

EVALUACIÓN EN EL TRANSPORTE DE CLORUROS EN HORMIGÓN

Autor: Ángel Torres López

Director: Juan Francisco Sánchez Pérez, Gonzalo García Ros

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA - UPCT
TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERIA CIVIL

AGRADECIMIENTOS

A la primera persona que se lo quiero agradecer es a mi tutor Juan Francisco Sánchez Pérez, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto, además de darme un trato de lo más cercano y su predisposición todos estos meses para poder llevar a cabo el proyecto.

Me gustaría también agradecerlo a mis padres por brindarme la oportunidad de estudiar, ponerme más fácil el camino, y por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de la vida. Sin su apoyo todo esto hubiera sido imposible.

A mi padre, por enseñarme que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se consigue, y que en esta vida nadie regala nada.

Y a mi madre, por cada día hacerme ver la vida de una forma diferente y confiar en mis decisiones.

A mis amigos por estar siempre a mi lado.

Y a toda mi familia por su apoyo.

En especial a Federica por ser mi compañera perfecta, mi punto de apoyo, mi luz, mi alegría, mis ganas de seguir cuando todo se ve negro, sin ella tampoco hubiera sido posible lograr esto; gracias por apoyarme día tras día.

A mis padres

INDICE

INDICE

1.- Introducción.....	1
2.- Fundamentos teóricos.....	11
2.1- Resumen.....	13
2.2- Vida útil de las estructuras.....	15
2.3- Clases de exposición ambiental de las estructuras.....	17
2.4- Transporte y penetración del Cl ⁻ en el hormigón.....	21
2.4.1- Difusión.....	22
2.4.2- Permeabilidad.....	24
2.4.3- Absorción capilar.....	25
2.4.4- Humedad y temperatura.....	26
2.5- Tipos de ambiente portador del ión agresivo Cl ⁻	27
2.5.1- Ambiente marino.....	28
2.5.2- Ambiente de alta montaña.....	30
3.- Finalidad del proyecto.....	33
4.- Desarrollo experimental.....	37
4.1- Modelo matemático.....	39
4.2- Método de simulación por redes (MESIR).....	39
4.3- Método en red.....	40
4.4- Componentes del modelo en red.....	40
4.4.1- Monopuertas pasivas.....	40
4.4.2- Monopuertas activas.....	43
4.5- El MESIR como método numérico.....	44
4.6- Simulación mediante el programa PSPICE.....	44
5.- Analisis de resultados.....	47
6.- Conclusión.....	59
7.- Biografía.....	65

1.- Introducción

1.- Introducción

El campo de estudio en estructuras de hormigón armado ha evolucionado de forma importante en las últimas décadas. Aspectos de durabilidad del hormigón, tienen hoy en día un papel fundamental en proyectos de investigación que se desarrollan a nivel mundial. El hormigón armado es el material más empleado en la construcción, ya que por sus características mecánicas aporta un alto nivel de seguridad en las estructuras construidas bajo sus especificaciones. Sin embargo, se han puesto de manifiesto sus limitaciones respecto al comportamiento durable en ambientes agresivos, cuando se precisan largas vidas en servicio para poder amortizar sus elevados costes.

La durabilidad de una estructura de hormigón está definida como su capacidad para soportar durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta; las cuales podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a los relativos a las cargas y solicitaciones consideradas en el análisis estructural.

La actual Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 (EHE-08, 2008), ha extendido la vida útil de la mayoría de las estructuras de hormigón a cien años. Este aspecto hace que el diseño de los hormigones basado en la durabilidad, adquiera un papel fundamental durante las etapas de proyecto, construcción y conservación de las estructuras. Calavera (Calavera, 2005) cifra las causas de fallos en la durabilidad de las estructuras de hormigón armado y pretensado en defectos de la ejecución (51%), proyecto (37%), materiales (4,5%) y uso y mantenimiento (7,5%).

Los principales factores de deterioro del hormigón pueden ser químicos (corrosión de la armadura, ataque por cloruros, ácidos, sulfatos, reacción alcali-árido, carbonatación, disoluciones, etc.) o físicos (ciclos de hielo-deshielo, abrasión, fuego, etc.).

Según Basheer (Basheer, Chidiact and Long, 1996), la revisión de más de 400 artículos publicados en los años noventa sobre el deterioro del hormigón, indica que los mecanismos físicos y químicos de deterioro del hormigón se pueden clasificar como se muestra en la Figura 1.1, destacando el alto porcentaje de estructuras afectadas por ataque de cloruros (16%).

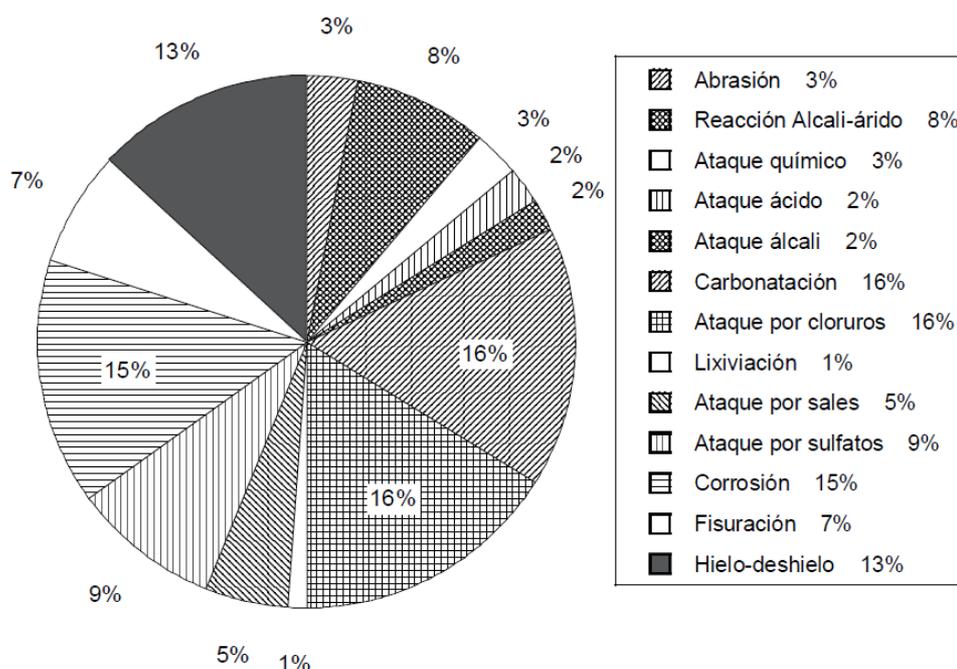


Figura 1.1 Mecanismos físicos y químicos del deterioro del hormigón (Basheer et al.1996).

Medio ambientes naturales como el entorno marino y el de alta montaña, se consideran potentes detonadores de la degradación en el hormigón armado debido a la presencia del ion cloruro (Cl^-) en altas concentraciones. La cantidad de cloruros en el hormigonado está limitada por los diferentes códigos y normas, el problema se presenta cuando los iones de cloruros se introducen en el material desde el exterior. En España, las concentraciones relativamente altas de cloruros son frecuentes, ya que el país cuenta con más de 3.500 km de costa y con numerosas regiones donde el empleo de sales fundentes en aparcamientos o en puentes de carretera es habitual, debido a las heladas en épocas frías. En información suministrada por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España (Ministerio de Fomento, 2010), se observa claramente un

aumento progresivo en el uso de sales fundentes cada vez que inicia la campaña de vialidad invernal (Tabla 1.1). La capacidad de almacenamiento de fundentes ha aumentado hasta 216.000 toneladas, lo que representa disponibilidad de sal para 100 días, aumentando en un 377% con respecto al año 2003-2004. También se observa el aumento del número de almacenes y de silos en el mismo período de tiempo, así como la inversión en cada campaña.

