiento mínimo de la armadura pasiva y que deber cumplirse en cualquier punto de la misma y garantizarlo se deberá hallar un valor nominal del recubrimiento r_{nom} , que es el resultado de sumar al

recubrimiento mínimo un margen de recubrimiento en función del nivel de control de ejecución:

$$r_{\text{nom}} = r_{\text{min}} + \Delta r$$

Δr :

0 mm= en elementos prefabricado;

5 mm= elementos ejecutados in situ con nivel intenso de control de ejecución;

10 mm= en el resto de los casos.

Además de estos recubrimientos, que se expresan en las tablas de a continuación, se deberá tener en cuenta el tamaño máximo del árido D, que no debe dificultar el paso del hormigón entre armaduras. Generalmente se comprueba el caso más desfavorable, el recubrimiento deber ser 1.25 veces el tamaño máximo del árido. Para otras condiciones se consultará el apartado 28.3 de la misma Instrucción.

También hay que tener en cuenta los recubrimientos que superen los 50 mm, en cuyo caso se deberá de colocar una malla de reparto en las zonas de tracción.

Las piezas que estarán hormigonadas contra el terreno tendrán un recubrimiento mínimo de 70 mm, salvo que se haya preparado el terreno y se disponga de un hormigón de limpieza.

Tabla 15. Recubrimiento mínimo en mm para las clases generales de exposición I y II s/ EHE-08

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del hormigón en N/mm ²	Vida útil de proyecto (tg) en años	
			50	100
I	Cualquiera	$f_{ck} \geq 25$	15	25
IIa	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otro tipo de cemento	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
IIb	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otro tipo de cemento	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

Como se puede observar el recubrimiento mínimo se escoge teniendo en cuenta el tipo de ambiente, el tipo de cemento utilizado, la resistencia característica del hormigón y la vida útil de la estructura. Generalmente en Edificación la vida útil suele ser de 50 años.

Tabla 16. Recubrimiento mínimo en mm para las clases generales de exposición III y IV s/ EHE-08 (tabla 37.2.4.1.b)

Hormigón	Cemento	Vida útil en años	Clase general de exposición			
			IIIa	IIIb	IIIc	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, según el Artículo 26º	50	65	45	*	*
		100	*	*	*	*

* Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, desaconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad según lo indicado en el Anejo 9º, a partir de las características del hormigón prescrito en el Pliego de prescripciones técnicas del proyecto.

Si el deterioro tiene otro origen distinto al de la corrosión estamos hablando de clases específicas de exposición, Tabla 37.2.4.c de la EHE-08, pero quedan fuera del alcance de este trabajo.

- En el Reglamento, por el contrario que en la Instrucción, el recubrimiento ya viene tabulado y clasificando según el tipo de hormigón del que se trata, es decir, si es armado o pretensado, lo que facilita bastante la tarea de la elección un recubrimiento u otro.

Tabla 17. Recubrimiento especificado para elementos de hormigón armado construidos in situ, s/ ACI 318-14 (Tabla 20.6.1.3.1)

Exposición del hormigón	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado en mm
Construido contra el suelo y permanentemente en contacto con él	Todos	Todos	3 pulg= 76.2 mm
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo	Todos	Barra nº 6 a nº 18	2 pulg= 50.8 mm
		Barras nº 5, alambre W31 o D31, y menores	1-1/2 pulg= 38.1 mm
No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Barras nº 14 y nº18	1-1/2 pulg= 38.1 mm
		Barras nº11 y menores	3/4 pulg= 19.05 mm
	Vigas, pilares y amarres a tracción	Armadura principal, estribos, espirales y cercos para confinamiento	1-1/2 pulg= 38.1 mm

En el Reglamento ACI los recubrimientos ya están establecidos, independientemente del tipo de cemento que uses o la resistencia característica del hormigón, solo hay que tener en cuenta el ámbito de exposición, el diámetro de las barras y que elemento estructural estamos armando.

Desde mi punto de vista el método que emplea ACI es más rápido para la realización del diseño y por consiguiente a lo mejor no tan exacto, o bien puedes quedarte corto o bien pasarte con el recubrimiento. También habría que decir que la experiencia en este campo juega un gran papel, y es probable que los recubrimientos establecidos ya sean el caso más desfavorable según los cálculos realizados por el comité, con un control mayor de dosificaciones, colocación y curado.

Tabla 18. Recubrimiento específico para elementos de hormigón pretensado construido in situ. s/ ACI 318-14 (Tabla 20.6.1.3.2)

Exposición del hormigón	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado en mm
Construido contra el suelo y permanentemente en contacto con él	Todos	Todos	76.2
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Todos	25.4
	Todos los demás	Todos	38.1
No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Todos	19.05
	Vigas, pilares y amarres a tracción	Refuerzo principal	38.1
		Estribos, espirales y cercos de confinamiento	25.4

Tabla 19. Recubrimiento específico de hormigón para elementos prefabricados, armados o pretensados, fabricados bajo condiciones de planta, s/ ACI 318-14 (Tabla 20.6.1.3.3)

Exposición del hormigón	Miembro	Refuerzo	Recubrimiento especificado en mm
Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo	Muros	Barra nº 14 y nº 18, tendones con diámetro mayor de 38.1 mm	38.10
		Barras nº 11 y menores, alambre W31 y D31 y menores, tendones y torones con diámetro 38.1 mm y menores	19.05
	Todos los demás	Barra nº14 y nº18, tendones con diámetro mayor de 38.10 mm	50.80
		Barras nº6 hasta nº11, tendones y torones mayores de 15.88 mm hasta 38.10 mm de diámetro	38.10
		Barra nº5, alambres W31 y D31 y menores, tendones y torones con diámetro 15.88 mm y menores	31.75

No expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Losas, viguetas y muros	Barra nº 14 y nº 18, tendones con diámetro mayor de 38.1 mm	31.75
		Tendones y torones con diámetro 38.10 mm y menores	38.10
		Barras nº 11 y menores, alambres W31 y D31	15.88
	Vigas, pilares y amarres a tracción	Refuerzo principal	El mayor diámetro nominal de una barra o alambre y 15.88 mm y no necesita ser mayor de 38.10 mm
		Estribos, espirales y cercos de confinamiento	9.53

En cuanto a las especificaciones sobre la corrosión el Reglamento solo hace una mención en el apartado *“los requisitos para las mezclas de hormigón”*, en el punto 19.3.2 de la misma norma, que *“se deberán considerar los requisitos básicos de máxima relación a/c, resistencia mínima a la compresión especificada y recubrimiento mínimo”* *“[...] el uso de refuerzos recubierto, acero de refuerzo resistente a la corrosión, o un recubrimiento mayor que el mínimo indicado en el punto 20.6 pueden dar protección adicional bajo circunstancias como estructuras cercanas al agua marina o cloruros llevados desde el exterior por los vehículos [...]”*

La norma ACI 318-14 delega en otras normas americanas como *ACI 365.1R-00 “Service- Life Prediction- State of the Art Report”* y *ASTM C1218 “Método de ensayo para cloruros solubles en agua en mortero y hormigón”*.

5. CONSIDERACIONES ADICIONALES SOBRE DURABILIDAD. ANEJO 9 – ACI 365.1R-00.

Acudimos a las comprobaciones de Estado Límite de Durabilidad cuando una estructura deja de actuar según lo que se haya previsto en el diseño de la vida útil de proyecto, es decir, cuando la estructura falla por la degradación del hormigón o de la armadura.

El procedimiento que se sigue es semiprobabilista y debe cumplir la siguiente condición:

$$t_L > t_d$$

Dónde:

- t_L : valor estimado de la vida útil
- t_d : valor de cálculo de la vida útil

A su vez se define la vida útil de cálculo t_d como el producto de la vida útil de proyecto por un coeficiente de seguridad:

$$t_d = \gamma_t t_g$$

- t_d = vida útil de cálculo
- γ_t = coeficiente de seguridad con valor 1.10
- t_g = vida útil de proyecto, que en el caso de edificación suele ser de 50 años.

Para el cálculo de vida útil de servicio t_L seguiremos el método que corresponde a cada proceso degradación que nos facilitan las normas correspondientes.

5.1 Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión según el Anejo 9º de la EHE-08

Para el cálculo de t_L esta norma ofrece unos métodos de cálculo para la estimación del desarrollo de los procesos de degradación relacionadas con la corrosión de las armaduras, en concreto el modelo de carbonatación y modelo de penetración de cloruros. El Autor del Proyecto puede utilizar cualquier otro método que considere apropiado.

Por consiguiente podemos expresar el tiempo necesario para que la degradación sea significativa de siguiente manera:

$$t_L = t_i + t_p$$

Dónde:

- t_i : período de iniciación de la corrosión, es decir, el tiempo que tarda la penetración del agresivo en llegar a la armadura.
- t_p : período de propagación hasta que se produzca una degradación significativa.

Este apartado recoge algunos de los modelos aplicables para la estimación del desarrollo de los procesos de deterioro relacionados con la corrosión de las armaduras. El Autor del proyecto podrá optar por cualquier otro modelo avalado por la bibliografía especializada.

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

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

5.1.1 El período de iniciación:

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

$$d = K \cdot t^{1/2}$$

Dónde:

- d : profundidad de penetración del agresivo, para una edad t .
- K : coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales.

5.1.1.1 Modelo de Carbonatación:

Como ya mencionamos el periodo de tiempo necesario para que se produzca la carbonatación a una distancia d respecto a la superficie del hormigón puede estimarse según la fórmula t_i :

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

Dónde:

- d : profundidad de penetración del agresivo

K : coeficiente que depende del tipo de proceso agresivo, de las características del material y de las condiciones ambientales. Para la carbonatación sería K_c

El coeficiente de carbonatación K_c se obtiene a partir de la siguiente formula:

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

Donde:

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

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

- c_{env} : coeficiente de ambiente
- c_{air} : coeficiente de aireantes
- a, b : parámetros función del tipo de conglomerante

Tabla 20. Coeficiente de ambiente, s/EHE-08 (Tabla A.9.1)

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0.5

Tabla 21. Coeficiente de aireantes, s/EHE-08 (Tabla A.9.2)

Aire ocluido %	c_{air}
< 4.5	1
≥4.5	0.7

Tabla 22. Coeficientes a y b, s/EHE-08 (Tabla A.9.3)

Conglomerante	Cementos de la Instrucción de cementos vigente	a	b
Cemento Portland	CEM I CEM II/A CEM II/B-S CEM II/B-L CEM II/B-LL CEM II/B-M CEM V	1800	-1.7
Cemento Portland +28% cenizas volantes	CEM II/B-P CEM II/B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1.2
Cemento Portland +9% humo de sílice	CEM II/A-D	400	-1.2
Cemento Portland +65% escorias	CEM III/A CEM III/B	360	-1.2

5.1.1.2 Modelo de penetración de iones de cloruros

El periodo de tiempo necesario para que se produzca una concentración de cloruros C_{th} a una distancia d respecto a la superficie del hormigón puede estimarse según la fórmula t_i :

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

El coeficiente de penetración de cloruros tiene la siguiente expresión:

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

Donde:

- α = factor de conversión 56157.
- C_{th} = concentración crítica de cloruros, expresada en % en peso de cemento.
- C_s = concentración de cloruros en la superficie del hormigón expresado en % en peso de cemento. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % en peso de hormigón, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento de hormigón en kg/m^3 como:
 $C_s = C_s (\% \text{ peso de hormigón}) \times (2300 / \text{contenido del cemento})$.
- C_b = contenido de cloruros aportado por las materias primas (áridos, agua, etc.) en el momento de fabricación del hormigón.
- $D(t)$ = coeficiente de difusión expresado en cm^2/s .

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

Dónde:

$D(t_0)$ = coeficiente de difusión a la edad t_0 .

n = factor de edad, puede tomarse como 0.5 si existe una falta de valores específicos obtenidos mediante ensayos sobre el hormigón de que se trate.

Para la utilización del modelo de penetración de cloruros puede emplearse el valor de $D(t_0)$ obtenido mediante ensayos específicos de difusión (en cuyo caso t_0 sería la edad del hormigón a la que se ha realizado el ensayo), o bien emplear los valores de la siguiente tabla (obtenidos para $t_0 = 0.0767$).

Tabla 23. Coeficiente D (t0) (x 10E-12 m2/s), s/ EHE-08 (Tabla A.9.4)

Tipo de cemento	a/c=0.40	a/c=0.45	a/c=0.50	a/c=0.55	a/c=0.60
CEM I	8.9	10.0	15.8	19.7	25.0
CEM II/A-V	5.6	6.9	9.0	10.9	14.9
CEM III	1.4	1.9	2.8	3.0	3.4

La concentración crítica de cloruros C_{th} en condiciones normales puede adoptar un valor del 0.6% del peso de cemento para armaduras pasivas. En caso de armaduras activas este valor se reduce al 0.3% del peso del cemento como límite.

El valor C_s depende de las condiciones externas especialmente de la orografía del terreno y el régimen de vientos predominantes en la zona cercana a la costa. El valor máximo alcanzado por C_s es de 10 años. A falta de valores obtenidos a partir de ensayos en estructuras de hormigón situadas en las proximidades, el Autor del proyecto valorará la posibilidad de adoptar un valor de C_s de acuerdo con la siguiente tabla, en función de la clase general de exposición:

Tabla24. Concentración de cloruros en la superficie de hormigón, s/EHE-08

Clase general de exposición	Illa		IIIb	IIIc	IV
	Distancia respecto a la costa	Hasta 500 m	500 m- 5000 m	Cualquiera	
C_s % peso del hormigón	0.14	0.07	0.72	0.50	0.50

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

5.1.2 El período de propagación:

La etapa de propagación se considera concluida cuando se produce una pérdida de sección de la armadura inadmisibles o se producen fisuras en el recubrimiento de hormigón. El periodo de tiempo que tarda en producirse se puede obtener con la ayuda de la siguiente expresión:

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

Dónde:

- d : espesor de recubrimiento en mm
- ϕ : diámetro de la armadura en mm
- V_{corr} : velocidad de corrosión en $\mu\text{m/años}$

Si existe una falta de datos experimentales específicos para el hormigón y las condiciones ambientales concreta de la obra, la velocidad de corrosión se puede obtener de la siguiente tabla:

Tabla25. Velocidad de corrosión según la clase general de exposición, s/ EHE-08 (Tabla A.9.5)

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

5.1.3 Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento de las armaduras.

El articulado permite tener en cuenta la contribución de revestimiento que sean compactos impermeables, definitivos y permanentes. A este respecto, en las clases generales de exposición IIa, IIb y IIIa, sin clase específica de exposición, pueden emplearse diversas alternativas. En el caso de uso de morteros de revestimiento, se define como “factor de equivalencia de recubrimiento (λ)” el valor por el que hay que multiplicar el espesor colocado de mortero para determinar el recubrimiento equivalente que puede sumarse al recubrimiento real de hormigón. Las siguientes tablas presentan los valores de λ para los ambientes más habituales en el caso de estructuras de edificación. En ningún caso, podrán emplearse espesores de revestimiento superiores a 20 mm.