Evaluación de parámetros que influyen en el transporte de cloruros en hormigón parcialmente saturado

Campaña de vialidad invernal	2003-2004	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011
Almacenamiento de fundentes (tn)	57.221	137.583	178.004	178.085	185.396	216.000
Número de almacenes	N.D.	281	296	306	308	302
Número de silos	N.D.	336	362	373	404	430
Inversión en la campaña (Mill. €)	N.D.	42,16	49,7	52,6	55,2	66

Tabla 1.1 Campaña de vialidad invernal. Evolución de inversión, uso y almacenamiento de fundentes 2003-2010.

La presencia del ion cloruro en el interior del hormigón armado basa su agresividad en su capacidad de despasivar el acero embebido e iniciar el proceso de corrosión limitando la vida de servicio de la estructura (Fernández Cánovas, 2006).

La Figura 1.2 muestra de forma esquemática el proceso electroquímico de corrosión del acero una vez que se produce la despasivación de la capa protectora. Durante el proceso de corrosión de las armaduras con presencia de

cloruros se establecen claramente dos fases. Una primera de iniciación, hasta que la concentración de iones cloruro alcanza un determinado umbral en las inmediaciones de la barra de refuerzo, y una segunda de propagación, donde la oxidación del metal provoca no sólo una pérdida de metal base y de adherencia en la interfase acero-hormigón sino también un aumento de volumen que conlleva finalmente a la aparición de tracciones en el recubrimiento del elemento estructural.

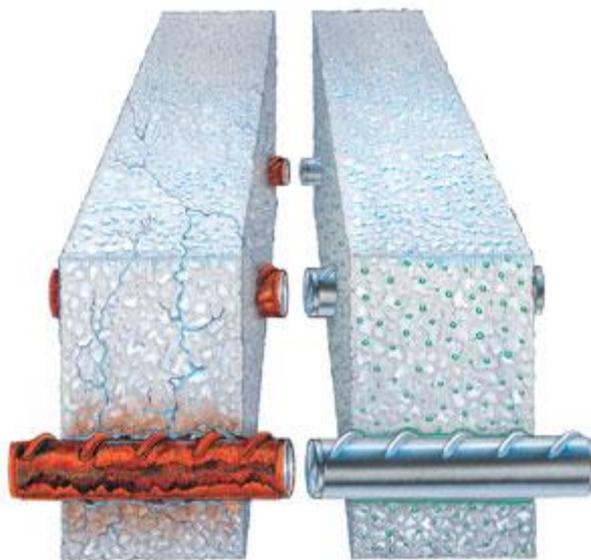


Figura 1.2 Proceso de corrosión del acero despasivado embebido en hormigón (RB Conspro 2017)

Actualmente existen distintos ensayos experimentales para determinar la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros. Algunos de estos consisten en calcular un coeficiente de difusión natural de cloruros (D) que determina la capacidad de penetración del ion a través de la red porosa del hormigón por este mecanismo. Mientras que otros aplican una diferencia de potencial a través de la probeta, ya sea para cuantificar la cantidad de carga que pasa a través de esta o para acelerar el avance del agresivo y obtener una evaluación más rápida del material. Este método permite obtener un coeficiente de migración de cloruros.

Por otra parte, el ensayo de resistividad eléctrica nos permite evaluar mezclas de hormigón mediante indicadores de durabilidad que se encuentran

directamente relacionadas con la penetración de agentes agresivos hacia el interior del hormigón.

La Tabla 1.2 presenta un resumen de los procedimientos experimentales más empleados para evaluar el coeficiente de difusión.

Tipo	Método	Normas	Medición
Difusión-Natural	Piscina	AASHTO T259 (1980) ASTM C1443 (2002) CEN TS 12390-11(2010) Proyecto pUNE 83986	D_{Cl}
	Inmersión	NT BUILD 443(1995) ASTM C1556 (2003) CEN TS 12390-11(2010)	D_{Cl}
	Inversión	ASTM C 1585(2005) CEN TS 12390-11 (2010)	D_{Cl}
Migración-Acelerado	Carga eléctrica	AASHTO T277 (1997) ASTM C1202 (2010)	Q (carga)
	Nordtest	NT BUILD 492 (1992)	D_{Cl}
	Corrosión	ASTM G109 (2007) Proyecto Pune 83992-1	Tiempo hasta el nivel de corrosión
	Multireg.	UNE 83987 (2008)	D_{Cl}
	Integral	Pune 83992-2	D_{Cl} , C_s , C_{th} , V_{corr}

Tabla 1.2 Procedimientos experimentales más utilizados en la literatura.

La mayoría de los estudios de penetración de cloruros en el hormigón, se han centrado en el proceso de difusión en hormigones saturados con el objetivo de simplificar los mecanismos de penetración. Sin embargo, en una amplia casuística de situaciones reales la difusión no es el único mecanismo de penetración. Es el caso de hormigones parcialmente saturados en contacto con

cloruros y localizados en entornos con humedades relativas elevadas, la penetración por succión capilar no puede considerarse despreciable.

Para poder interpretar correctamente los resultados experimentales es necesario considerar simultáneamente el conjunto de los diferentes mecanismos de penetración de cloruros que pueden intervenir en el proceso. La importancia relativa de cada uno vendrá determinada por las variaciones de las condiciones ambientales y de las características intrínsecas del hormigón.

Los principales factores medioambientales a considerar son la humedad relativa y la temperatura, ya que tienen un papel destacado por su influencia en los mecanismos de penetración presentes en el hormigón.

Las características propias del hormigón con mayor influencia en el proceso son la porosidad total, distribución de tamaño de poro y capacidad de combinación de cloruros en la matriz cementicia del hormigón. La interacción entre las condiciones del medio ambiente y la estructura porosa del hormigón determinarán los mecanismos de penetración que intervendrán durante la penetración de cloruros.

Es sabido que el sistema de poros del hormigón basa su efectividad para llevar a cabo los diferentes mecanismos de penetración (difusión y succión capilar), en la cantidad y la forma en que la humedad llegue a la red porosa. La Figura 1.3 muestra los efectos que genera la humedad relativa externa en el interior de una estructura porosa de hormigón.

La implementación de modelos numéricos que consideran la mayor parte de factores presentes en los fenómenos de penetración de cloruros, ayuda a interpretar y predecir de manera más acertada el comportamiento de una estructura.

Diversas investigaciones se han desarrollado considerando únicamente los factores más destacados presentes en el fenómeno real, debido a la gran complejidad del problema. Sin embargo, la implementación de estos modelos

puede tener como resultado la subestimación o sobrestimación, dependiendo del caso, de la capacidad de las estructuras para resistir el ataque de cloruros.

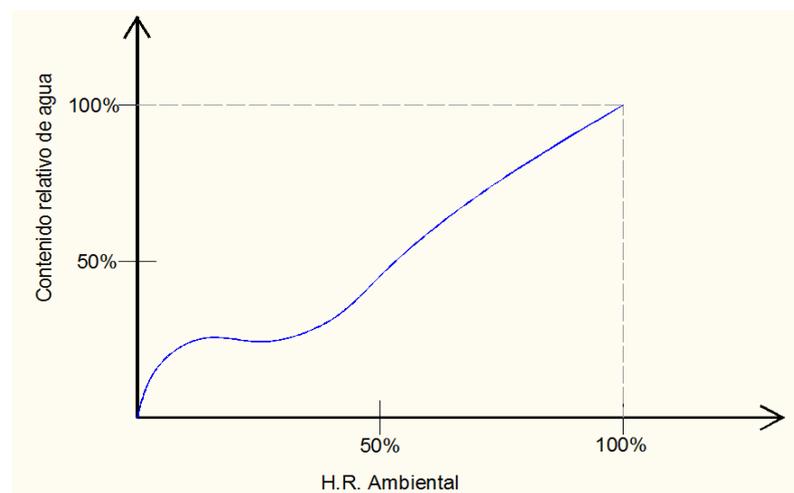


Figura 1.3 Efectos de la humedad relativa exterior hacia el interior del hormigón (CEB, 1993).

En esta línea, el presente trabajo de investigación estudia de manera experimental la penetración de cloruros en el hormigón tanto en condiciones saturadas como no saturadas, tomando en cuenta variaciones de parámetros del medio ambiente y de las características propias del hormigón.

Se analiza de forma detenida el grado de influencia de los parámetros mencionados y su relación entre ellos. Además se ha llevado a cabo una campaña experimental para calibrar y validar un modelo numérico basado en la teoría de elementos finitos desarrollado por el profesor Dr. Juan Francisco Sánchez Pérez perteneciente al grupo de investigación Simulación por redes del Departamento de Física Aplicada de la Universidad Politécnica de Cartagena.

2.- Fundamentos Teóricos

2.- Fundamentos Teóricos

2.1- RESUMEN

La industria de la construcción ejerce un gran impacto sobre el desarrollo económico y social de un país a través de la creación de infraestructura de ingeniería. La mayoría de estructuras como carreteras, puentes, túneles, presas e incluso una gran cantidad de edificios, involucran grandes esfuerzos de construcción, con el empleo de una gran cantidad de recursos y la dedicación de varios años de trabajo.

Proyectos con alto nivel de durabilidad son, hoy en día, un requisito fundamental para este tipo de infraestructura, ya que un fallo puede provocar un gran impacto económico, medioambiental y social.

Uno de los problemas más graves de durabilidad de las estructuras de hormigón armado y pretensado es la corrosión del acero. El desencadenamiento de la corrosión suele deberse a la destrucción de la capa pasivante que se forma espontáneamente sobre el acero embebido en el hormigón. La desaparición de la capa pasivante se produce por varios factores. La disminución del pH generada por la carbonatación del material y la presencia de iones despasivantes como los cloruros (Cl^-) son los que mayor incidencia presentan.

Los estudios de estructuras de hormigón armado expuestas a cloruros se centran principalmente en el ambiente marino y la zona de alta montaña con presencia de sales de deshielo. La presencia del ion cloruro en el medio ambiente, genera un alto grado de vulnerabilidad para hormigones con baja resistencia a la penetración de agentes agresivos.

La existencia de una determinada cantidad de cloruros en las proximidades del acero de refuerzo rompe la protección natural que normalmente ofrece el ambiente alcalino del cemento. La presencia de estos iones en contacto con el acero, se debe a que estos iones tienen la capacidad de moverse a través de la matriz porosa del hormigón, principalmente mediante un proceso de difusión (Lizarazo Marriaga & Claisse, 2009). Dependiendo de las condiciones existen

también otros mecanismos que contribuyen al transporte del ion agresivo, tales como succión capilar, absorción, permeabilidad y flujo electrostático.

La agresividad de los cloruros sobre el hormigón depende mucho de los cationes con los que estén unidos. Existen cloruros que incluso en pequeñas cantidades pueden llegar a ser perjudiciales, mientras que en grandes proporciones pueden dar lugar a la solubilidad de algunos componentes del cemento (Fernandez Canovas, 2011).

Además del alto grado de influencia en la activación de la corrosión en el interior del hormigón debido a la despasivación del hormigón que rodea al acero de refuerzo, los Cl^- suman otro efecto nocivo dentro del hormigón endurecido, derivado de la cristalización de las sales dentro la red porosa, lo cual genera presiones internas en la paredes de poro pudiendo provocar rupturas. Puesto que la cristalización ocurre en el punto de evaporación del agua, este tipo de ataque se produce de manera más acentuada en el hormigón que no está permanentemente en contacto directo con el agua.

No obstante, debido a que el Cl^- en solución penetra y asciende por difusión y capilaridad principalmente, el ataque es más intenso cuando el agua o la humedad pueden penetrar en el hormigón, creando nuevas rutas de acceso útiles para el proceso de difusión y mejorando el transporte por advección.

En climas de alta montaña o costeros, la aplicación de sales fundentes en estructuras de hormigón unido a los grandes cambios de los parámetros ambientales determinan un ambiente potencialmente muy agresivo. Para el caso del hormigón armado, la absorción de las sales establece áreas anódicas y catódicas; la acción electrolítica resultante conduce a una acumulación de productos de corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del hormigón que lo rodea. En último término la pérdida de recubrimiento ayuda a la aceleración del deterioro.

Existen dos procesos en el interior del hormigón unidos directamente con la interacción entre la microestructura y el ion Cl^- , estos procesos tienen una importancia significativa en el momento en que los hormigones se ven amenazados por este ion agresivo, hacemos referencia a la unión química y física del Cl^- en el interior del hormigón.

El primero tiene como principal responsable al Aluminato Tricalcico, el cual reacciona con los Cl^- , dando como resultado la Sal de Friedel, mientras que el segundo se debe a un proceso de absorción, que consiste en la fijación física de cloruros por la superficie sólida del hormigón, siendo el principal responsable la elevada relación superficie/ masa del Gel C-S-H (Taylor, 2004).

2.2- VIDA UTIL DE LAS ESTRUCTURAS

El hormigón armado es considerado hoy en día como el material idóneo y preferido dentro del ramo de la construcción a nivel mundial, ya que se presenta con magníficas características de resistencia y durabilidad, como muestran la permanencia de estructuras especialmente sorprendentes por su morfología y su vigencia a pesar del paso del tiempo.

En el campo de la durabilidad del hormigón, son muchos los aspectos que deben ser tomados en cuenta para dar un enfoque claro de los factores a controlar en el momento de diseñar mezclas que estarán sometidas a diferentes entornos medio ambientales. Una gran cantidad de estudios y recomendaciones de diferentes normativas mundiales, relacionan la agresividad del entorno con rangos de parámetros preestablecidos para garantizar la obtención de hormigones apropiados a su entorno.

La durabilidad de un hormigón puede definirse, por tanto, como la capacidad que tiene éste de resistir a la acción del ambiente, ataques químicos, físicos, biológicos, o cualquier proceso que tienda a deteriorarlo (Fernandez Canovas, 2011).

La EHE-08 define Estado Límite de Durabilidad como el fallo producido al no alcanzarse la vida útil de proyecto de la estructura, como consecuencia de que los procesos de degradación del hormigón o de las armaduras alcancen el grado de deterioro suficiente como para que impidan que la estructura se comporte de acuerdo a las hipótesis con las que ha sido proyectada. De la misma manera la EHE-08 obliga a fijar en el inicio del proyecto, la vida útil nominal de la estructura, dando unos valores por defecto recogidos en la Tabla 2.1.

Tipo de estructura	Vida útil nominal
Edificios (o instalaciones) agrícolas o industriales y obras marítimas.	Entre 15 y 20 años
Edificios de carácter monumental o de importancia especial.	100 años
Edificios de viviendas u oficinas, puentes u obras de paso de longitud total inferior a 10 metros y estructuras de ingeniería civil (excepto obras marítimas) de repercusión económica baja o media.	Entre 50 años
Elementos reemplazables que no forman parte de la estructura principal (por ejemplo, barandillas, apoyos de tuberías).	Entre 10 y 25 años
Estructuras de carácter temporal.	Entre 3 y 10 años
Puentes de longitud total igual o superior a 10 metros y otras estructuras de ingeniería civil de repercusión económica alta.	100 años

Tabla 2.1 Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras (EHE, 2008).