Tabla26. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente en ambiente IIa y IIb

Velocidad de carbonatación, (mm/dia ^{1/2})	λ
$\leq 2,0$	0,5
$\leq 1,0$	1,0
$\leq 0,7$	1,5
$\leq 0,5$	2,0

Tabla 27. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa.

Velocidad de carbonatación, (mm/dia ^{1/2})(*)	λ
$\leq 3,4$	0,5
$\leq 1,7$	1,0
$\leq 1,1$	1,5
$\leq 0,9$	2,0

(*) Para la determinación de la velocidad de penetración de cloruros, y a falta de una normativa específica, se recomienda seguir las condiciones de ensayo descritas en el capítulo 3 de la norma AASHTO T259-80, manteniendo las mismas hasta edades no inferiores a 90 días y determinando la velocidad de penetración de cloruros mediante algún procedimiento adecuado (como por ejemplo, mediante la determinación colorimétrica del frente de penetración de cloruros con AgNO₃, a diferentes edades intermedias).

Alternativamente, para el ambiente IIIa puede emplearse también el criterio de factor de equivalencia establecido en la tabla siguiente:

Tabla 28. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambiente IIIa.

Velocidad de carbonatación, (mm/dia ^{1/2})(*)	λ
$\leq 0,40$	0,5
$\leq 0,20$	1,0
$\leq 0,15$	1,5
$\leq 0,10$	2,0

Para que un mortero pueda ser empleado de acuerdo con lo indicado en este Artículo, sus componentes (cemento, áridos, aditivos, adiciones, etc.) deberán cumplir, en su caso, lo especificado para cada uno de ellos en la Instrucción. Además, independientemente del factor de su factor de equivalencia, deberán cumplir también las especificaciones de esta tabla:

Tabla 29. Características del mortero a emplear en revestimientos, para poder ser considerado a los efectos de este Anejo.

Característica	Requisitos
Resistencia a flexotracción, s/ UNE-EN 1015-11	$\geq 2 \text{ N/mm}^2$
Módulo de elasticidad, s/ ASTM C 469	$\leq 25\,000 \text{ N/mm}^2$
Retracción de secado, a los 28 días, s/ ASTM C157	$\leq 0.04\%$
Resistencia de adherencia, s/ UNE-EN 1542	$\geq 0.8 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente de dilatación térmica, s/ UNE-EN 1770	$\geq 11.7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

En el caso de empleo de otros revestimientos, o en ambientes distintos de los anteriores, el proyectista debe justificar documentalmente que la protección a las armaduras en el elemento prefabricado es similar a la que proporcionaría el espesor de hormigón sustituido. Estos requisitos corresponden estrictamente a exigencias de durabilidad del forjado. Los criterios de protección contra fuego o estéticos requieren más recubrimiento.

En el caso de ambientes fuertemente agresivos, el valor de los recubrimientos y las demás disposiciones de proyecto deberán establecerse, previa consulta de la literatura técnica especializada, en función de la naturaleza del ambiente, tipo de elemento, etc.

5.2 Modelo de durabilidad para los procesos de corrosión según ACI 365.1R-00

Como ya se comentó la norma americana ACI 318-14 delega para más información, realización de ensayos o para un mayor estudio de algunos apartados en otras normas de la misma rama. En este caso para la realización de cálculos correspondientes a Estado Límite de Durabilidad acudiremos a la norma *ACI 365.1R-00: Service Life Prediction- State of the Art Report*.

Este documento, *Predicción de la vida útil- Informe de Estado de Arte*, es de ayuda para la aplicación de métodos y herramientas en predicción de la vida útil de estructuras de hormigón y proporcionar acciones que pueden ser de ayuda en el diseño o en la fase de construcción para incrementar la vida útil de nuevas estructuras.

El proceso de diseño para conseguir una adecuada durabilidad es un proceso complicado. La degradación provocada por los procesos físicos y químicos depende del transporte de sustancias nocivas a través del hormigón.

Además de algunas consideraciones de diseño la norma habla sobre los problemas que afectan a la durabilidad como los ataques químicos, la lixiviación, ataques ácido-base, los árido- álcali, etc. Nosotros vamos a centrarnos en la Corrosión, en la degradación por carbonatación e iones de cloruro.

5.2.1 Métodos de aproximación para predecir la vida útil de hormigones

Estos métodos son utilizados para predecir la vida útil de materiales de construcción como la predicción basada en la experiencia, en la comparación de resultados entre materiales similares, resultados de pruebas aceleradas, modelos matemáticos y una aplicación de los conceptos estocásticos y de fiabilidad. Normalmente estos métodos se usan de una manera combinada.

- *Predicción basada en la experiencia*: es una predicción semicuantitativa que se basa en la acumulación de experiencia del laboratorio y ensayos. La experiencia ha demostrado que si el hormigón está fabricado bajo las normas de calidad en fábrica éste cumple bien su función para una vida útil corta y sin estar sometido a condiciones severas. Esto cambia si la vida útil es más larga y las condiciones severas no son tan claras.
- *Predicción basada en la comparación de resultados*: aunque una estructura de hormigón sea muy parecida a otra que ya tiene 5 años con el mismo tipo de ambiente y con la misma vida útil, los detalles como la granulometría del árido, la geometría y la distribución de cargas cambian ese parecer. Este método es desaconsejable.
- *Resultados de pruebas aceleradas*: este método fue propuesto para la predicción de vida útil de muchos de los materiales de edificación. El mecanismo de degradación en la prueba acelerada debe ser el mismo que el

que está activo en la estructura. Si la degradación evoluciona de una manera proporcional en ambos casos el factor de aceleración K puede obtenerse de la siguiente manera:

$$K = R_{AT} / R_{LT}$$

Donde R_{AT} es el grado de degradación en las pruebas aceleradas y R_{LT} el grado de degradación en la prueba de a largo plazo. La norma ASTM E 632¹¹ proporciona unas recomendaciones en este tema.

5.2.2 Modelos matemáticos

Estos modelos matemáticos no son mucho mejores que los explicados anteriormente. Muchas de las degradaciones son asociadas con la intrusión en el hormigón de agua, sales o gases. Con los modelos matemáticos podemos calcular el grado de penetración de estos intrusos, por convección o difusión.

5.2.2.1 Modelos de corrosión en el acero

La mayoría de los modelos de corrosión se basan en el modelo de Tuutti (1982) ya explicado anteriormente.

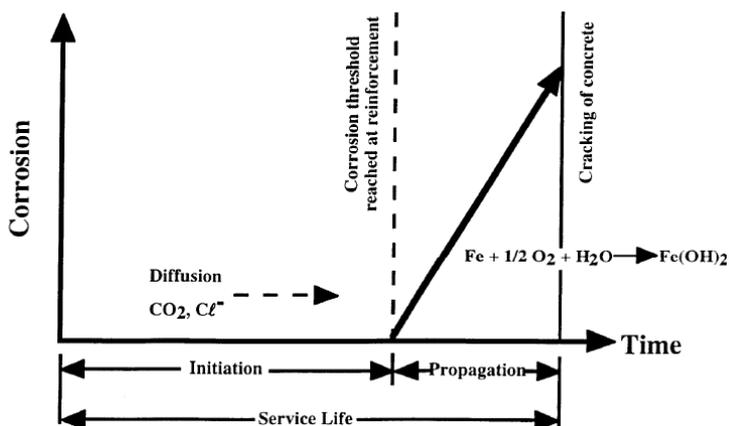


Ilustración 14. Modelo de Tuutti ACI 365.1R-00 (Fig. 4.1)

El proceso de corrosión se inicia o bien por la difusión de iones de cloruro o por carbonatación, por disminución del pH del hormigón, o la combinación de ambos. Otro proceso importante como la sorción depende del tiempo, $t^{1/2}$.

El proceso de difusión sigue la 2ª ley de Fick (1):

$$\partial c_f / \partial t = D \partial^2 c_f / \partial x^2$$

Dónde:

D = coeficiente de difusión

¹¹ ASTM E 632- Standard Practice for Developing Accelerated Tests to Aid Prediction of the Service Life of Building Components and Materials

x = distancia de la superficie al acero

t = tiempo

Como los iones de cloruro contienen aluminato de tricalcio del cemento portland, la concentración tiene dos componentes: concentración de cloruros unidos c_b y concentración de cloruros libres c_f , relacionados a través de R , que suele ser 0.

$$c_b = R * c_f$$

De acuerdo con el modelo de Tuutti el grado de propagación de corrosión es controlada por el grado de difusión del oxígeno en el cátodo, la resistencia a solución de los poros la temperatura. El periodo de iniciación suele ser más duradero que el de propagación y se suele tener en cuenta el periodo de iniciación.

El periodo inicial de corrosión se determina: C_0 es la concentración de iones de cloruros en la superficie del hormigón y C_i es la concentración en profundidad del refuerzo, que inicialmente es 0. El periodo de iniciación termina cuando $C_f = C_t$ concentración crítica de cloruros. La solución a la ecuación bajo unas condiciones ambientales constantes es:

$$\frac{C}{C_0}(Z, t) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n = \left[\operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1) - y}{2\sqrt{r}} \right\} + \operatorname{erfc} \left\{ \frac{(2n+1) + y}{2\sqrt{r}} \right\} \right]$$

Dónde:

- erfc = función error
- $y = (L - x)/L$
- $r = Dt/L^2$
- t = tiempo
- n = solución general, es la suma de todos los términos posibles
- D = coeficiente de difusión
- x = el recubrimiento
- L = espesor del elemento de hormigón

En este caso, sin embargo, la ecuación anterior solo se considera para $n = 0$. La ecuación se reduce para términos de orden mayor:

$$\frac{C}{C_0} = \operatorname{erfc} \frac{(1-y)}{2\sqrt{r}}$$

Dónde:

- $1-y = x/L$

El modelo fue resuelto para el caso donde la concentración límite de cloruros C_t es de 0.4% de la masa de cemento, la concentración de cloruros en la superficie del hormigón es de 0.7% de la masa del cemento, $x = 50$ mm, $L = 300$ mm y $C_i = 0$ en un tiempo $t = 0$.

Los resultados para diferentes recubrimientos y coeficientes de difusión se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 30. Recubrimiento y coeficiente de difusión en el momento de inicio de la corrosión.

Recubrimiento, mm	Coeficiente de difusión D, m ² /s		
	5x10 ¹¹	5x10 ¹²	5x10 ¹³
	Tiempo , yr		
25	0.56	5.60	56.00
50	2.30	23.00	230
75	5.00	50.00	500
100	9.00	90.00	900

Basado en $C_t/C_0 = 0.5$ con $C_t = 0.4\%$ y $L = 300$ mm

Como conclusión se obtiene que el recubrimiento es proporcional a x^2 . Por ejemplo incrementando la x del 25 a 100 mm la vida útil incrementa un $(100/25)^2$ o 16 veces. También si reducimos 10 veces el coeficiente de difusión, incrementamos 10 veces la vida útil.

Diferentes soluciones de la segunda ecuación de Fick se desarrollaron para evaluar el hormigón bajo unas condiciones ambientales que varían en el tiempo. En tal caso, la concentración de cloruros también varía en el tiempo. Para obtener la relación que permite una acumulación de cloruros, una ecuación diferente debe ser usada debido a los cambios del entorno.

Aunque no exista una conclusión definitiva para que la función $\varphi(t)$ debe ser asignada en representación de dicha acumulación, existe una relación de apoyo bien lineal o bien de raíz cuadrada a través del tiempo.

Para el caso de que $\varphi(t) = kt$, donde k es la constante lineal de acumulación, la solución simplificada es la siguiente:

$$C(x, t) = kt \left\{ \left(1 + \frac{x^2}{2Dt} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) - \left(\frac{x}{\sqrt{\pi Dt}} \right) e^{-x^2/4Dt} \right\}$$

Dónde:

- erfc = función error

Para $\varphi(t) = k\sqrt{t}$, donde k es la constante:

$$C(x, t) = k\sqrt{t} \left\{ e^{-x^2/4Dt} - \left(\frac{x\sqrt{\pi}}{2\sqrt{Dt}} \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \right\}$$

Estas ecuaciones son más apropiadas para la evaluación de la sal del deshielo transmitida por el aire. La información adicional se puede obtener de Vesikari (1988),

que describe modelos mecanicistas empíricamente ajustados a los datos de estudios de campo y de laboratorio, y HETEK (1996).

5.2.2.2 Predicción de lo que queda de vida útil:

Los métodos utilizados para la predicción del resto de la vida útil es básicamente igual que para estructuras nuevas. Estos métodos involucran las siguientes acciones: determinar las condiciones del hormigón, identificar las causas de las degradaciones, etc.

- Fallo debido a la corrosión:

Los dos principales enfoques son el modelo de aproximación y medidas de corrosión.

5.2.2.2.1 Medidas de aproximación:

El modelo de aproximación se presenta en la obra de Browne (1980). El uso el modelo de difusión para la predicción del resto de la vida útil en estructuras de hormigón de acero. Solo se tiene en cuenta el periodo de iniciación y asume que la difusión de los iones de cloruros es proceso de controlar la velocidad.

Se pueden seguir los siguientes pasos para predecir la vida útil:

- Las muestras se obtienen del hormigón estructural cogiendo desde la superficie hasta la profundidad donde se pueda determinar el contenido de iones de cloruros.
- La siguiente ecuación es la se usa para obtener los valores de C_0 y D_{Cl} :

$$C(x, t) = C_0[1 - \text{erf}(x/2(D_{Cl}t)^{1/2})]$$

Dónde:

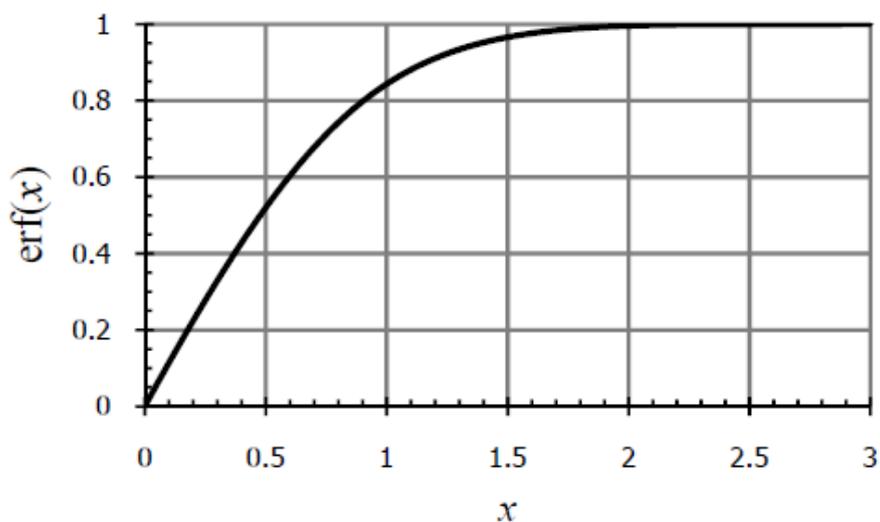
- $C(x, t)$ = concentración de cloruros a una distancia x después de un tiempo t para una concentración de cloruros en la superficie C_0
- D_{Cl} = coeficiente de difusión de iones de cloruros
- erf = función error.