2.3- CLASES DE EXPOSICION AMBIENTAL DE LAS ESTRUCTURAS

Las estructuras de hormigón son concebidas considerando solicitaciones mecánicas con sus correspondientes hipótesis, además de solicitaciones de tipo físico o químico que pueden llegar a degradar considerablemente el acero de refuerzo o al hormigón mismo. La Tabla 2.2 cita las clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras, mientras que la Tabla 2.3 cita las clases específicas de exposición relativas a otros procesos de degradación del propio hormigón, distintos de los de corrosión de armaduras.

CLASE GENERAL DE EXPOSICION				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Id.	Tipo de proceso		
No agresiva		I	Ninguno	- Interiores - Elementos de hormigón en masa	- Interiores de edificios, protegidos de la intemperie
Normal	Humedad alta	IIa	Corrosión de origen diferente de los cloruros	- Interiores sometidos a	- Sótanos no ventilados
				- Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos	- Cimentaciones
				- Elementos	- Tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media
					- Elementos de hormigón en cubiertas de edificios
	Humedad media	IIb	Corrosión de origen diferente de los	- Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia	- Construcciones exteriores - Tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm
Marina	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel del mar.	- Edificaciones en las proximidades de la costa
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros	- Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente	- Zonas sumergidas - Cimentaciones y zonas - Zonas de pilas de puentes

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	- Piscinas
			- Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	- Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve
				- Estaciones de tratamiento de agua.

Tabla 2.2 Clases generales de exposición, relativas a la corrosión de las armaduras (EHE, 2008).

Clase específica de exposición				Descripción	Ejemplos
Clase	Sub.	Id.	Tipo de Procesos		
Química agresiva	Débil	Qa	Ataque químico	- En ambiente con contenido de sustancias químicas capaces de provocar alteración con velocidad lenta.	-Instalaciones industriales, débilmente agresivas. -Construcciones próximas a áreas industriales, con agresividad débil.
	Media	Qb	Ataque químico	-En contacto con agua de mar. -En ambiente con contenido de sustancias químicas	-Estructuras marítimas, en general. -Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media. -Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas

	Fuerte	Qc	Ataque químico	- En ambiente con contenido de sustancias químicas capaces de provocar alteración con velocidad rápida.	-Instalaciones industriales con sustancias de agresividad alta. -Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque Hielo-deshielo	-En contacto frecuente con agua, o zonas de humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50%	-Construcciones en zonas de alta montaña. -Estaciones invernales.
	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes	-Destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C.	-Puentes o pasarelas en zonas de alta montaña.
Erosión		E	Abrasión cavitación	-Sométicos a desgaste superficial. -Estructuras hidráulicas en los que la cota	-Pilas de puente en cauce muy torrencial. - Diques, pantalanés y otras obras sometidas a fuertes
Id.= Identificación del tipo de exposición					

Tabla 2.3 Clases específicas de exposición relativa a otros procesos de degradación del propio hormigón (EHE, 2008).

Existe una identificación particular para cada una de las formas de exposición, para las cuales se muestra la clasificación de agresividad de acuerdo a los valores que aparecen en la Tabla 2.4.

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipos de exposición		
		Qa	Qb	Qc
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	Valor de pH	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	<4,5
	CO2 agresivo (mg CO2/l)	15 – 40	40 - 100	>100
	Ion amonio (mg NH4*/l)	15 – 30	30 – 60	>60
	Ion magnesio (mg Mg ^{2*} /l)	300 – 100	1000 – 3000	>3000
	Ion sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /l)	200 -600	600 – 3000	>3000
	Residuo seco (mg/l)	75 – 150	50 – 150	<50
Suelo	Grado de acidez Baumannully (mg/kg)	>200	---	---
	Ion sulfato (mg SO ₄ ²⁻ /kg de suelo seco)	2000 - 3000	3000 - 12000	>12000

Tabla 2.4 Clasificación de la agresividad química (EHE, 2008).

2.4- TRANSPORTE Y PENETRACIÓN DE Cl⁻ EN EL HORMIGÓN

El movimiento de gases, líquidos e iones a través del hormigón es importante debido a la interacción de estos con los constituyentes del hormigón y el agua de los poros, pudiendo alterar la integridad del hormigón directa e indirectamente.

Esos movimientos generalmente llamados penetración, ocurren debido a varias combinaciones de factores físicos diferenciales: presiones diferenciales en agua o aire, diferencia de humedad y concentraciones o diferencia de temperaturas en la solución. Dependiendo de la fuerza impulsora del proceso y de la naturaleza de la materia transportada, pueden considerarse los siguientes mecanismos de transporte: difusión, absorción y permeabilidad (Nilsson L.O. et al, 1996).

Los Cl⁻ en el interior del hormigón pueden tener su origen interno y/o externo. Los primeros se incorporan en el momento de la elaboración de la mezcla, entre las fuentes de cloruros en el hormigón fresco se encuentran los aditivos, algunos áridos y el cemento. Los de origen externo, provienen de ambientes agresivos, gran parte de ellos permanecen como cloruros libres en la solución de poro, siendo en ese caso muy agresivos.

En las estructuras las principales fuentes de Cl⁻ son las sales fundentes, el agua de mar y el ambiente marino en general, en algunos lugares presentan problemas las aguas subterráneas salinas y las sales transportadas por el aire. Para poder comprender estos procesos es necesario considerar los efectos provocados por los cambios en las condiciones ambientales tales como: humedad relativa, temperatura, viento, lluvia y los periodos de humectación-secado a los que se ven sometidas las estructuras (Lindvall, 2002). La influencia relativa de cada uno de estos mecanismos de penetración vendrá dada por las condiciones de exposición, el contenido de humedad del hormigón y la estructura de poros (Costa & Appleton, 1999).

2.4.1- DIFUSIÓN

Si en las distintas regiones de un electrolito hay diferencias de concentración de los iones o partículas, el gradiente de concentración resultante producirá el flujo de los mismos. A este proceso se le denomina difusión.

Como en la teoría cinética de los gases, los iones y moléculas en una disolución están en movimiento continuo, chocando entre ellas y cambiando su dirección. Esta actividad se denomina movimiento Browniano y el análisis estadístico del problema lleva a determinar que esta actividad es el origen del transporte por difusión, ya que éste resulta del movimiento aleatorio de los iones, que se da en mayor medida en una dirección que en otra. Dada la extrema dificultad de seguir el movimiento individual de cada partícula, los procesos difusivos se estudian generalmente bajo un punto de vista macroscópico; así, el movimiento global de las partículas se mide a través de cambios locales de concentración. Por lo anterior, si en dos puntos dentro de una disolución se tiene distintas concentraciones, entre ellos existirá un gradiente de energía libre. Este gradiente es la fuerza impulsora de la difusión. (Castellote, 1997).

La difusión de iones es significativa sólo cuando el hormigón está casi o completamente saturado. Comparado con otros procesos la difusión es muy lenta, pero a menudo lo suficientemente rápida para ser capaz de causar el deterioro de las estructuras de hormigón (Ferreira, 2004). La ecuación generalizada de la ley de Fick gobierna los procesos de difusión, suponiendo la base de partida de numerosos modelos propuestos, que asumían el gradiente de concentración de cloruros como única causa del ingreso y transporte de iones cloruros en el hormigón (Wang et al., 2005):

Donde:

J_c : flujo ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

D : coeficiente de difusión (m^2/s)

C : concentración (kg/m^3).

$$J_c = -D \frac{dC}{dx}$$

El valor del coeficiente de difusión puede suponerse constante en primera aproximación (ASTM C1556-04).

Para caracterizar los procesos de difusión el parámetro fundamental es el coeficiente de difusión, que relaciona el flujo de difusión (iones por unidad de tiempo y de área) correspondiente al estado estacionario (flujo constante en el tiempo) con el gradiente de la concentración del ion (Castellote, 1997).

Coeficiente de difusión (D). Se define como la velocidad de transferencia de la sustancia que se difunde a través de una unidad de área de la sección, dividido por el gradiente de concentración del espacio de la sección (Crank, 1975).

$$D(m^2 / s) = -\frac{F}{\partial c / \partial x}$$

Donde:

F : es la velocidad de flujo en mol m⁻².s

$\partial c / \partial x$: es el gradiente de concentración en mol/m³.

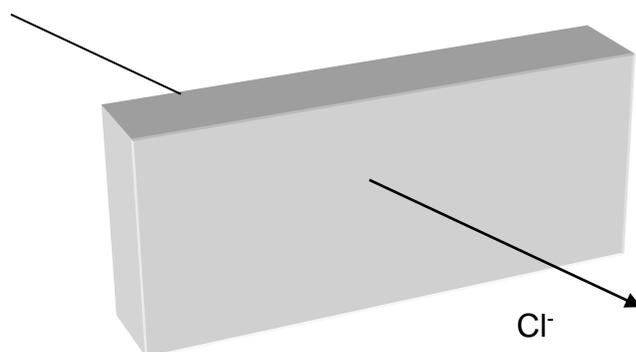


Figura 2.2 Representación de la sección unitaria empleada para definir el flujo de cloruros.

2.4.2- PERMEABILIDAD

La permeabilidad es definida como la propiedad de un medio fluido que define la facilidad con la cual un fluido pasará a través de él, bajo condiciones de un diferencial de presiones. La ley de Darcy ha sido generalizada para ser aplicada en cualquier flujo y en cualquier dirección a través de un material poroso, siempre y cuando las condiciones de flujo sean viscosas. La ley de Darcy puede ser expresada mediante la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A} = -(k / \mu)(dP / dL)$$

Donde:

v : velocidad aparente de flujo (m/s)

Q : caudal (m³/s)

A : sección transversal del área de flujo (m²)

k : representa la permeabilidad intrínseca del material (m²)

μ : viscosidad del fluido (N·s/m²)

P : presión (N/m²)

L : longitud (m)

Los ensayos de permeabilidad más conocidos son los referidos a la célula de permeabilidad, el fundamento de este ensayo se basa en suministrar la presión de un fluido en una cara de la muestra y medir el flujo, ya sea el de entrada o el de salida (Basheer et al., 2001).

2.4.3- ABSORCIÓN CAPILAR

Se define como una propiedad hidráulica relacionada con la porosidad efectiva o accesible al agua. La absorción capilar es un caso especial de transporte inducido por la tensión superficial del agua que actúa sobre los capilares del hormigón. Para examinar la velocidad de penetración del agua dentro de una estructura de hormigón, es necesario conocer los siguientes aspectos: 1) Presión de empuje, 2) Radio de poro interconectado relevante, 3) Volumen de poros interconectados y la longitud real de los poros.

La absorción capilar es un proceso físico complejo de penetración y movimiento del agua líquida dentro de un material poroso, debido a una combinación de fuerzas electromoleculares, tensión superficial del agua y presión atmosférica. Puede decirse que la penetración del agua por capilaridad se debe a que la fuerza de atracción entre ésta y el sólido, supera la tensión superficial de la gota. El ascenso capilar, aplicado en el caso de los poros capilares del hormigón, será mayor cuanto menor sea el radio del poro y la densidad del líquido capilar. Esto se expresa mediante la siguiente ecuación (Mahmoud, 2010):

$$h = \frac{2\gamma}{rg\rho} \cos \theta$$

Donde:

H : altura a la que se eleva el fluido (m)

γ : tensión superficial (Kg/s²)

r : radio del tubo (m)

g : gravedad (m/s²)

ρ : densidad del líquido (kg/m³)

Observamos que la altura a la que se eleva o desciende un líquido en un capilar es directamente proporcional a su tensión superficial, y está en razón inversa a la densidad del líquido y al radio del tubo, Figura 2.3.

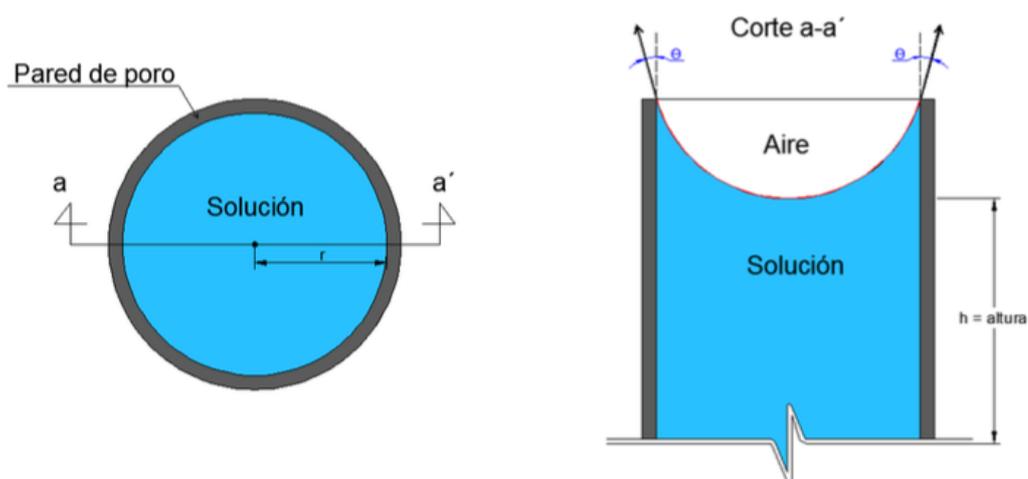


Figura 2.3 Representación gráfica de los factores que intervienen en el proceso de absorción capilar.

2.4.4- HUMEDAD Y TEMPERATURA

Las condiciones naturales preponderantes del entorno donde se encuentra situada una estructura expuesta a la contaminación de cloruros, tienen un papel de suma importancia en cuanto a los mecanismos de penetración. Como es sabido por la comunidad científica el sistema de poros del hormigón basará su efectividad, para llevar a cabo los diferentes mecanismos de penetración de iones agresivos, en la cantidad y la forma en que la humedad llegue a la red porosa.

Para condiciones de intemperie natural, la humedad relativa y la temperatura inducen una dinámica en el agua contenida en los macroporos y los poros capilares debido a que se establece un gradiente en la cantidad de agua entre el interior y el exterior del hormigón, que es la fuerza motriz para desplazarla a

la atmosfera o a saturar los poros. Es así como en condiciones de humedad relativa inferior al 100%, el contenido del líquido en el hormigón disminuye, esto se puede observar claramente en la Figura 2.4, dejando los poros parcialmente llenos.