Una vez que el valor de C_0 y D_{Cl} se obtienen, la concentración de iones de cloruro a cualquier distancia de la superficie, a un tiempo dado, se puede calcular.

La concentración de iones de cloruro de 0.4% de la masa de cemento, es usada por Browne (1980) como valor límite. El tiempo para alcanzar la concentración límite en la profundidad de la armadura da la vida de servicio restante.

La función error no viene entablada en la norma pero como es común y constante para todos utilizaremos bien la siguiente gráfica o bien la siguiente tabla:

Grafica 5. Función error



z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$	z	$\text{erf}(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

5.2.2.2.2 Medidas de la corrosión:

La medición de la densidad de corrosión es utilizada para la estimación de la vida útil del hormigón armado donde la corrosión es el proceso límite de degradación.

Rodríguez y Andrade (1990) y Andrade (1989,1990) modelaron la densidad corriente de corrosión para estimar el resto de la vida útil de una estructura. El modelo mezcla la reducción de sección del acero en lugar del agrietamiento o desconchado del hormigón. La reducción del diámetro del acero se relaciona:

$$\theta(t) = \theta_i - 0.023 * i_{corr} * t$$

Dónde:

- $\theta(t)$ = diámetro del acero reforzado en el tiempo t , en mm

- θ_i = diámetro inicial, en mm
- i_{corr} = grado de corrosión ($\mu A/cm^2$)
- t = tiempo después del inicio de la propagación en años
- 0.023 = factor de conversión de $\mu A/cm^2$ dentro mm/año

El resultado se convierte en la predicción de la vida útil modelando los efectos de la reducción de la sección transversal en la capacidad de carga del hormigón armado.

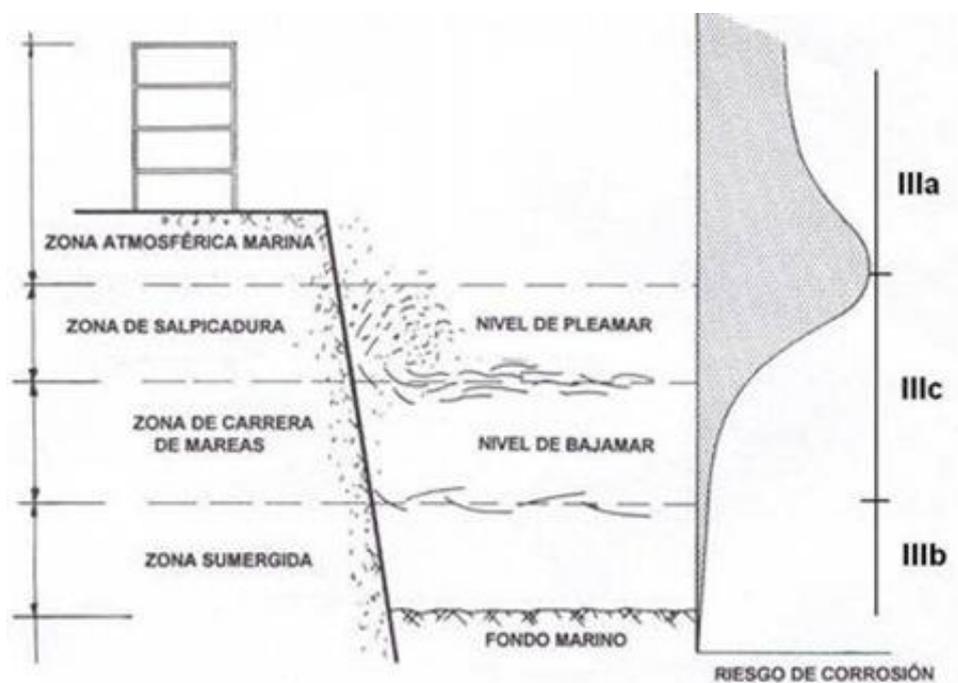
Basándose en las combinaciones de resultados del laboratorio, exposición a la intemperie y los estudios de campo, Clear (1989) sugirió usar la relación entre el grado de corrosión (que se asume que es como constante con el tiempo) i_{corr} y el resto de la vida útil:

- i_{corr} menor que $0.5 \mu A/cm^2$ – sin daños de corrosión esperados;
- i_{corr} entre 0.5 y $2.7 \mu A/cm^2$ – posibles daños de corrosión entre 10 y 15 años;
- i_{corr} entre 2.7 y $27 \mu A/cm^2$ – posible daño de corrosión esperado entre 2 y 10 años
- i_{corr} mayor que $27 \mu A/cm^2$ – posible daño de corrosión esperado en 2 años o menos.

6. EJEMPLO NUMÉRICO DE ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEBIDA A LA CORROSIÓN.

Este capítulo pretende hacer un análisis de métodos de cálculo de una estructura con los modelos propuestos por la EHE-08, modelo de carbonatación e iones de cloruros, y ACI 365.1R-00, 2ª ley de Fick.

El problema a desarrollar es una propuesta de construcción de una estructura de hormigón armado a pie de la costa atlántica, para ello se realizaron las comprobaciones con las siguientes clases de exposición:



Como tenemos un riesgo de corrosión nuestra labor es encontrar la mejor combinación de todas esas condiciones influyentes en la vida útil de la estructura comentada en los capítulos anteriores.

En primer lugar trataremos todas las condiciones del Anejo 9º de la EHE-08, de las que obtendremos unos cuadros resúmenes.

Después se resolverá el mismo problema con la norma americana ACI 365.1R-00, con sus propios cuadros resúmenes y correspondientes conclusiones.

6.1 La corrosión según el Anejo 9º.

Se trata de una estructura a pie de la costa que va estar en contacto con el agua marina permanentemente. Las clases de exposición son *IIIa* (hasta 500m), *IIIb* y *IIIc*. La vida útil de proyecto es de 50 años y la Resistencia mínima de 30 N/mm² y el nivel de ejecución normal.

El mínimo contenido de cemento es 300 kg/m³ –*IIIa*; 325 kg/m³ - *IIIb*; 350 kg/m³ - *IIIc*; y la máxima relación $a/c = 0.50$ para *IIIa*, *IIIb* y $a/c = 0.55$ para *IIIc*, el recubrimiento mínimo se obtendrá del Artículo 37º de la Instrucción, que irán variando según el mismo y el Anejo.

6.1.1 Verificación numérica para los ataques por Carbonatación.

La comprobación de Carbonatación se realizará con una clase de exposición *IIb*, *corrosión de origen diferente a cloruros*, en una localización más alejada de la costa. El recubrimiento para una clase de exposición *IIb* sería de 20 mm para CEM I y 25 mm para otro tipo de cemento.

Período de iniciación:

$$t = (d/K_c)^2$$

Coeficiente de carbonatación:

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

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 30 + 8 = 38 \text{ N/mm}^2$$

Ambiente	c_{env}
Protegido de la lluvia	1
Expuesto a la lluvia	0.5

Aire ocluido %	c_{air}
< 4.5	1
≥ 4.5	0.7

Conglomerantes:

1) Cemento Portland:

$$a = 1800$$

$$b = -1.7$$



$$a \cdot f_{cm}^b = 3.71$$

a) *Protegido de la lluvia y < 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 1 \cdot 3.71 = 3.71$$

i. El caso en el que queremos calcular el diámetro mínimo necesario:

$$55 = (d/3.71)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 3.71 = 27.51 \text{ mm}$$

ii) Para calcular el tiempo en que tardaría en iniciarse la carbonatación podemos utilizar bien el CEM I o CEM II u otro tipo de cemento, lo que cambiaría es el recubrimiento:

$$\text{CEM I: } t = (20/3.71)^2 = 29.06 \text{ años}$$

$$\text{CEM II: } t = (25/3.71)^2 = 45.41 \text{ años}$$

b) *Protegido de la lluvia y ≥ 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 0.7 \cdot 3.71 = 2.60$$

i) $55 = (d/2.60)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 2.60 = 19.28 \text{ mm}$

ii) CEM I: $t = (20/2.60)^2 = 59.17 \text{ años}$

CEM II: $t = (25/2.60)^2 = 92.46 \text{ años}$

c) *Expuesto a la lluvia y $< 4.5\%$ de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 1 \cdot 3.71 = 1.86$$

i) $55 = (d/1.86)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 1.86 = 13.79 \text{ mm}$

ii) CEM I: $t = (20/1.86)^2 = 115.62 \text{ años}$

CEM II: $t = (25/1.86)^2 = 180.66 \text{ años}$

d) *Expuesto a la lluvia y ≥ 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 0.7 \cdot 3.71 = 1.30$$

i) $55 = (d/1.30)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 1.30 = 9.64 \text{ mm}$

ii) CEM I: $t = (20/1.30)^2 = 236.69 \text{ años}$

CEM II: $t = (25/1.30)^2 = 369.82 \text{ años}$

2) Cem. Portland + 28% cenizas volantes / Cem. Portland + 65% escorias:

$$a = 360$$

$$b = -1.2$$



$a \cdot f_{cm}^b = 4.58$

a) *Protegido de la lluvia y < 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 1 \cdot 4.58 = 4.58$$

i) $55 = (d/4.58)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 4.58 = 33.97 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/4.58)^2 = 29.80 \text{ años}$

b) *Protegido de la lluvia y ≥ 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 0.7 \cdot 4.58 = 3.21$$

i) $55 = (d/3.21)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 3.21 = 23.81 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/3.21)^2 = 60.66 \text{ años}$

c) *Expuesto a la lluvia y <4.5% de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 1 \cdot 4.58 = 2.29$$

i) $55 = (d/2.29)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 2.29 = 16.98 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/2.29)^2 = 69.91 \text{ años}$

d) *Expuesto a la lluvia y $\geq 4.5\%$ de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 0.7 \cdot 4.58 = 1.60$$

i) $55 = (d/1.60)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 1.60 = 11.87 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/1.60)^2 = 244.14 \text{ años}$

3) Cem. Portland + 9% humo de sílice:

$$a = 400$$

$$b = -1.2$$



$a \cdot f_{cm}^b = 5.08$

a) *Protegido de la lluvia y < 4.5 % de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 1 \cdot 5.08 = 5.08$$

i) $55 = (d/5.08)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 5.08 = 37.67 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/5.08)^2 = 24.22 \text{ años}$

b) *Protegido de la lluvia y $\geq 4.5\%$ de aire ocluido:*

$$K_c = 1 \cdot 0.7 \cdot 5.08 = 3.56$$

i) $55 = (d/3.56)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 3.56 = 26.40 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/3.56)^2 = 49.32 \text{ años}$

c) *Expuesto a la lluvia y <4.5% de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 1 \cdot 5.08 = 2.54$$

i) $55 = (d/2.54)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 2.54 = 18.84 \text{ mm}$

ii) CEM II: $t = (25/2.54)^2 = 96.89 \text{ años}$

d) *Expuesto a la lluvia y $\geq 4.5\%$ de aire ocluido:*

$$K_c = 0.5 \cdot 0.7 \cdot 5.08 = 1.78$$

i) $55 = (d/1.78)^2 \longrightarrow d = 55^{1/2} \cdot 1.78 = 13.20 \text{ mm}$

ii) CEM III: $t = (25/1.78)^2 = 197.26 \text{ años}$

Período de propagación:

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

Clase general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m/años}$)
Normal	Humedad alta	Ila	3
	Humedad media	IIb	2

a) Para el CEM I el recubrimiento es de 20 mm:

- i) El diámetro ϕ 6: $t_p = \frac{80 \cdot 20}{6 \cdot 2} = 133.33$ años
- ii) El diámetro ϕ 8: $t_p = 100$ años
- iii) El diámetro ϕ 12: $t_p = 66.66$ años
- iv) El diámetro ϕ 16: $t_p = 50$ años
- v) El diámetro ϕ 20: $t_p = 40$ años
- vi) El diámetro ϕ 25: $t_p = 32$ años

b) Para el CEM II/ CEM III recubrimiento de 25 mm:

- i) El diámetro ϕ 6: $t_p = 166.66$ años
- ii) El diámetro ϕ 8: $t_p = 125$ años
- iii) El diámetro ϕ 12: $t_p = 83.33$ años
- iv) El diámetro ϕ 16 $t_p = 62.50$ años
- v) El diámetro ϕ 20: $t_p = 50$ años
- vi) El diámetro ϕ 25: $t_p = 40$ años

Los cuadros de a continuación muestran el valor de vida útil para diferentes diámetros de la armadura y con el mejor valor de período de iniciación, que coincide en todos los casos, cuando la estructura está *expuesta a la lluvia* con $\geq 4.5\%$ de aire ocluido.

Habría que decir que los diámetro 6 y 8 son normalmente para cercos y estribos. La carbonatación que nos interesa es la que afecta a la armadura longitudinal, que es a partir del diámetro 12.

6.1.2 Cuadros resúmenes:

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años \varnothing 6	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	133.33	370.02
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	166.66	536.48
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	166.66	410.80
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	166.66	363.92

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años \varnothing 8	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	100	336.69
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	125	494.82
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	125	369.14
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	125	322.26

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años ϕ 12	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	66.66	303.35
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	83.33	453.15
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	83.33	327.47
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	83.33	280.59

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años ϕ 16	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	50	286.69
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	62.50	432.32
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	62.50	306.64
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	62.50	259.76

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años ϕ 20	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	40	276.69
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	50	419.82
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	50	294.14
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	50	247.26

Clase de exposición IIb	Cemento	Recubrimien to s/ art. 37º en mm	Recubrimien to s/ anejo 9º en mm	Periodo de iniciación en años	Periodo de propagación en años ϕ 25	Valor estimado de vida útil
Cemento Portland	CEM I	20	9.64- 10	236.69	32	268.69
	CEM II	25	9.64- 10	369.82	40	409.82
Cem. Portland +28% de cenizas volantes/ Cem. Portland + 65% escorias	CEM II	25	11.87- 15	244.14	40	284.14
Cem. Portland +9% humo de sílice	CEM III	25	13.20- 15	197.26	40	237.26

Conclusiones:

- La primera observación que se puede hacer es que el coeficiente de carbonatación es mayor en los hormigones que contienen adiciones, es decir, hormigones con humo de sílice, cenizas volantes y escorias. Los mejores valores obtenidos son los que contienen el Cemento Portland, CEM II, por ejemplo, la vida útil de la armadura del diámetro 12 se reduce 0.60 veces en comparación con el Cem. Portland con 9% de humo de sílice.
- La exposición a la lluvia reduce el recubrimiento casi a la mitad que estando protegida, y aumenta la vida útil casi 4 veces.
- El contenido de aire ocluido varía el espesor de recubrimiento casi 1.5 veces y casi 2 veces la vida útil.