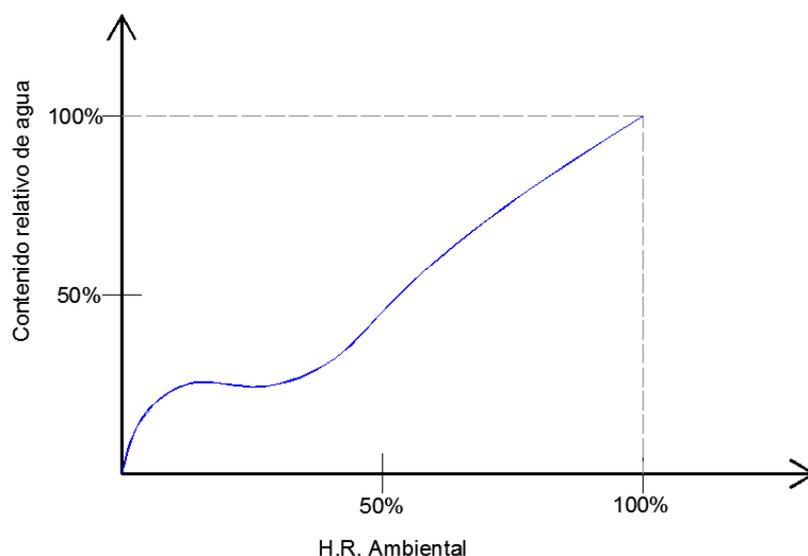


Figura 2.4 Efectos de la humedad relativa exterior hacia el interior del hormigón (CEB, 1993).

2.5- TIPOS DE AMBIENTES PORTADORES DEL ION AGRESIVO Cl^-

Existen diferentes entornos con presencia de cloruros, siendo el ambiente marino y el de alta montaña los más representativas de este fenómeno. Como podemos observar en la Figura 2.5.1, las estructuras localizadas en el ambiente marino pueden estar en contacto directo con el agua de mar o recibir descargas de cloruros mediante brisa marina, la cual influye a considerable distancia respecto a la costa. En alta montaña es necesario el uso de sales fundentes debido a las heladas y precipitaciones en forma de nieve, que propicias altas concentraciones sobre las superficies de rodamiento y estructuras aledañas.

2.5.1- AMBIENTE MARINO

El efecto del agua de mar en el hormigón merece una atención especial, por varios motivos. En primer lugar, los océanos representan hasta un 80% de la superficie de la tierra, por lo tanto, un gran número de estructuras están expuestas al agua de mar, ya sea directa o indirectamente. Los vientos pueden transportar brisas del agua de mar hasta un cierto número de kilómetros en el interior de la costa. Además los elementos estructurales de hormigón se emplean ampliamente en la construcción de puertos y embarcaderos: muelles, plataformas, rompeolas y muros de contención (Abdelkader, 2010). De acuerdo con la clasificación de la EHE, un elemento estructural de hormigón armado o pretensado presenta 3 niveles distintos de susceptibilidad al deterioro dependiendo de la zona de ambiente marino en la zona que se encuentre (EHE, 2008).

Las estructuras en ambiente marino pueden clasificarse según su ubicación y las condiciones agresivas del medio, en las siguientes zonas, cuyas fronteras en la realidad no están definidas.

Zona de Inmersión: El hormigón que se encuentra permanentemente sumergido por debajo de las zonas de mareas, es capaz de proteger las barras de acero de refuerzo debido a la débil concentración de oxígeno en el agua que impide la actividad corrosiva del ión cloruro, en el caso de haberse introducido hasta las barras.

Zona de marea: Comprende los elementos entre los niveles de marea alta y baja, donde el hormigón está permanentemente húmedo, debido a que la inmersión es cíclica a lo largo del día. Los poros se encuentran saturados, pues, el tiempo de marea baja es reducido y no se produce la desecación, lo que disminuye el peligro de corrosión, pues el hormigón absorbe agua más rápidamente que la pierde. En esta zona el agua ingresa por succión capilar, transportando las sustancias disueltas como el cloro y los sulfatos, sin difusión de gases. En el hormigón localizado entre mareas, se pueden producir fisuras que adelanten la corrosión, sea por golpes de impacto o por acción de las olas.

Zona de salpicaduras: Esta zona en alguna bibliografía se ve incluida en la zona atmosférica, se le considera localizada por encima del nivel de la marea alta, propensa a la salpicadura de las olas y el baño de la espuma, presenta el riesgo de ciclos alternados de humectación y secado, de acuerdo a las condiciones de temperatura y humedad del medio, que pueden afectar severamente el hormigón. En el periodo húmedo se produce el ingreso del ion cloruro por difusión, en el secado se elimina el agua en exceso, pero el hormigón retiene el cloro, al repetirse el ciclo sucesivamente el porcentaje del ion cloruro resulta muy elevado. En esta zona de abundante oxígeno, la corrosión por cloro puede darse conjuntamente con la corrosión por carbonatación.

Zona atmosférica (ambiente marino): El hormigón no está en contacto con el agua de mar, pero recibe las sales procedentes de la brisa marina y la niebla salina. Pueden comprender muchos kilómetros al interior de la costa dependiendo de las características de los vientos dominantes.

Las construcciones de hormigón ubicadas en el litoral o alrededores, son propensas a la corrosión por cloro en suspensión en la atmósfera, en forma de microscópicas gotas de agua de mar. En la niebla o aerosol la concentración salina de cloruros y sulfatos puede ser eventualmente mayor que en el agua de mar, debido a la gran dispersión de las gotas y la evaporación parcial de agua, en especial cuando la temperatura es alta y la humedad relativa es baja. En esta zona la corrosión produce fallas características en el hormigón, como fisuras, grietas y desprendimientos del revestimiento, pero además, causa un peligroso daño invisible, que afecta las estructuras en caso de sismos. En efecto, los cloruros de la brisa marina atacan la estructura reduciendo la sección del acero de refuerzo, de manera que cuando recibe solicitaciones por efecto del sismo, únicamente puede soportar una parte de la carga de diseño.

En estructuras aéreas los poros del hormigón se llenan de aire pero cuando la humedad del ambiente es mayor, la superficie de los poros se cubre con una capa de agua absorbida. Los cloruros disueltos se difunden a través de esta capa de agua que recubre las paredes de los poros o a través de los poros llenos de agua; si la cantidad de agua es menor, la difusión se reduce.



Figura 2.5.1 Efectos provocados por ambientes marinos en el hormigón. (Blog hidrodemolición, 2017)

2.5.2- AMBIENTE DE ALTA MONTAÑA

El ambiente denominado como alta montaña en relación al hormigón, tiene por naturaleza condiciones de deterioro por los efectos de las heladas y los ciclos de hielo-deshielo a los que este se ve sometido. Adicionalmente y por conveniencia de las necesidades del ser humano, en las carreteras situadas en este ambiente aparece el uso de sales fundentes (cloruro sódico o cloruro cálcico) que tienen por finalidad fundir el hielo que se forma sobre las carreteras y puentes. Cuando las sales fundentes se aplican sobre tramos carreteros su efecto perjudicial es principalmente en el entorno natural debido a los escurrimientos de las sales hacia ríos y lagos, mientras que su aplicación en tableros de puentes de hormigón armado suman otro factor de deterioro, que consiste en el ataque del hormigón armado por parte de los iones agresivos de cloruros aportados por la sal fundente, generando corrosión en el acero de refuerzo y deterioro en el hormigón.

La aplicación de productos descongelantes sobre las superficies de tráfico se basa en el principio general de que una solución salina tiene un punto de congelación más bajo que el agua. Por razones económicas el producto más frecuentemente empleado es la sal común (cloruro sódico NaCl). Su aplicación puede producir cambios de temperatura en la superficie del hormigón que generan tensiones en los poros de la cara superior, mayores que la resistencia del hormigón a tracción, con lo que además se abre paso al ataque de la armadura por el cloruro (Calavera, 2005).

Cuando se adiciona la sal en el hielo se provoca la fusión del hielo, donde realmente lo que se funde es una mezcla de hielo y sal llamado “eutético” (disolución que solidifica a la temperatura más baja). Cuando la sal (NaCl) entra en contacto con el hielo, los iones se sitúan alrededor de las moléculas de agua formando un agregado molecular de fórmula $(H_2O).(NaCl)$. Para que se consiga este ordenamiento son necesario únicamente unos pequeños movimientos de átomos. Cuando se respetan las proporciones exactas (alrededor del 23% de sal en masa), se tiene una disolución que se comporta respecto a su solidificación como un producto puro y que se le denomina “eutético”. La temperatura de fusión de este eutético es de alrededor de $-21^{\circ}C$. Si la proporción de sal es inferior a esta relación, se da una mezcla agua-eutético, que se funde a una temperatura superior (entre $-21^{\circ}C$ y $0^{\circ}C$). Si la proporción de sal es superior, se tiene una mezcla sal-eutético que también se funde a una temperatura superior.

La acción perjudicial que las sales fundentes ejercen sobre el hormigón radica en 3 causas principales:

- 1.- El aporte de una gran cantidad de ion cloruro que induce la corrosión de las armaduras de refuerzo.
- 2.- La fusión del hielo es un proceso endotérmico (absorbe energía). La velocidad de enfriamiento puede llegar a ser de hasta $14^{\circ}C/min$, provocando así un choque térmico en la superficie del hormigón que lo deteriora.
- 3.-El hormigón a través de su red capilar absorbe las sales fundentes añadidas que se han acumulado en el interior del hormigón tras su uso repetido.

La distribución de sales que se establece en el interior da lugar a la congelación por capas.

La concentración de sales varía con la profundidad, por lo cual cabe esperar que se acumulen más sales cerca de la superficie y menos en el interior, sin embargo la superficie del hormigón se ve sometida a lavados por lluvias, lo cual genera que el máximo de sal se presente a 1cm de profundidad aproximadamente.

En España el órgano encargado del control de las carreteras recomienda esparcir fundentes cuando las temperaturas alcanzan los 3°C positivos de temperatura, en previsión de posibles descensos consecutivos. Con clima seco, la aplicación de fundentes es en forma de salmuera (agua con sal) y con clima húmedo se aplica únicamente la sal. Otra opción para la eliminación de nieve es la intervención de los equipos dotados de palas removedoras de nieve y esparcidores de fundentes. Dependiendo de la cantidad de nieve precipitada se decidirá por el uso de una u otra alternativa.

3.- Finalidad del Proyecto

3.- Finalidad del Proyecto:

El presente trabajo de investigación tiene como razón, el estudio de los parámetros que influyen en el transporte de cloruros en el interior del hormigón totalmente saturado. Teniendo en cuenta la existencia de diferentes mecanismos de transporte ligados a los cambios en los parámetros del medio ambiente, la evolución del grado de hidratación del hormigón y la interacción entre los cloruros libres en la solución de poro con la matriz del cemento. El estudio de los factores involucrados y la relación entre estos, proporcionará un mayor conocimiento de los mecanismos de transporte de cloruros, comprendiendo las razones que los provocan y la influencia relativa de cada uno de ellos.

Un análisis detallado de las condiciones medio ambientales y su interacción con la porosidad de la matriz cementicia, proporcionará información valiosa para el diseño de mezclas de hormigón idóneas, de acuerdo a las condiciones climáticas predominantes. Los criterios utilizados en los procedimientos de dosificación y el empleo de adiciones tienen una gran influencia en la microestructura del hormigón. La elaboración de distintas dosificaciones y su posterior evaluación frente a cloruros, permitirá comparar resultados que proporcionen valores indicativos para establecer juicios relacionados a la durabilidad de los hormigones.

4.- Desarrollo experimental

4.- Desarrollo experimental:

4.1- MODELO MATEMÁTICO:

Basado en la ley de Fick y la conservación del cloruro, el modelo matemático está formado por una ecuación diferencial parcial y la dependencia del coeficiente de difusividad con la temperatura (T):

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = \nabla(D_c \nabla C_f)$$

$$D_{cf} = D_{cf,exp} \sqrt{\frac{\Phi}{\Phi_0}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\Phi e^{\frac{1}{e}}}{\Phi_0} \right)^e \right) \right]^2 \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] \right)}$$

Donde C_f es la concentración de cloruro libre, D_{cf} es el coeficiente de difusión de cloruro libre, $D_{cf,exp}$ es el coeficiente de difusión de cloruro a temperatura de referencia, E_a , la energía de activación, R , la constante de gas ideal y T_0 es la temperatura de referencia (20°C).

Φ es la Porosidad y Φ_l es la fracción de volumen de la fase líquida.

'e' es una constante de ajuste para la ecuación.

$$\Phi = \Phi_l = \Phi_0 - \frac{1}{\rho_{FD}} C_B - \frac{1}{\rho_{PS}} C_P$$

Como el proceso está saturado:

$\Phi = \Phi_l$ y no se produce cloro precipitado, C_P

Donde Φ cambia

$$\Phi = \Phi_0 - \frac{1}{\rho_{FD}} C_B$$

Donde $\rho_{Friedel}$ es Densidad de la sal de Friedel (kg/m³) y toma un valor de $1.8920 \cdot 10^3$ y Φ_0 es la fracción inicial de huecos.

Por otro lado, C_B , el cloro ligado al hormigón viene dado por el modelo de Langmuir

$$C_B = \frac{\widetilde{C}_B \cdot K \cdot C_f}{1 + K \cdot C_f}$$

donde \widetilde{C}_B y K son constantes del modelo de Langmuir

Además, existe la siguiente relación entre el cloro total, el ligado y el libre

$$C_T = C_f + C_B$$

Por otro lado, existe una relación entre la concentración de cloro libre en relación al volumen de hormigón y la concentración de cloro libre en relación al volumen de solución

$$C = \Phi_l \cdot C_f$$

donde C es la concentración de cloruro libre (kg/m^3 de solución en los poros)

4.2- MÉTODO DE SIMULACIÓN POR REDES (MESIR):

El método de simulación por redes (MESIR) es una herramienta que permite estudiar cualquier proceso que pueda definirse mediante un modelo matemático. El procedimiento consta de dos fases: en primer lugar la elaboración de un modelo en red o circuito eléctrico equivalente del proceso y posteriormente, la simulación del proceso obteniendo la solución del modelo en red mediante el programa adecuado de resolución de circuitos eléctricos.

4.3- MODELO EN RED:

Un modelo en red se considera equivalente a un determinado proceso cuando las ecuaciones del modelo matemático discretizado y las ecuaciones del modelo en red para un elemento del volumen correspondiente a variables análogas coinciden.

La técnica consiste en reticular el espacio en elementos de volumen o celdas elementales. Al aplicar a estas celdas de tamaño finito las ecuaciones diferenciales, se obtienen un conjunto de ecuaciones diferenciales en diferencias finitas. Una vez que se ha establecido la correspondencia entre variables dependientes del problema y variables eléctricas, los resultados de la simulación pueden interpretarse en términos del proceso que se modela. La asociación de celdas según la geometría del problema configura el modelo en red correspondiente a todo el medio finito. El modelo será más preciso cuanto mayor sea el número de celdas.

4.4- COMPONENTES DEL MODELO EN RED:

A la red se le asocia un conjunto de flujos que obedecen a una ley de balance local y un conjunto de fuerzas que satisfacen la condición de unicidad. Las leyes de Kirchhoff establecen relaciones entre flujos y fuerzas por separado, pero no expresan ningún tipo de relación de flujos y fuerzas entre sí. Las relaciones entre el par conjugado flujo- fuerza se conocen como ecuaciones constitutivas y definen los elementos del circuito que expresan características de cada proceso. Las relaciones constitutivas se pueden establecer entre las variables de un par flujo-fuerza, se denominan monpuertas.