6.1.3 Verificación numérica para los ataques de iones de Cloruros.

Período de iniciación

$$t = (d/K_{cl})^2$$

Coeficiente de penetración de cloruros:

$$K_{cl} = \alpha \sqrt{12D(t)} \left(1 - \sqrt{\frac{cth - c_b}{c_s - c_b}} \right)$$

Coeficiente de difusión:

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

$$t_0 = 0.0767$$

$$n = 0.5$$

$$t = 55 \text{ años } (= 50 \cdot 1.10)$$

Coeficiente $D(t_0)$ ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

Tipo de cemento	a/c=0.40	a/c=0.45	a/c=0.50	a/c=0.55	a/c=0.60
CEM I	8.9	10.0	15.8	19.7	25.0
CEM II/A-V	5.6	6.9	9.0	10.9	14.9
CEM III	1.4	1.9	2.8	3.0	3.4

$$\alpha = 56157$$

$C_{th} = 0.6\%$ del peso de cemento

$C_b = 0$ (no puede superar 0.4% del peso de cemento)

$$C_s = C_s (\% \text{ peso del hormigón}) \cdot (2300 / \text{contenido de cemento}) = 0.72 \cdot (2300 / 325) = 5.09$$

Clase general de exposición	IIIa		IIIb	IIIc	IV
	Hasta 500 m	500 m- 5000 m	Cualquiera		-
C_s % peso del hormigón	0.14	0.07	0.72	0.50	0.50

Para el ambiente IIIa, $C_s=1.07$ y $C_b=0$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

$$i) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 2.81$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.81 = 20.84 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 7.66 / t^{1/4}$$

$$t = (45 \cdot t^{1/4} / 7.66)^2 \longrightarrow t = (34.51)^2 = 1191.06 \text{ años}$$

a/c =0.45:

$$i) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 2.98$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.98 = 22.10 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 8.13 / t^{1/4}$$

$$t = (45 \cdot t^{1/4} / 8.13)^2 \longrightarrow t = (30.64)^2 = 938.62 \text{ años}$$

a/c =0.50:

$$i) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 3.75$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.75 = 27.81 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 10.20 / t^{1/4}$$

$$t = (45 \cdot t^{1/4} / 10.20)^2 \longrightarrow t = (19.46)^2 = 378.83 \text{ años}$$

a/c =0.55:

i) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 4.19$

$d = (55)^{1/2} \cdot 4.19 = 31.07 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 11.50 / t^{1/4}$

$t = (45 \cdot t^{1/4} / 11.50)^2 \longrightarrow t = (15.31)^2 = 234.45 \text{ años}$

a/c =0.60:

i) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 4.72$

$d = (55)^{1/2} \cdot 4.72 = 35 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 12.85 / t^{1/4}$

$t = (45 \cdot t^{1/4} / 12.85)^2 \longrightarrow t = (12.26)^2 = 150.40 \text{ años}$

b) Para CEM III/A-V

a/c =0.40

i) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 2.23$

$d = (55)^{1/2} \cdot 2.23 = 16.54 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 6.08 / t^{1/4}$

$t = (25 \cdot t^{1/4} / 6.08)^2 \longrightarrow t = (16.90)^2 = 285.85 \text{ años}$

a/c =0.45

i) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 2.48$

$d = (55)^{1/2} \cdot 2.48 = 18.39 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 6.75/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 6.75)^2 \longrightarrow t = (13.72)^2 = 188.16 \text{ años}$$

a/c = 0.50

i) $D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 2.83$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.83 = 21 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 7.71/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 7.71)^2 \longrightarrow t = (10.51)^2 = 110.55 \text{ años}$$

a/c = 0.55

i) $D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 3.12$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.12 = 23.14 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 8.49/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 8.49)^2 \longrightarrow t = (8.67)^2 = 75.18 \text{ años}$$

a/c = 0.60

i) $D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 3.64$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.64 = 27 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 9.93 / t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 9.93)^2 \longrightarrow t = (6.34)^2 = 40.18 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$i) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 1.12$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 1.12 = 8.30 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 3.04/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 3.04)^2 \longrightarrow t = (67.63)^2 = 4573.68 \text{ años}$$

a/c =0.45

$$i) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 1.30$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 1.30 = 9.64 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 3.54/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 3.57)^2 \longrightarrow t = (49.04)^2 = 2404.85 \text{ años}$$

a/c =0.50

$$i) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 1.57$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 1.57 = 11.64 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 4.30/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 4.30)^2 \longrightarrow t = (33.80)^2 = 1142.58 \text{ años}$$

a/c =0.55

$$i) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 1.64$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 1.64 = 12.16 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 4.45/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 4.45)^2 \longrightarrow t = (31.56)^2 = 996.14 \text{ años}$$

a/c = 0.60

i) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 1.74$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 1.74 = 12.90 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/1.07)^{1/2}) = 4.74/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 4.74)^2 \longrightarrow t = (27.82)^2 = 773.83 \text{ años}$$

Para el ambiente IIIa, $C_s= 1.07$ y $C_b= 0.4$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

i) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 6.36$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 6.36 = 66.67 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 17.32 / t^{1/4}$
 $t = (45 \cdot t^{1/4} / 17.32)^2 \longrightarrow t = (6.75)^2 = 45.57 \text{ años}$

a/c =0.45:

i) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 6.74$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 6.74 = 50 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 18.38 / t^{1/4}$
 $t = (45 \cdot t^{1/4} / 18.38)^2 \longrightarrow t = (6)^2 = 35.94 \text{ años}$

a/c =0.50:

i) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 8.48$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 8.48 = 62.89 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07))^{1/2} = 23.81 / t^{1/4}$
 $t = (45 \cdot t^{1/4} / 23.81)^2 \longrightarrow t = (3.57)^2 = 12.76 \text{ años}$

a/c =0.55:

$$\begin{aligned}
 \text{i) } D(t) &= 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 9.46 \\
 d &= (55)^{1/2} \cdot 9.46 = 70.16 \text{ mm} \\
 \text{ii) } D(t) &= 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 25.78/t^{1/4} \\
 t &= (45 \cdot t^{1/4}/25.78)^2 \longrightarrow t = (3.05)^2 = 9.28 \text{ años}
 \end{aligned}$$

a/c =0.60:

$$\begin{aligned}
 \text{i) } D(t) &= 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 10.66 \\
 d &= (55)^{1/2} \cdot 10.66 = 79.05 \text{ mm} \\
 \text{ii) } D(t) &= 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 27.70/t^{1/4} \\
 t &= (45 \cdot t^{1/4}/27.70)^2 \longrightarrow t = (2.64)^2 = 6.96 \text{ años}
 \end{aligned}$$

b) Para CEM II/ A-V

a/c =0.40

$$\begin{aligned}
 \text{i) } D(t) &= 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 5.05 \\
 d &= (55)^{1/2} \cdot 5.05 = 37.45 \text{ mm} \\
 \text{ii) } D(t) &= 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 13.75/t^{1/4} \\
 t &= (25 \cdot t^{1/4}/13.75)^2 \longrightarrow t = (3.30)^2 = 10.93 \text{ años}
 \end{aligned}$$

a/c =0.45

$$\begin{aligned}
 \text{i) } D(t) &= 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9} \\
 K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 5.61
 \end{aligned}$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 5.61 = 41.60 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 15.26/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 15.26)^2 \longrightarrow t = (2.68)^2 = 7.18 \text{ años}$$

a/c = 0.50

$$\text{i) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 6.40$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 6.40 = 47.46 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 17.42/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 17.42)^2 \longrightarrow t = (2.06)^2 = 4.24 \text{ años}$$

a/c = 0.55

$$\text{i) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 7.04$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.04 = 52.21 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 19.19/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 19.19)^2 \longrightarrow t = (1.70)^2 = 2.88 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 8.23$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 8.23 = 61.03 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 22.44 / t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 22.44)^2 \longrightarrow t = (1.24)^2 = 1.54 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$i) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 2.52$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.52 = 18.69 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 6.88/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4}/6.88)^2 \longrightarrow t = (13.20)^2 = 174.34 \text{ años}$$

a/c =0.45

$$i) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 2.94$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.94 = 21.80 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 8/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4}/8)^2 \longrightarrow t = (9.76)^2 = 95.37 \text{ años}$$

a/c =0.50

$$i) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 3.56$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.56 = 26.40 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 9.72/t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4}/9.72)^2 \longrightarrow t = (6.61)^2 = 43.76 \text{ años}$$

a/c =0.55

$$i) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 3.69$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.69 = 27.36 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 10.06 / t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 10.06)^2 \longrightarrow t = (6.17)^2 = 38.14 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 3.94$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.94 = 29.22 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/1.07)^{1/2}) = 10.72 / t^{1/4}$$

$$t = (25 \cdot t^{1/4} / 10.72)^2 \longrightarrow t = (5.44)^2 = 29.58 \text{ años}$$

Para el ambiente IIIb, $C_s=5.09$ y $C_b=0$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

$$i) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 7.36$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.36 = 54.58 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 20.04 / t^{1/4}$$

$$t = (40 \cdot t^{1/4} / 20.04)^2 \longrightarrow t = (3.98)^2 = 15.87 \text{ años}$$

a/c =0.45:

$$i) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 7.80$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.80 = 57.85 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 21.26 / t^{1/4}$$

$$t = (40 \cdot t^{1/4} / 21.26)^2 \longrightarrow t = (3.54)^2 = 12.53 \text{ años}$$

a/c =0.50:

$$i) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 9.81$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 9.81 = 72.75 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 26.67 / t^{1/4}$$

$$t = (40 \cdot t^{1/4} / 26.67)^2 \longrightarrow t = (2.25)^2 = 5.06 \text{ años}$$

a/c =0.55:

i) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 10.95$

$d = (55)^{1/2} \cdot 10.95 = 81.21 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 29.84 / t^{1/4}$

$t = (40 \cdot t^{1/4} / 29.84)^2 \longrightarrow t = (1.80)^2 = 3.23 \text{ años}$

a/c =0.60:

i) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 16.48$

$d = (55)^{1/2} \cdot 16.48 = 122.22 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 33.61 / t^{1/4}$

$t = (40 \cdot t^{1/4} / 33.61)^2 \longrightarrow t = (1.42)^2 = 2 \text{ años}$

b) Para CEM III/ A-V

a/c =0.40

i) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 5.84$

$d = (55)^{1/2} \cdot 5.84 = 43.31 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 15.90 / t^{1/4}$

$t = (30 \cdot t^{1/4} / 15.90)^2 \longrightarrow t = (3.56)^2 = 12.67 \text{ años}$

a/c =0.45

i) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 6.48$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 6.48 = 48.05 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 17.66 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 17.66)^2 \longrightarrow t = (2.88)^2 = 8.33 \text{ años}$$

a/c = 0.50

$$\text{i) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 7.41$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.41 = 54.95 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 20.17 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 20.17)^2 \longrightarrow t = (2.21)^2 = 4.89 \text{ años}$$

a/c = 0.55

$$\text{i) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 8.15$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 8.15 = 60.44 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 22.19 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 22.19)^2 \longrightarrow t = (1.83)^2 = 3.34 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 9.53$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 9.53 = 70.67 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 25.95 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 25.95)^2 \longrightarrow t = (1.33)^2 = 1.78 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$i) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 2.92$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.92 = 21.65 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 7.95 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 7.95)^2 \longrightarrow t = (14.24)^2 = 202.77 \text{ años}$$

a/c =0.45

$$i) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 3.40$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.40 = 25.21 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 9.27 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 9.27)^2 \longrightarrow t = (10.47)^2 = 109.70 \text{ años}$$

a/c =0.50

$$i) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 4.13$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 4.13 = 30.63 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 11.25 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 11.25)^2 \longrightarrow t = (7.11)^2 = 50.57 \text{ años}$$

a/c =0.55

$$i) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 4.27$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 4.27 = 31.67 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 11.64 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 11.64)^2 \longrightarrow t = (6.64)^2 = 44.12 \text{ años}$$

a/c = 0.60

i) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 4.55$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 4.55 = 33.74 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/5.09)^{1/2}) = 12.40 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 12.40)^2 \longrightarrow t = (5.85)^2 = 34.26 \text{ años}$$

Para el ambiente IIIb, $C_s= 5.09$ y $C_b= 0.4$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

- i) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 8.99$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 8.99 = 66.67 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 24.46 / t^{1/4}$
 $t = (40 \cdot t^{1/4} / 24.46)^2 \longrightarrow t = (2.67)^2 = 7.15 \text{ años}$

a/c =0.45:

- i) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 9.53$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 9.53 = 70.67 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 25.96 / t^{1/4}$
 $t = (40 \cdot t^{1/4} / 25.96)^2 \longrightarrow t = (2.37)^2 = 5.64 \text{ años}$

a/c =0.50:

- i) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 11.98$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 11.98 = 88.85 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 32.57 / t^{1/4}$
 $t = (40 \cdot t^{1/4} / 32.57)^2 \longrightarrow t = (1.51)^2 = 2.27 \text{ años}$

a/c =0.55:

- i) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 13.37$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 13.37 = 99.15 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 36.41 / t^{1/4}$
 $t = (40 \cdot t^{1/4} / 36.41)^2 \longrightarrow t = (1.20)^2 = 1.46 \text{ años}$

a/c =0.60:

- i) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 15.06$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 15.06 = 111.73 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 41.03 / t^{1/4}$
 $t = (40 \cdot t^{1/4} / 41.03)^2 \longrightarrow t = (0.95)^2 = 0.90 \text{ años}$

b) Para CEM II/ A-V

a/c =0.40

- i) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 7.13$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 7.13 = 52.88 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 19.42 / t^{1/4}$
 $t = (30 \cdot t^{1/4} / 19.42)^2 \longrightarrow t = (2.38)^2 = 5.70 \text{ años}$

a/c =0.45

- i) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 7.92$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.92 = 58.74 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 21.55 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 21.55)^2 \longrightarrow t = (1.94)^2 = 3.76 \text{ años}$$

a/c = 0.50

$$\text{i) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 9.04$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 9.04 = 67.04 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 24.61 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 24.61)^2 \longrightarrow t = (1.48)^2 = 2.21 \text{ años}$$

a/c = 0.55

$$\text{i) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 9.95$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 9.95 = 73.79 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 27.10 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 27.10)^2 \longrightarrow t = (1.22)^2 = 1.50 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 11.63$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 11.63 = 86.25 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09))^{1/2} = 31.70 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 31.70)^2 \longrightarrow t = (0.89)^2 = 0.80 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$i) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 3.57$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.57 = 26.48 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 9.71 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 9.71)^2 \longrightarrow t = (9.54)^2 = 91.12 \text{ años}$$

a/c =0.45

$$i) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 4.15$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 4.15 = 30.77 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 11.31 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 11.31)^2 \longrightarrow t = (7.04)^2 = 49.50 \text{ años}$$

a/c =0.50

$$i) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 5.03$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 5.03 = 37.30 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 13.73 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 13.73)^2 \longrightarrow t = (4.77)^2 = 22.80 \text{ años}$$

a/c =0.55

$$i) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 5.22$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 5.22 = 38.71 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 14.22 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 14.22)^2 \longrightarrow t = (4.45)^2 = 19.81 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 5.55$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 5.55 = 41.16 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/5.09)^{1/2}) = 15.14 / t^{1/4}$$

$$t = (30 \cdot t^{1/4} / 15.14)^2 \longrightarrow t = (3.92)^2 = 15.51 \text{ años}$$

Para el ambiente IIIc, $C_s= 3.28$ y $C_b= 0$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

$$i) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 6.41$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 6.41 = 47.54 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 17.46 / t^{1/4}$$

$$t = (50 \cdot t^{1/4} / 17.46)^2 \longrightarrow t = (8.20)^2 = 67.25 \text{ años}$$

a/c =0.45:

$$i) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 6.80$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 6.80 = 50.43 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 18.53 / t^{1/4}$$

$$t = (50 \cdot t^{1/4} / 18.53)^2 \longrightarrow t = (7.28)^2 = 53.01 \text{ años}$$

a/c =0.50:

$$i) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 8.55$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 8.55 = 63.41 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 23.25 / t^{1/4}$$

$$t = (50 \cdot t^{1/4} / 23.25)^2 \longrightarrow t = (4.62)^2 = 21.40 \text{ años}$$

a/c =0.55:

i) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 9.54$

$d = (55)^{1/2} \cdot 9.54 = 70.75 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 26 / t^{1/4}$

$t = (50 \cdot t^{1/4} / 26)^2 \longrightarrow t = (3.70)^2 = 13.67 \text{ años}$

a/c =0.60:

i) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 10.75$

$d = (55)^{1/2} \cdot 10.75 = 79.72 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 29.28 / t^{1/4}$

$t = (50 \cdot t^{1/4} / 29.28)^2 \longrightarrow t = (2.91)^2 = 8.50 \text{ años}$

b) Para CEM III/A-V

a/c =0.40

i) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 5.09$

$d = (55)^{1/2} \cdot 5.09 = 37.75 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 13.86 / t^{1/4}$

$t = (35 \cdot t^{1/4} / 13.86)^2 \longrightarrow t = (6.37)^2 = 40.66 \text{ años}$

a/c =0.45

i) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9}$

$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 5.65$

$d = (55)^{1/2} \cdot 5.65 = 41.90 \text{ mm}$

ii) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 15.38 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 15.38)^2 \longrightarrow t = (5.18)^2 = 26.82 \text{ años}$$

a/c = 0.50

i) $D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 6.45$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 6.45 = 47.83 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 17.57 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 17.57)^2 \longrightarrow t = (3.97)^2 = 15.75 \text{ años}$$

a/c = 0.55

i) $D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 7.10$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.10 = 52.65 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 19.35 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 19.35)^2 \longrightarrow t = (3.27)^2 = 10.70 \text{ años}$$

a/c = 0.60

i) $D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 8.30$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 8.30 = 61.55 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 22.63 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 22.63)^2 \longrightarrow t = (2.40)^2 = 5.72 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$i) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 2.55$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.55 = 18.91 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 6.93 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 6.93)^2 \longrightarrow t = (25.51)^2 = 650.64 \text{ años}$$

a/c =0.45

$$i) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 2.96$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 2.96 = 21.95 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 8.07 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 8.07)^2 \longrightarrow t = (18.81)^2 = 353.82 \text{ años}$$

a/c =0.50

$$i) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 3.59$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.59 = 26.62 \text{ mm}$$

$$ii) D(t) = 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 9.80 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 9.80)^2 \longrightarrow t = (12.75)^2 = 162.69 \text{ años}$$

a/c =0.55

$$i) D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 3.73$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.73 = 27.66 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 10.15 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 10.15)^2 \longrightarrow t = (11.89)^2 = 141.38 \text{ años}$$

a/c = 0.60

i) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 3.98$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 3.98 = 29.51 \text{ mm}$$

ii) $D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6/3.28)^{1/2}) = 10.80 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 10.80)^2 \longrightarrow t = (10.50)^2 = 110.30 \text{ años}$$

Para el ambiente IIIc, $C_s= 3.28$ y $C_b= 0.4$

a) Para CEM I

a/c =0.40:

- i) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.32 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.32 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 8.44$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 8.44 = 62.60 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 8.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.46 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.46 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 22.97 / t^{1/4}$
 $t = (50 \cdot t^{1/4} / 22.97)^2 \longrightarrow t = (4.74)^2 = 22.45 \text{ años}$

a/c =0.45:

- i) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.73 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.73 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 8.95$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 8.95 = 66.37 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 10 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.77 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 24.38 / t^{1/4}$
 $t = (50 \cdot t^{1/4} / 24.38)^2 \longrightarrow t = (4.20)^2 = 17.70 \text{ años}$

a/c =0.50:

- i) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.90 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.90 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 11.25$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 11.25 = 83.43 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 15.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.36 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.36 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 30.60 / t^{1/4}$
 $t = (50 \cdot t^{1/4} / 30.60)^2 \longrightarrow t = (2.67)^2 = 7.13 \text{ años}$

a/c =0.55:

- i) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.35 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 7.35 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 12.56$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 12.56 = 93.15 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 19.7 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.45 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.45 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 34.20 / t^{1/4}$
 $t = (55 \cdot t^{1/4} / 34.20)^2 \longrightarrow t = (2.74)^2 = 7.51 \text{ años}$

a/c =0.60:

- i) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 9.33 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.33 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 14.15$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 14.15 = 104.94 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 25 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 6.92 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 6.92 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 38.54 / t^{1/4}$
 $t = (55 \cdot t^{1/4} / 38.54)^2 \longrightarrow t = (1.68)^2 = 2.83 \text{ años}$

b) Para CEM II/ A-V

a/c =0.40

- i) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.09 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.09 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 6.70$
 $d = (55)^{1/2} \cdot 6.70 = 49.69 \text{ mm}$
- ii) $D(t) = 5.6 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.55 \times 10^{-8} / t^{1/2}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.55 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 18.24 / t^{1/4}$
 $t = (35 \cdot t^{1/4} / 18.24)^2 \longrightarrow t = (3.68)^2 = 13.56 \text{ años}$

a/c =0.45

- i) $D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 2.58 \times 10^{-9}$
 $K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.58 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 7.44$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 7.44 = 55.17 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 6.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.91 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.91 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 20.25 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 20.25)^2 \longrightarrow t = (2.98)^2 = 8.92 \text{ años}$$

a/c = 0.50

$$\text{i) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 3.36 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.36 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 8.49$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 8.49 = 62.96 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.49 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 2.49 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 23.11 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 23.11)^2 \longrightarrow t = (2.30)^2 = 5.26 \text{ años}$$

a/c = 0.55

$$\text{i) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 4.07 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.07 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 9.34$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 9.34 = 69.27 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 10.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.02 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 3.02 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 25.46 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 25.46)^2 \longrightarrow t = (1.89)^2 = 3.57 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.56 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 5.56 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 10.92$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 10.92 = 80.98 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 14.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.13 \times 10^{-8} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 4.13 \times 10^{-8})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 29.77 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/4} / 29.77)^2 \longrightarrow t = (1.38)^2 = 1.91 \text{ años}$$

c) Para CEM III

a/c =0.40

$$\begin{aligned} \text{i) } D(t) &= 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 5.23 \times 10^{-10} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 5.23 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 3.35 \\ d &= (55)^{1/2} \cdot 3.35 = 24.84 \text{ mm} \\ \text{ii) } D(t) &= 1.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 3.88 \times 10^{-9} / t^{1/2} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 3.88 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 9.12 / t^{1/4} \\ t &= (35 \cdot t^{1/4} / 9.12)^2 \longrightarrow t = (14.73)^2 = 216.97 \text{ años} \end{aligned}$$

a/c =0.45

$$\begin{aligned} \text{i) } D(t) &= 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 7.09 \times 10^{-10} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 7.09 \times 10^{-10})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 3.90 \\ d &= (55)^{1/2} \cdot 3.90 = 28.92 \text{ mm} \\ \text{ii) } D(t) &= 1.9 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.26 \times 10^{-9} / t^{1/2} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 5.26 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 10.62 / t^{1/4} \\ t &= (35 \cdot t^{1/4} / 10.62)^2 \longrightarrow t = (10.86)^2 = 117.97 \text{ años} \end{aligned}$$

a/c =0.50

$$\begin{aligned} \text{i) } D(t) &= 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.04 \times 10^{-9} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 1.04 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 4.72 \\ d &= (55)^{1/2} \cdot 4.72 = 35 \text{ mm} \\ \text{ii) } D(t) &= 2.8 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 7.75 \times 10^{-9} / t^{1/2} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 7.75 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 12.89 / t^{1/4} \\ t &= (35 \cdot t^{1/4} / 12.89)^2 \longrightarrow t = (7.37)^2 = 54.36 \text{ años} \end{aligned}$$

a/c =0.55

$$\begin{aligned} \text{i) } D(t) &= 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.12 \times 10^{-9} \\ K_{cl} &= 56157 \cdot (12 \cdot 1.12 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28)^{1/2}) = 4.90 \end{aligned}$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 4.90 = 36.34 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 8.31 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 8.31 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 13.35 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/2} / 13.35)^2 \longrightarrow t = (6.87)^2 = 47.24 \text{ años}$$

a/c = 0.60

$$\text{i) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/55)^{1/2} = 1.27 \times 10^{-9}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 1.27 \times 10^{-9})^{1/2} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 5.22$$

$$d = (55)^{1/2} \cdot 5.22 = 38.71 \text{ mm}$$

$$\text{ii) } D(t) = 3.4 \times 10^{-8} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 9.42 \times 10^{-9} / t^{1/2}$$

$$K_{cl} = 56157 \cdot (12 \cdot 9.42 \times 10^{-9})^{1/2} / t^{1/4} \cdot (1 - (0.6 - 0.4/3.28))^{1/2} = 14.22 / t^{1/4}$$

$$t = (35 \cdot t^{1/2} / 14.22)^2 \longrightarrow t = (6.06)^2 = 36.70 \text{ años}$$

Período de propagación:

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

Clase general de exposición			V_{corr} ($\mu\text{m/años}$)
Marina	Aérea	IIIa	20
	Sumergida	IIIb	4
	En zona de mareas	IIIc	50

Para IIIa:

a) Para el CEM I el recubrimiento es de 45 mm:

- i) El diámetro ϕ 6: $t_p = \frac{80 \cdot 45}{6 \cdot 20} = 30$ años
- ii) El diámetro ϕ 8: $t_p = 22.50$ años
- iii) El diámetro ϕ 12: $t_p = 15$ años
- iv) El diámetro ϕ 16: $t_p = 11.25$ años
- v) El diámetro ϕ 20: $t_p = 9$ años
- vi) El diámetro ϕ 25: $t_p = 7.20$ años

b) Para el CEM II/ CEM III recubrimiento de 25 mm:

- vii) El diámetro ϕ 6: $t_p = 16.66$ años
- viii) El diámetro ϕ 8: $t_p = 12.50$ años
- ix) El diámetro ϕ 12: $t_p = 8.33$ años
- x) El diámetro ϕ 16 $t_p = 6.25$ años
- xi) El diámetro ϕ 20: $t_p = 5$ años
- xii) El diámetro ϕ 25: $t_p = 4$ años

Para IIIb:

c) Para el CEM I el recubrimiento es de 40 mm:

- i) El diámetro ϕ 6: $t_p = \frac{80 \cdot 40}{6 \cdot 4} = 133.33$ años

- ii) El diámetro \emptyset 8: $t_p = 100$ años
- iii) El diámetro \emptyset 12: $t_p = 66.66$ años
- iv) El diámetro \emptyset 16: $t_p = 50$ años
- v) El diámetro \emptyset 20: $t_p = 40$ años
- vi) El diámetro \emptyset 25: $t_p = 32$ años

d) Para el CEM II/ CEM III recubrimiento de 30 mm:

- i) El diámetro \emptyset 6: $t_p = 100$ años
- ii) El diámetro \emptyset 8: $t_p = 75$ años
- iii) El diámetro \emptyset 12: $t_p = 50$ años
- iv) El diámetro \emptyset 16 $t_p = 37.50$ años
- v) El diámetro \emptyset 20: $t_p = 30$ años
- vi) El diámetro \emptyset 25: $t_p = 24$ años

Para IIIc:

e) Para el CEM I el recubrimiento es de 50 mm:

- vii) El diámetro \emptyset 6: $t_p = \frac{80 \cdot 50}{6 \cdot 50} = 13.33$ años
- viii) El diámetro \emptyset 8: $t_p = 10$ años
- ix) El diámetro \emptyset 12: $t_p = 6.66$ años
- x) El diámetro \emptyset 16: $t_p = 5$ años
- xi) El diámetro \emptyset 20: $t_p = 4$ años
- xii) El diámetro \emptyset 25: $t_p = 3.20$ años

f) Para el CEM II/ CEM III recubrimiento de 35 mm:

- vii) El diámetro \emptyset 6: $t_p = 9.33$ años

- viii) El diámetro \emptyset 8: $t_p = 7$ años
- ix) El diámetro \emptyset 12: $t_p = 4.66$ años
- x) El diámetro \emptyset 16 $t_p = 3.50$ años
- xi) El diámetro \emptyset 20: $t_p = 2.80$ años
- xii) El diámetro \emptyset 25: $t_p = 2.24$ años

6.1.4 Cuadros resúmenes:

IIIa, $C_s=1.07$ $C_b=0$ Relación $a/c=0.40$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\emptyset 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	25	7.66	1191.06	11.25	1202.31
CEM II/A-V	25	20	6.08	3000.79	6.25	3007.04
CEM III	25	10	3.04	4573.68	6.25	4579.93

IIIa, $C_s=1.07$ $C_b=0$ Relación $a/c=0.50$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\emptyset 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	30	10.20	378.83	11.25	390.08
CEM II/A-V	25	25	7.71	110.55	6.25	116.80
CEM III	25	15	4.30	1142.58	6.25	1148.83

IIIa, $C_s=1.07$ $C_b=0$ Relación $a/c=0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\phi 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	35	12.85	150.40	11.25	161.65
CEM II/A-V	25	30	9.93	40.18	6.25	46.43
CEM III	25	15	4.74	773.83	6.25	780.08

IIIa, $C_s=1.07$ $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.40$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\phi 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	67	17.32	45.57	11.25	56.82
CEM II/A-V	25	38	13.75	10.93	6.25	17.18
CEM III	25	19	6.88	174.34	6.25	180.59

IIIa, $C_s=1.07$ $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.50$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coeficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	63	23.81	12.76	11.25	24.01
CEM II/A-V	25	48	17.42	4.24	6.25	10.49
CEM III	25	27	9.72	43.76	6.25	50.01

IIIa, $C_s=1.07$; $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coeficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	45	80	27.70	6.96	11.25	18.21
CEM II/A-V	25	62	22.44	1.54	6.25	7.82
CEM III	25	30	10.72	29.58	6.25	35.83

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0$ Relación $a/c=0.40$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	55	20.04	15.87	50	65.87
CEM II/A-V	30	45	15.90	12.67	37.50	50.17
CEM III	25	25	7.95	202.77	37.50	240.27

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0$ Relación $a/c=0.50$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	75	26.67	5.06	50	55.06
CEM II/A-V	25	55	20.17	4.89	37.50	42.39
CEM III	25	35	11.25	50.57	37.50	88.07

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0$ Relación $a/c=0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	125	33.61	2	50	52
CEM II/A-V	25	75	25.95	1.78	37.50	39.28
CEM III	25	35	12.40	34.26	37.50	71.76

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.40$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	70	24.46	7.15	50	57.15
CEM II/A-V	25	55	19.42	5.70	37.50	43.20
CEM III	25	30	9.71	91.12	37.50	128.62

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0.4$ Relación $a/c= 0.50$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	90	32.57	2.27	50	52.27
CEM II/A-V	25	70	24.61	5.70	37.50	43.20
CEM III	25	40	13.73	22.80	37.50	60.30

IIIb, $C_s=5.09$; $C_b=0.4$ Relación $a/c= 0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	40	115	41.03	0.90	50	50.90
CEM II/A-V	25	90	31.70	0.80	37.50	38.30
CEM III	25	45	15.14	15.51	37.50	53.01

IIIc, C_s=3.28; C_b=0 Relación a/c= 0.40	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración (k/t ^{1/4})	Período de iniciación	Período de propagación para Ø16	Vida útil estimada
CEM I	50 ⁽¹²⁾	50	17.46	67.25	5	72.25
CEM II/A-V	35	40	13.86	40.66	3.50	44.16
CEM III	35	20	6.93	650.54	3.50	654.04

IIIc, C_s=3.28; C_b=0 Relación a/c= 0.50	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración (k/t ^{1/4})	Período de iniciación	Período de propagación para Ø16	Vida útil estimada
CEM I	50	65	23.25	21.40	5	26.40
CEM II/A-V	35	50	17.57	15.75	3.50	19.25
CEM III	35	30	9.80	162.69	3.50	166.19

¹² El Art. 37 recomienda comprobar E.L.D s/Anejo 9°. Se eligió un recubrimiento con criterio propio.

IIIc, $C_s=3.28$; $C_p=0$ Relación $a/c=0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	50	80	29.28	8.50	5	13.50
CEM II/A-V	35	65	22.63	5.72	3.50	9.22
CEM III	35	30	10.80	110.30	3.50	113.80

IIIc, $C_s=3.28$; $C_p=0.4$ Relación $a/c=0.40$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($kt^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	50	65	22.97	22.45	5	27.45
CEM II/A-V	35	50	18.24	13.56	3.50	17.06
CEM III	35	25	9.12	216.97	3.50	220.47

IIIc, $C_s=3.28$; $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.50$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	50	85	30.60	7.13	5	12.13
CEM II/A-V	35	65	23.11	5.26	3.50	8.76
CEM III	35	35	12.89	54.36	3.50	57.86

IIIc, $C_s=3.28$; $C_b=0.4$ Relación $a/c=0.60$	Recubrimiento s/Art 37°	Recubrimiento s/Anejo 9°	Coefficiente de penetración ($k/t^{1/4}$)	Período de iniciación	Período de propagación para $\varnothing 16$	Vida útil estimada
CEM I	50	105	38.54	2.83	5	7.83
CEM II/A-V	35	85	29.77	1.91	3.50	5.41
CEM III	35	40	14.22	36.70	3.50	40.20

Conclusiones:

Las observaciones que hacemos son las siguientes:

- El coeficiente de penetración de cloruros cambia dependiendo del cemento que se use. El cemento CEM III es que ofrece un menor coeficiente. También cambia con la dosificación del hormigón, disminuye, por ejemplo, de una relación $a/c = 0.40$ a $a/c = 0.60$ casi 2 veces. Si variamos el contenido de cloruros aportado por materias primas, de 0% a 0.4% en peso de cemento, el coeficiente de penetración aumenta en 1.25 veces.
- Para una vida útil de 50 años, los recubrimientos que se obtienen varían, dependiendo del cemento utilizado, disminuye en casi 1.30 veces. El mismo aumenta en casi 1.30 veces si el contenido de cloruros aportado por materias primas es el máximo aceptado, es decir, de 0.4% del peso del cemento.
- Si comparamos el periodo de iniciación se puede ver que éste disminuye, en cuanto aumentamos la relación a/c (por ejemplo, de $a/c = 0.60$ a $a/c = 0.50$), en casi 2.5 veces.
- El en caso del cemento CEM III se nota el aumento de la iniciación de propagación en todos los casos que hemos expuesto, llegando a ser el más favorable en cuanto a la elección de tipo de cemento.
- Y como observación final se puede decir que la vida útil estimada depende en gran parte del coeficiente de difusión de cloruros, cuanto mayor es el coeficiente menor es la vida útil. La mejor combinación, para una mayor vida útil es con el cemento CEM III y una relación $a/c = 0.40$, con un contenido de cloruros aportado por las materias primas de 0% en peso del cemento, ya que la vida útil disminuye en 1.11 veces si el contenido de cloruros es el máximo. Podemos ver cómo cambian la vida útil de un ambiente a otro, las cifras elevadas que obtuvieron de la clase de exposición IIIa a IIIb o IIIc, llegando a elevarse en caso 20 veces en el mejor de los casos.

6.2 La corrosión según ACI 365.1R-00

Se trata de la misma estructura que en el ejercicio anterior. La clase de exposición es *C2 Hormigón expuesto a humedad y una fuente externa de cloruros*, como en este caso agua de mar. La vida útil de proyecto es de *50 años* y la Resistencia mínima de *35 N/mm²*.

Según el Capítulo 19.3 de la norma, *tabla 19.3.2.1*, para una clase de exposición *C2* la máxima relación $a/c = 0.40$ y el contenido máximo de iones de cloruros Cl^- solubles en agua en el hormigón es de *0.15% del peso de cemento*.

Los recubrimientos tabulados, *tabla 20.6.1.3.1*, son los siguientes:

- Para una estructura expuesta a intemperie es de *50.8 mm*
- Para una estructura no expuesta a intemperie es de *38.10 mm*

Básicamente la norma solo se centra en la corrosión por iones de cloruros.

6.2.1 Verificación numérica para los ataques de iones de Cloruros.

Modelo de predicción de vida útil:

$$T_r = t_i + t_p$$

Dónde:

t_i = tiempo de iniciación

t_p = tiempo de propagación

Período de iniciación:

El período de iniciación t_i , se define como el tiempo que tardan en penetrar los iones cloruros en el recubrimiento de hormigón y se acumule una cantidad suficiente, en lo profundo del hormigón, como para iniciar la corrosión del acero.

Esto es, el tiempo t que tarda la concentración límite de iones de cloruros $C(x, t)$ en llegar a la profundidad x .

$$C(x, t) = C_0 [1 - \text{erf}(x/2(D_{Cl}t)^{1/2})]$$

Dónde:

- $C(x, t)$ = concentración de cloruros
- x = distancia de la superficie del hormigón
- t = tiempo que tarda en iniciarse la corrosión a la distancia x
- C_0 = concentración de cloruros en la superficie
- D_{Cl} = coeficiente de difusión de iones de cloruros

- erf= función error:

z	$erf(z)$	z	$erf(z)$	z	$erf(z)$
0	0	0.55	0.5633	1.3	0.9340
0.025	0.0282	0.60	0.6039	1.4	0.9523
0.05	0.0564	0.65	0.6420	1.5	0.9661
0.10	0.1125	0.70	0.6778	1.6	0.9763
0.15	0.1680	0.75	0.7112	1.7	0.9838
0.20	0.2227	0.80	0.7421	1.8	0.9891
0.25	0.2763	0.85	0.7707	1.9	0.9928
0.30	0.3286	0.90	0.7970	2.0	0.9953
0.35	0.3794	0.95	0.8209	2.2	0.9981
0.40	0.4284	1.0	0.8427	2.4	0.9993
0.45	0.4755	1.1	0.8802	2.6	0.9998
0.50	0.5205	1.2	0.9103	2.8	0.9999

Ajustando la ecuación quedaría:

$$\frac{C(x,t) - C_0}{C_0 - C_i} = \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{cl}t}}\right) \right]$$

Donde C_i es la concentración inicial de cloruros, que para el tiempo $t=0$ es igual a 0.

Para el cálculo del *coeficiente de difusión* de cloruros se sigue la segunda ley de Fick, la cual se ajusta en función del tiempo:

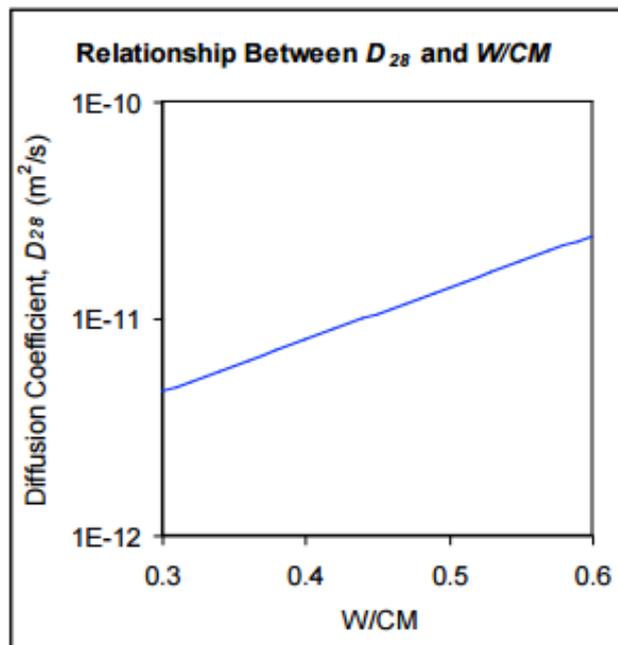
$$D(t) = D_{28} \left(\frac{t_{28}}{t}\right)^m$$

$D(t)$ = coeficiente de difusión en el tiempo t

$$t_{28} = 0.0767$$

$$m = 0.5$$

Coeficiente D_{28} (m^2/s):



Para el ambiente C2, $C_{(x,t)}=0.4\%$ y $C_0=0.7\%$

Recubrimiento 50.8 mm:

Como $\frac{C(x,t)-C_0}{C_0-C_i} = [1 - \text{erf}(z)]$ calculamos la z para la que erf es el siguiente:

$$1 - \frac{0.4-0}{0.7-0} = \text{erf}(z) \longrightarrow 0.4286 = \text{erf}(z)$$

Para hallar el valor exacto de z se interpola: 0.40 0.4284

$$\frac{z - 0.40}{0.45 - 0.40} = \frac{0.4286 - 0.4284}{0.4755 - 0.4286} \quad \text{0.45} \quad \text{0.4755}$$

$$z=0.4002$$

a/c= 0.30

$$D(t)=7.50 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.08 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.08 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{2.88 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 17638 / 0.4002; \quad t=1942621900 \text{ segundos}$$

$$t=61.60 \text{ años}$$

a/c= 0.35

$$D(t)=8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.22 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.22 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{2.98 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 17046.98 / 0.4002; \quad t=1814432130 \text{ segundos}$$

$$t= 57.54 \text{ años}$$

a/c= 0.40

$$D(t)=8.8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.44 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.44 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{3.12 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 16260 / 0.4002; \quad t=1650910153 \text{ segundos}$$

$$t= 52.35 \text{ años}$$

a/c= 0.45

$$D(t)=1 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.77 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{3.33 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 15261 / 0.4002; \quad t = 1454231326 \text{ segundos}$$

$$t = 46.11 \text{ años}$$

a/c= 0.50

$$D(t)=1.5 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.15 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{4.15 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{4.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 12468.37 / 0.4002; \quad t = 970655607.8 \text{ segundos}$$

$$t = 30.78 \text{ años}$$

a/c= 0.55

$$D(t)=2 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.54 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{5.54 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{4.71 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 10791.43 / 0.4002; \quad t = 727115662.8 \text{ segundos}$$

$$t = 23.06 \text{ años}$$

a/c=0.60

$$D(t)=4.5 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{-11} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{1.25 \cdot 10^{-11} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0508}{7.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 7184.20 / 0.4002; \quad t = 322257661.8 \text{ segundos}$$

$$t = 10.22 \text{ años}$$

Recubrimiento 38.10 mm:

a/c= 0.30

$$D(t)=7.50 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2}= 2.08 \cdot 10^{-12} /t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right)= 1- \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.08 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002= \frac{0.0381}{2.88 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2}= 13229.16/0.4002; \quad t=1092724819 \text{ segundos}$$

$$t=34.65 \text{ años}$$

a/c= 0.35

$$D(t)=8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2}= 2.22 \cdot 10^{-12} /t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right)= 1- \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.22 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002= \frac{0.0381}{2.98 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2}= 12785.23/ 0.4002; \quad t=1020618073 \text{ segundos}$$

$$t= 32.36 \text{ años}$$

a/c= 0.40

$$D(t)=8.8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2}= 2.44 \cdot 10^{-12} /t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right)= 1- \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.44 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002= \frac{0.0381}{3.12 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2}= 12211.54/ 0.4002; \quad t=931079135.6 \text{ segundos}$$

$$t= 29.52 \text{ años}$$

a/c= 0.45

$$D(t)=1 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2}= 2.77 \cdot 10^{-12} /t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right)= 1- \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.77 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002= \frac{0.0381}{3.33 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2}= 11441.44/ 0.4002; \quad t=817348586.2 \text{ segundos}$$

$$t= 25.92 \text{ años}$$

a/c= 0.50

$$D(t)=1.5 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.15 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{4.15 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0381}{4.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 9361.18 / 0.4002; \quad t = 547150706.5 \text{ segundos}$$

$$t = 17.35 \text{ años}$$

a/c= 0.55

$$D(t)=2 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.54 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{5.54 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0381}{4.71 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 8089.17 / 0.4002; \quad t = 408558234.8 \text{ segundos}$$

$$t = 12.96 \text{ años}$$

a/c=0.60

$$D(t)=4.5 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{-11} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{1.25 \cdot 10^{-11} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4002 = \frac{0.0381}{7.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 5388.97 / 0.4002; \quad t = 181324694.8 \text{ segundos}$$

$$t = 5.75 \text{ años}$$

Para el ambiente C2, $C_{(x,t)}=0.4\%$, $C_0=0.7\%$ y $C_i=0.15\%$

Recubrimiento 50.8 mm:

Como $\frac{C(x,t) - C_0}{C_0 - C_i} = [1 - \text{erf}(z)]$ calculamos la z para la que erf es el siguiente:

$$1 - \frac{0.4 - 0.15}{0.7 - 0.15} = \text{erf}(z) \longrightarrow 0.4545 = \text{erf}(z)$$

Para hallar el valor exacto de z se interpola:

$z - 0.40$	$=$	$\frac{0.4545 - 0.4284}{0.45 - 0.40}$	$=$	$\frac{0.4545 - 0.4284}{0.4755 - 0.4545}$	0.40	0.4284
0.45					0.45	0.4755

$$z = 0.4621$$

a/c= 0.30

$$D(t) = 7.50 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.08 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.08 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{2.88 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 17638 / 0.4621; \quad t = 1456889923 \text{ segundos}$$

$$t = 46.20 \text{ años}$$

a/c= 0.35

$$D(t) = 8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.22 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.22 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{2.98 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 17046.98 / 0.4621; \quad t = 1360889823 \text{ segundos}$$

$$t = 43.15 \text{ años}$$

a/c= 0.40

$$D(t) = 8.8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.44 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \text{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.44 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{3.12 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 16260 / 0.4621; \quad t = 1238138264 \text{ segundos}$$

$$t = 39.26 \text{ años}$$

a/c= 0.45

$$D(t)=1 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.77 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{3.33 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 15261 / 0.4621; \quad t = 1090671708 \text{ segundos}$$

$$t = 34.58 \text{ años}$$

a/c= 0.50

$$D(t)=1.5 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.15 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{4.15 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{4.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 12468.37 / 0.4621; \quad t = 728026899.3 \text{ segundos}$$

$$t = 23.09 \text{ años}$$

a/c= 0.55

$$D(t)=2 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.54 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{5.54 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{4.71 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 10791.43 / 0.4621; \quad t = 545363488.3 \text{ segundos}$$

$$t = 17.29 \text{ años}$$

a/c=0.60

$$D(t)=4.5 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{-11} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{1.25 \cdot 10^{-11} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0508}{7.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 7184.20 / 0.4621; \quad t = 241704586.3 \text{ segundos}$$

$$t = 7.66 \text{ años}$$

Recubrimiento 38.10 mm:

a/c= 0.30

$$D(t)=7.50 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.08 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.08 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{2.88 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 13229.16 / 0.4621; \quad t = 819582357.4 \text{ segundos}$$

$$t = 26 \text{ años}$$

a/c= 0.35

$$D(t)=8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.22 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.22 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{2.98 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 12785.23 / 0.4621; \quad t = 765499926.5 \text{ segundos}$$

$$t = 24.27 \text{ años}$$

a/c= 0.40

$$D(t)=8.8 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.44 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.44 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{3.12 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 12211.54 / 0.4621; \quad t = 698343243.5 \text{ segundos}$$

$$t = 22.14 \text{ años}$$

a/c= 0.45

$$D(t)=1 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 2.77 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{2.77 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{3.33 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 11441.44 / 0.4621; \quad t = 613040882.7 \text{ segundos}$$

$t = 19.44$ años

a/c= 0.50

$$D(t) = 1.5 \cdot 10^{-11} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 4.15 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{4.15 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{4.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 9361.18 / 0.4621; \quad t = 410382899.1 \text{ segundos}$$

$t = 13.01$ años

a/c= 0.55

$$D(t) = 2 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 5.54 \cdot 10^{-12} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{5.54 \cdot 10^{-12} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{4.71 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 8089.17 / 0.4621; \quad t = 306433321.1 \text{ segundos}$$

$t = 9.72$ años

a/c=0.60

$$D(t) = 4.5 \cdot 10^{-12} \cdot (0.0767/t)^{1/2} = 1.25 \cdot 10^{-11} / t^{1/2}$$

$$\left(\frac{0.4}{0.7}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{0.0508}{2 \cdot \sqrt{\frac{1.25 \cdot 10^{-11} \cdot t}{t^{1/2}}}}\right) \longrightarrow 0.4621 = \frac{0.0381}{7.07 \cdot 10^{-6} \cdot t^{1/2}}$$

$$t^{1/2} = 5388.97 / 0.4621; \quad t = 136000215 \text{ segundos}$$

$t = 4.31$ años

Período de propagación:

El tiempo que tardaría en propagarse la corrosión se fija en 6 años. En otras palabras, el modelo de predicción de la vida útil sería de la siguiente manera:

$$T_i = t_i + 6$$

La única estrategia de protección que aumentaría el período de propagación es el uso del acero recubierto con una pintura epoxi. El tiempo de propagación se elevaría a $t_p=20$ años.

El Autor del proyecto puede cambiar el periodo de propagación basándose en la experiencia local donde está situada la estructura.

6.2.2 Cuadros Resúmenes:

z=0.4002 Recubrimiento 50.8 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m ² /s)	$D(t)$ (*/t ^{1/2} m ² /s)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0	0.4	7.50 x10 ⁻¹²	2.08 x10 ⁻¹²	61.60	6	67.60
a/c=0.35	0.7	0	0.4	8.00 x10 ⁻¹²	2.22 x10 ⁻¹²	57.54	6	63.54
a/c=0.40	0.7	0	0.4	8.80 x10 ⁻¹²	2.44 x10 ⁻¹²	52.35	6	58.35
a/c=0.45	0.7	0	0.4	1.00 x10 ⁻¹¹	2.77 x10 ⁻¹²	46.11	6	52.11
a/c=0.50	0.7	0	0.4	1.50 x10 ⁻¹¹	4.15 x10 ⁻¹²	30.78	6	36.78
a/c=0.55	0.7	0	0.4	2.00 x10 ⁻¹¹	5.54 x10 ⁻¹²	23.06	6	29.06
a/c=0.60	0.7	0	0.4	4.50 x10 ⁻¹¹	1.25 x10 ⁻¹¹	10.22	6	16.22

z=0.4002 Recubrimiento 38.1 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m ² /s)	$D(t)$ (*/t ^{1/2} m ² /s)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0	0.4	7.50 x10 ⁻¹²	2.08 x10 ⁻¹²	34.65	6	40.65
a/c=0.35	0.7	0	0.4	8.00 x10 ⁻¹²	2.22 x10 ⁻¹²	32.36	6	38.36
a/c=0.40	0.7	0	0.4	8.80 x10 ⁻¹²	2.44 x10 ⁻¹²	29.52	6	35.52
a/c=0.45	0.7	0	0.4	1.00 x10 ⁻¹¹	2.77 x10 ⁻¹²	25.92	6	31.92
a/c=0.50	0.7	0	0.4	1.50 x10 ⁻¹¹	4.15 x10 ⁻¹²	17.35	6	23.35
a/c=0.55	0.7	0	0.4	2.00 x10 ⁻¹¹	5.54 x10 ⁻¹²	12.96	6	18.96
a/c=0.60	0.7	0	0.4	4.50 x10 ⁻¹¹	1.25 x10 ⁻¹¹	5.75	6	11.75

z=0.4002 Recubrimiento 50.8 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m^2/s)	$D(t)$ ($*t^{1/2} m^2/s$)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0	0.4	7.50×10^{-12}	2.08×10^{-12}	61.60	20	81.60
a/c=0.35	0.7	0	0.4	8.00×10^{-12}	2.22×10^{-12}	57.54	20	77.54
a/c=0.40	0.7	0	0.4	8.80×10^{-12}	2.44×10^{-12}	52.35	20	72.35
a/c=0.45	0.7	0	0.4	1.00×10^{-11}	2.77×10^{-12}	46.11	20	66.11
a/c=0.50	0.7	0	0.4	1.50×10^{-11}	4.15×10^{-12}	30.78	20	50.78
a/c=0.55	0.7	0	0.4	2.00×10^{-11}	5.54×10^{-12}	23.06	20	43.06
a/c=0.60	0.7	0	0.4	4.50×10^{-11}	1.25×10^{-11}	10.22	20	30.22

z=0.4002 Recubrimiento 38.1 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m^2/s)	$D(t)$ ($*t^{1/2} m^2/s$)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0	0.4	7.50×10^{-12}	2.08×10^{-12}	34.65	20	54.65
a/c=0.35	0.7	0	0.4	8.00×10^{-12}	2.22×10^{-12}	32.36	20	52.36
a/c=0.40	0.7	0	0.4	8.80×10^{-12}	2.44×10^{-12}	29.52	20	49.52
a/c=0.45	0.7	0	0.4	1.00×10^{-11}	2.77×10^{-12}	25.92	20	45.92
a/c=0.50	0.7	0	0.4	1.50×10^{-11}	4.15×10^{-12}	17.35	20	37.35
a/c=0.55	0.7	0	0.4	2.00×10^{-11}	5.54×10^{-12}	12.96	20	32.96
a/c=0.60	0.7	0	0.4	4.50×10^{-11}	1.25×10^{-11}	5.75	20	25.75

z=0.4621 Recubrimiento 50.8 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m^2/s)	$D(t)$ ($*/t^{1/2} m^2/s$)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0.15	0.4	7.50×10^{-12}	2.08×10^{-12}	46.20	6	52.20
a/c=0.35	0.7	0.15	0.4	8.00×10^{-12}	2.22×10^{-12}	43.15	6	49.15
a/c=0.40	0.7	0.15	0.4	8.80×10^{-12}	2.44×10^{-12}	39.26	6	45.26
a/c=0.45	0.7	0.15	0.4	1.00×10^{-11}	2.77×10^{-12}	34.58	6	40.58
a/c=0.50	0.7	0.15	0.4	1.50×10^{-11}	4.15×10^{-12}	23.09	6	29.09
a/c=0.55	0.7	0.15	0.4	2.00×10^{-11}	5.54×10^{-12}	17.29	6	23.29
a/c=0.60	0.7	0.15	0.4	4.50×10^{-11}	1.25×10^{-11}	7.66	6	13.66

z=0.4621 Recubrimiento 38.1 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m^2/s)	$D(t)$ ($*/t^{1/2} m^2/s$)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0.15	0.4	7.50×10^{-12}	2.08×10^{-12}	26.00	6	26.00
a/c=0.35	0.7	0.15	0.4	8.00×10^{-12}	2.22×10^{-12}	24.27	6	30.27
a/c=0.40	0.7	0.15	0.4	8.80×10^{-12}	2.44×10^{-12}	22.14	6	28.14
a/c=0.45	0.7	0.15	0.4	1.00×10^{-11}	2.77×10^{-12}	19.44	6	25.44
a/c=0.50	0.7	0.15	0.4	1.50×10^{-11}	4.15×10^{-12}	13.01	6	19.01
a/c=0.55	0.7	0.15	0.4	2.00×10^{-11}	5.54×10^{-12}	9.72	6	15.72
a/c=0.60	0.7	0.15	0.4	4.50×10^{-11}	1.25×10^{-11}	4.31	6	10.31

z=0.4621 Recubrimiento 50.8 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m ² /s)	$D(t)$ (*t ^{1/2} m ² /s)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0.15	0.4	7.50 x10 ⁻¹²	2.08 x10 ⁻¹²	46.20	20	66.20
a/c=0.35	0.7	0.15	0.4	8.00 x10 ⁻¹²	2.22 x10 ⁻¹²	43.15	20	63.15
a/c=0.40	0.7	0.15	0.4	8.80 x10 ⁻¹²	2.44 x10 ⁻¹²	39.26	20	59.26
a/c=0.45	0.7	0.15	0.4	1.00 x10 ⁻¹¹	2.77 x10 ⁻¹²	34.58	20	54.58
a/c=0.50	0.7	0.15	0.4	1.50 x10 ⁻¹¹	4.15 x10 ⁻¹²	23.09	20	43.29
a/c=0.55	0.7	0.15	0.4	2.00 x10 ⁻¹¹	5.54 x10 ⁻¹²	17.29	20	37.29
a/c=0.60	0.7	0.15	0.4	4.50 x10 ⁻¹¹	1.25 x10 ⁻¹¹	7.66	20	27.66

z=0.4621 Recubrimiento 38.1 mm	C_0 (% p.c)	C_i (% p.c)	$C_{(x,t)}$ (% p.c)	D_{28} (m ² /s)	$D(t)$ (*t ^{1/2} m ² /s)	t_i	t_p	T_r
a/c=0.30	0.7	0.15	0.4	7.50 x10 ⁻¹²	2.08 x10 ⁻¹²	26.00	20	46.00
a/c=0.35	0.7	0.15	0.4	8.00 x10 ⁻¹²	2.22 x10 ⁻¹²	24.27	20	44.27
a/c=0.40	0.7	0.15	0.4	8.80 x10 ⁻¹²	2.44 x10 ⁻¹²	22.14	20	42.14
a/c=0.45	0.7	0.15	0.4	1.00 x10 ⁻¹¹	2.77 x10 ⁻¹²	19.44	20	39.44
a/c=0.50	0.7	0.15	0.4	1.50 x10 ⁻¹¹	4.15 x10 ⁻¹²	13.01	20	33.01
a/c=0.55	0.7	0.15	0.4	2.00 x10 ⁻¹¹	5.54 x10 ⁻¹²	9.72	20	29.72
a/c=0.60	0.7	0.15	0.4	4.50 x10 ⁻¹¹	1.25 x10 ⁻¹¹	4.31	20	24.31

Conclusiones:

Se puede notar que al aumentar el recubrimiento aumenta también la vida útil, T_r , en 1.66 veces y el tiempo en que tarda en iniciarse la corrosión, t_i , en 1.77 veces. También se ve que al aumentar la relación a/c disminuyen tanto el tiempo de iniciación como la vida útil.

El tiempo de propagación como viene fijado en 6 años no hace variar la vida útil de un caso a otro. Se aumenta la vida útil hasta 20 años usando la pintura epoxi sobre el acero, lo que es favorable.

Cuando la concentración inicial de cloruros, C_i , contiene el contenido máximo de iones de cloruros admisible en la mezcla de hormigón, 0.15% en peso de cemento, la vida útil disminuye 0.77 veces.

7. CONCLUSIONES

El concepto de Durabilidad en sí es muy complejo, desde mi punto de vista, y para satisfacerlo es necesario tener en cuenta factores tanto de diseño como del proceso constructivo. Es importante saber diseñar para conseguir una vida útil mayor para la estructura, que conserve su forma, calidad y serviciabilidad pero también es importante el mantenimiento de la misma. Hacer reparaciones a tiempo puede evitar que un problema dado no evolucione y se convierta en un problema de mayor magnitud.

Uno de los daños más considerable es la *Corrosión*, cabría decir también que no es el único. La fisuración, a mi parecer, es un problema que tiene mucha relación a la hora de producirse la corrosión. La corrosión afecta principalmente a la armadura de una estructura de hormigón armado y la fisuración constituye una vía adicional de transporte.

Para realizar las comprobaciones de una estructura que sufre de corrosión o diseñar pensando en la corrosión, sobre todo las estructuras cuya localización es cercana al ambiente marino, seguiremos las instrucciones de las normativas vigentes. En España la normativa encargada es la EHE-08 y en América la ACI 318-14 y como el objetivo de este trabajo es realizar una comparativa entre ambas, a continuación se expondrá una breve crítica de las normativas:

- *EHE-08*: para empezar decir que el Anejo 9º es un método alternativo de verificación de Estado Límite de Durabilidad y antes de consultar el anejo se maneja el Artículo 37º, que contiene disposiciones constructivas prestacionales. Es decir, que una estructura se diseña siguiendo el Artículo 37º, aunque en algunos puntos dicen claramente que son meramente orientativos y que el Autor del proyecto, bajo su responsabilidad, podrá elegir otro cualquier método. Una vez que el Artículo 37º hace referencia al Anejo 9º, se puede proceder según sus instrucciones.

Los métodos de cálculo que usa el Anejo 9º son: para la carbonatación usa el modelo de Häkkinen y para la penetración por cloruros usa un modelo que es una variación o adaptación de la 2ª ley de Fick.

Los cálculos realizados por el modelo de carbonatación ofrecen unos resultados de período de iniciación más razonables que de período de propagación, con el que no estoy muy de acuerdo ya que los resultados obtenidos son muy elevados y en los casos reales no suelen serlo. Los mejores resultados que se obtuvieron fueron con el CEM I, sin ninguna adición, como se expone en las conclusiones del capítulo de verificaciones. En general la corrosión por carbonatación cumple los requisitos del Anejo.

Si hablamos de propagación de iones de cloruros la cosa ya cambia. Es un proceso más complejo que la carbonatación y creo que el Anejo 9º lo simplifica bastante. Deja al Autor libertad de elección sin ninguna directriz, al menos que

el mismo realice ensayos por cuenta propia para obtener un coeficiente de difusión y la concentración crítica de iones cloruros. En una estructura ya en servicio la realización de ensayos no supone un gran problema pero en el caso de que se quiera “diseñar” para dar una vida útil apropiada a una estructura, digamos que no es muy viable, aunque claro siempre puede echar una mano de la experiencia de otras estructuras de la zona, pero claro, que garantía hay de que los datos de esa estructura estén bien.

La concentración inicial de iones de cloruros aportada por materias primas se supone que en el momento de fabricación de la mezcla de hormigón, en el tiempo, es 0, pero en la práctica y en un ambiente marino, eso no se cumplirá, siempre habrá un mínimo porcentaje de cloruros que estén presentes.

En cuanto a la elección de tipo de cemento a usar se puede consultar el Anejo 4º de la Instrucción, pero según los cálculos presentes en este trabajo, y sus conclusiones, la mejor opción sería el CEM III para un coeficiente de difusión bajo, independientemente de la relación a/c. La mejor relación a/c sería una relación baja, pero al tener menos cantidad de agua, el amasado y la colocación en obra sería dificultosa. Una solución sería añadiendo plastificantes, pero eso podría influir en la química de la mezcla.

Decir también que el coeficiente de seguridad de 1,1 propuesto por la EHE-08 queda escaso para la verificación de estructuras afectadas por cloruros.

- *ACI 318-14*: si analizamos esta norma en relación con la Corrosión vamos a encontrarnos con varias dificultades. Para empezar la norma, y en concreto los capítulos dedicados a la durabilidad o los que la nombran son meramente orientativos. Si quisiéramos diseñar para una vida útil con la norma ACI 318-14 sola no bastaría. La norma delega mucho en otras normativas de la misma rama o en otras normas americanas como la ASTM. Los puntos clave de la normativa son los requisitos para cada clase de exposición y el recubrimiento que se debería de usar para diferente elemento de la estructura, dependiendo si está o no en contacto con el suelo o expuesto a la intemperie.
“Los requisitos del hormigón se basan en la filosofía de proporcionar resistencia y durabilidad adecuadas”.

La norma hace hincapié en la adecuada relación a/c para lograr una permeabilidad baja, la que se requiere para cumplir con los requisitos de durabilidad, y en la composición de los materiales cementantes utilizados en el hormigón. La norma ASTM C1202 puede utilizarse para indicar la resistencia del hormigón a la penetración de fluidos.

Para realizar comprobaciones respecto a la Corrosión, la norma delega en otras normas como ACI 201.2R-01; ACI 222.R-01 y ACI 365.1R-00. Las dos primeras normas son más de consulta y la última norma es la que más interesa.

ACI 365.1R-00 “Service Life Prediction- State of Art Report”: esta norma habla sobre la vida útil y comprobaciones que se pueden realizar a favor de ella, aparte de dar unas consideraciones constructivas, económicas y de inspección. Con respecto a los métodos de cálculo, después de haberla manejado, la

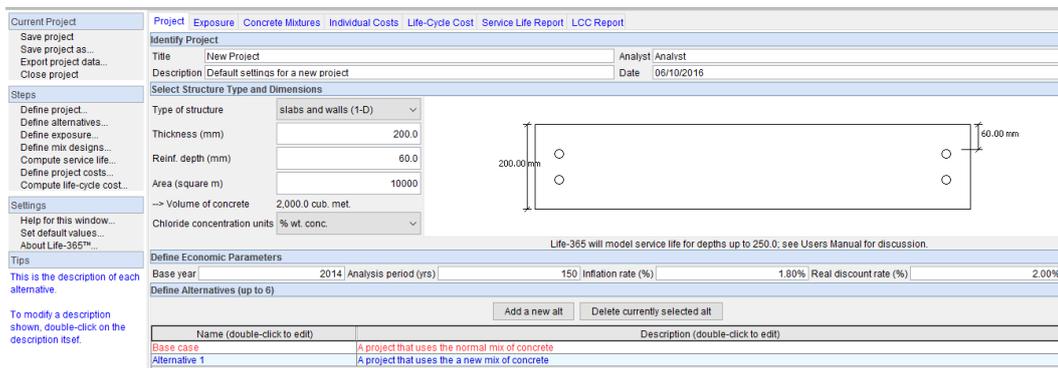
norma es más una guía informativa y no ofrece ninguna tabla con valores reales que pueda servir para el diseño de una estructura.

Las comprobaciones que aparecen en esta guía están basadas en la 2ª ley de Fick. Operando con este modelo no se necesita saber el tipo de cemento utilizado. Una conclusión general sería decir que cuanto menos relación a/c se utilice mejores resultados se obtendrán. Una cosa que sí hace bien la normativa americana es fijar un periodo de propagación en 5-6 años, que es mucho más realista que el método propuesto por la EHE-08, y en poner un valor máximo de concentración de iones de cloruros que puede aportar el agua a la mezcla de hormigón.

Otro punto a favor de la norma americana es el programa “Life-365: Service Life Prediction Model”.



El programa tiene la intención de guiar en la planificación y diseño de estructuras de hormigón expuestas a cloruros en servicio. Está basado en la 2ª ley de Fick y tiene en cuenta más factores para el cálculo como la geometría de la pieza, los efectos de las adiciones y otros cálculos a tener en cuenta en función de la pieza.



El coeficiente de difusión se fija en 8.8716×10^{-12} . Por último, también estima el coste del ciclo de vida de la estructura.

La tabla de a continuación ofrece una comparativa de puntos en los que se basan las comprobaciones realizadas manualmente en el trabajo, eligiendo la normativa que, en mi opinión, mejor las cumple:

	EHE-08	ACI 318-14
Información	✓	
Comodidad de uso	✓	
Elección clase de exposición	✓	✓
Cálculo de recubrimiento	✓	
Relación a/c		
Tipo de cemento a usar		
Modelo de carbonatación	✓	
Modelo de iones de cloruros	✓	✓
Periodo de iniciación	✓	✓
Periodo de propagación		✓
Vida útil		✓

Traduciendo la tabla, es mucho más fácil de usar la EHE-08 porque es una especie de “recopilación” de toda la información necesaria para el cálculo de una estructura, la ACI 318-14 al delegar en otras normas, para una persona que tiene la costumbre de manejarla, es más laboriosa pero nos ofrece unos resultados de vida útil más realistas. Un punto negativo de la normativa americana también sería la falta de información sobre el daño producido por carbonatación y el hecho que no profundiza en el modelo de comprobación a seguir.

Una conclusión final, decir que aunque hay muchos autores estudiando la *Corrosión*, como C. Andrade (1994), Tang y Nilson (1994), Sorja y Versikari (1996), Zhang (2006), Castro-Borges y Helene (2007), etc; no hay un modelo, una solución, comúnmente aceptado pero el más difundido es el modelo de Tuutti.

Si tuviera que elegir una de las normativas para la comprobación de cloruros de una estructura me inclinaría más por el programa Life-365 ya que contempla varios puntos de interés en este tema.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ACI. 2001.** *ACI 201.2R-01 Guía para la Durabilidad del Hormigón.* 2001.
- ACI. 2001.** *ACI 222.R-01 Protection of Metals in Concrete Against Corrosion.* 2001.
- ACI. 1993.** *ACI 224.1R-93. Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de Hormigón.* 1993.
- ACI. 2001.** *ACI 224.R-01 Control de fisuración en estructuras de hormigón.* 2001.
- ACI. 2005.** *ACI 318-05 Requisitos de Reglamento para Hormigón Estructural.* USA : Comité ACI 318, 2005.
- ACI. 2014.** *ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete.* 2014.
- ACI. 2000.** *ACI 365.1R-00 Service-Life Prediction—State-of-the-Art Report.* s.l. : Committe 365, 2000.
- AENOR. 2011.** *UNE 112010 Corrosión en armaduras. Determinación de cloruros en hormigones endurecidos y puestos en obra.* Madrid : s.n., 2011.
- AENOR. 2012.** *UNE 83994-1 IN Durabilidad del hormigon: estrategia de comprobacion de durabilidad en niveles. Parte 1: Métodos de comprobación.* Madrid : s.n., 2012.
- AENOR. 2011.** *UNE EN 112011. Corrosión en armaduras. Determinación de profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio.* Madrid : s.n., 2011.
- Aguirre, A.M. y Mejía de Gutiérrez, R. 2013.** *Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas.* 2013.
- Aguirre, A.M. y R. Mejía de Gutiérrez, R. 2013.** *Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions.* 2013.
- Andrade, C. 1988.** *Manual Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras.* 1988.
- Arqhys. ARQHYS. ARQUITECTURA.** [En línea] <http://www.arqhys.com/construccion/ataques-quimicos-hormigon.html>.
- Becker, Edgardo. 2016.** CLARÍN ARQ. [En línea] 30 de Marzo de 2016. http://arq.clarin.com/construccion/Patologias-habituales-hormigon-armado_0_1549645282.html.
- BECKER, EDGARDO. 2016.** CLARÍN ARQ. [En línea] 5 de Abril de 2016. http://arq.clarin.com/construccion/Problemas-hormigon-paso-tiempo_0_1553245023.html.
- Becker, Ing. Edgardo.** *Durabilidad del Hormigón. Comportamiento del Hormigón Estructural Durante su Vida de Servicio.* s.l. : LOMA NEGRA.

Bermúdez Odriozola, Miguel Ángel. 2007. *Tesis Doctoral "Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carrera de mareas y zona sumergida.* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid., 2007.

Capítulo 2. Las reacciones expansivas. *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón.*

2016. CLARIN ARQ. [En línea] 12 de Abril de 2016.
http://arq.clarin.com/construccion/deterioro-hormigon-principales-procesos_0_1557444537.html.

Consortium II, Life-365™. 2010. *Life-365™ Service Life Prediction Model.* 2010.

EHE-08. 2011. *EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural.* Madrid : Ministerio de Fomento, 2011.

Gadea, J., y otros. 2010. *The alkali–aggregate reaction for various aggregates used in concrete.* s.l. : Materiales de Construcción- Universidad de Burgos; CEDEX Ministerio de Fomento, 2010.

González Díaz, Javier Ernesto. 2014. *MODELOS DE PENETRACIÓN DEL IÓN CLORURO ORIENTADOS A LA PREDICCIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO.* Sede Bogotá : Universidad Nacional de Colombia , 2014.

Heumann, María Virginia y Moares, Fabiana. 2011. Ingeniería y Construcción. [En línea] Publicado por Fernando Arancibia, 7 de Agosto de 2011.
<http://facingyconst.blogspot.com.es/2011/08/tecnologia-del-hormigon.html>.

Mosquera Rey, D. Emilio R. 2009. *Tesis "Vida útil en estructuras de hormigón armado. Un análisis teórico respecto de la corrosión."* A Coruña : Universidade Da Coruña, 2009.

Mosquera Rey, D Emilio. 2011. *Tesis Doctoral "PROBABILISMO EXPLICITO EN LA CORROSIÓN DE ARMADURAS EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN SOMETIDAS AL AMBIENTE MARINO DE LA COSTA GALLEGA."* A Coruña : Universidade da Coruña, 2011.

Mosquera Rey, D. Emilio. 2015 *Revisión de la validez del coeficiente de seguridad, propuesto por EHE-08, para la estimación de la vida útil de cálculo en estructuras de edificación sometidas a la acción de cloruros..* Informes de la Construcción, 2015, Vol. 67(538): eo82, doi:
<http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.27..>

Ossorio, Anile y Lorenzo, Raydel. 2014. *Service-life prediction of reinforced concrete.* s.l. : Rev.Fac.Ing.Univ.Antioquia, 2014.

Telford, Thomas y Soutsos, Marios. 2010. *Concrete durability : a practical guide to the design of durable concrete structures.* London : s.n., 2010.

Varona Moya, Fco De Borja, Antonio, López Juárez Jose y Bañón Blázquez, Luís. 2012-2013. *Apuntes de hormigón armado.* Alicante : Universidad de Alicante, 2012-2013.

Yugovich, Paulo G. Yugovich. *VIDA ÚTIL DE LAS ESTRUCTURAS -DÓNDE ESTAMOS Y HACIA DÓNDE VAMOS?* s.l. : Facultad de Ciencias y Tecnología – UCA.

9. ÍNDICE de Ilustraciones, Gráficas y Esquemas:

ESQUEMAS:

Esquema 1: Telford, Thomas y Soutsos, Marios. 2010. *Concrete durability : a practical guide to the design of durable concrete structures.* London : s.n., 2010.....10

ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: M. Klaric, 2001 "Fisuración y Ataques Físicos al Hormigón". *AATH – Durabilidad del Hormigón Estructural.* 2001.....17

Ilustración 4: Arqhys. ARQHYS. ARQUITECTURA. [En línea]
<http://www.arqhys.com/construccion/ataques-quimicos-hormigon.html>27

Ilustración 5: Gadea, J., y otros. 2010. *The alkali–aggregate reaction for various aggregates used in concrete.* s.l. : Materiales de Construcción- Universidad de Burgos; CEDEX Ministerio de Fomento, 2010.....29

Ilustración 6: Capítulo 2.Las reacciones expansivas. *Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigón*.....30

Ilustración 7: Andrade, C. 1988. *Manual Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras.* 1988.....31

Ilustración 8: Mosquera Rey, D. Emilio R. 2009. *Tesis "Vida útil en estructuras de hormigón armado.Un análisis teórico respecto de la corrosión."* A Coruña : Universidade Da Coruña, 2009.....32

GRÁFICAS:

Gráfica 1: Becker, Ing. Edgardo. *Durabilidad del Hormigón. Comportamiento del Hormigón Estructural Durante su Vida de Servicio.* s.l. : LOMA NEGRA.....19

Gráfica 2: Telford, Thomas y Soutsos, Marios. 2010. *Concrete durability : a practical guide to the design of durable concrete structures.* London : s.n., 2010.....21

Gráfica 3: Becker, Ing. Edgardo. *Durabilidad del Hormigón. Comportamiento del Hormigón Estructural Durante su Vida de Servicio.* s.l. : LOMA NEGRA.....35

(¹³)

¹³ Las tablas que aparecen sin un título son elaboraciones propias.