4.4.1- MONOPUERTAS PASIVAS:

Los elementos pasivos no generan potencia (o bien la disipan en una transformación energética o bien almacenan y/o la entregan a la red), constituyen las monpuertas pasivas. En función de la relación existente entre

las variables que obedecen a la ley de corrientes de Kirchhoff LCK y a la ley de voltajes de Kirchhoff LVK, existen las siguientes monpuertas pasivas:

- **Monopuerta resistiva:** es un elemento de circuito asociado a una relación entre las derivadas temporales de las variables flujo y fuerza de una misma rama mediante una función independiente del tiempo que es la resistencia R

$$\frac{dX(t)}{dt} = \frac{RdJ(T)}{dt}$$

Una monopuerta resistiva es lineal si también lo es la relación entre las variables $X(t)$ y $J(t)$, en este caso R es una constante. Su acción es instantánea y carecen de memoria. Las monpuertas resistivas no lineales se definen a través de las funciones:

$$j(t) = Fr^{-1}(X) \quad X(t) = Fr(J)$$

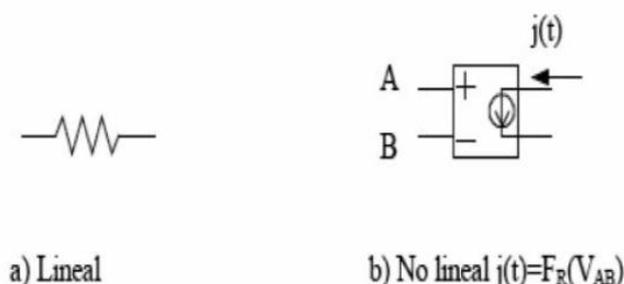


Figura 4.1 Representación de monpuertas resistivas. M.Cánovas, F.Alhama, I.Alhama, M.Alcaraz(2012),

- **Monopuerta capacitiva:** es un elemento de circuito asociado a una relación entre la variable flujo y la derivada temporal de la variable fuerza en una misma rama mediante una función independiente del tiempo que es la capacidad C.

$$J(t) = CdX(t)/dt$$

En las monpuertas capacitivas se produce algún tipo de almacenamiento sin pérdidas. Su estado tiene en cuenta todas las operaciones hechas con anterioridad, de manera que tiene memoria.

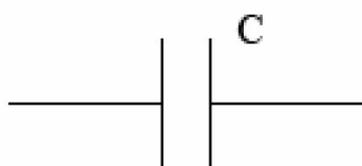


Figura 4.2 Representación de monpuertas capacitiva. M.Cánovas, F.Alhama,I.Alhama, M.Alcaraz (2012),

- **Monpuerta inductiva:** es un elemento de circuito asociado a una relación entre la variable fuerza y la derivada temporal de la variable flujo de una misma rama mediante una función independiente del tiempo que es la inductancia L

$$X(t) = LdJ(t)/dt$$

Al igual que en la monpuerta capacitiva, se produce un almacenamiento de energía sin pérdidas y su estado tiene memoria.



Figura 4.3 Representación monpuerta inductiva lineal. M.Cánovas, F.Alhama, I.Alhama,M.Alcaraz (2012)

4.4.2- MONOPUERTAS ACTIVAS:

Las fuentes de tensión y corriente son elementos activos que generan potencia según una determinada ley, son las monopuertas activas. En ellas se produce una aportación o extracción de energía al sistema. Hay tres tipos de monopuertas activas:

- **Fuentes constantes:** se definen con las expresiones $F_j(J) = 0$ y $F_x(X) = 0$ en fuentes de flujo y fuerza respectivamente. Tienen asignado un sentido que indica por donde fluye la energía. Corresponden a pilas o generadores de corriente constante.

- **Fuentes dependientes del tiempo:** la relación constitutiva entre las variables tiene la forma $X=X(t)$ y $J=J(t)$ según se trate de fuentes fuerza o flujo. También tiene asignado un sentido que indica la dirección en que fluye la energía.

- **Fuentes controladas:** son monopuertas especiales asociadas a relaciones constitutivas entre variables (conjugadas o no) expresadas mediante cualquier función que no contiene explícitamente el tiempo. Se trata de elementos de entradas múltiples con una única salida que corresponde a un flujo o una fuerza que depende de otros flujos o fuerzas de distintas ramas y nudos, del mismo o diferente circuito. Estas fuentes permiten especificar acoplos energéticos de distinto tipo.

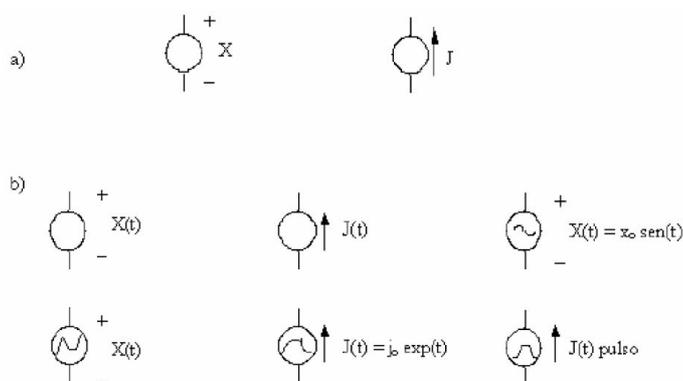


Figura 4,4 Representación de monopuertas activas: a) fuentes constantes, b) fuentes dependientes del tiempo. M. Cánovas, F. Alhama, I. Alhama, M. Alcaraz (2012)

4.5- EL MESIR COMO MÉTODO NUMÉRICO:

En el MESIR, el punto de partida es un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) espacio-temporales. La única transformación que se hace en las ecuaciones es la discretización de la variable espacial que permite establecer la red eléctrica equivalente.

El modelo en red es la forma que se le da al modelo matemático para poder introducirlo en el software de resolución de circuitos eléctricos NgSpice, que resuelve las ecuaciones de la red y proporciona la solución numérica del modelo matemático.

La elaboración del modelo en red implica la reticulación espacial, pero no temporal. Se parte de un sistema EDP cuya reticulación espacial las convierte en ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo, que son las correspondientes al circuito de una celda elemental. La diferencia esencial es que en los métodos numéricos ordinarios se realiza una reticulación simultánea de las dos variables independientes espacio y tiempo, mientras que en el MESIR la reticulación es sucesiva: primero se realiza una etapa de reticulación espacial que da como resultado el modelo en red y en segundo lugar, una reticulación temporal que realiza el software NgSpice durante el proceso de simulación.

4.6- SIMULACIÓN MEDIANTE EL PROGRAMA NGSPICE:

Una vez que se ha traducido el modelo a un lenguaje NgSpice puede interpretarse, el programa simula el proceso y arroja los resultados. La simulación está estructurada en cinco subprogramas principales (entrada, organización, análisis, salida y utilidades) que interactúan entre ellos a través de una estructura de datos. El subprograma de entrada lee el archivo, construye una estructura de datos y chequea el circuito. El de organización construye las estructuras adicionales de datos que serán requeridas en el programa de análisis. El subprograma de salida genera y organiza en la memoria central los

resultados solicitados por el usuario en forma tabulada o gráfica.

El subprograma análisis es la parte más importante del programa de simulación. Ejecuta los análisis del circuito requeridos según las indicaciones del archivo de entrada. La información resultante se almacena en la memoria central para su posterior procesamiento en los archivos de salida.

En el proceso de simulación se obtiene la solución numérica de la representación matemática del modelo en red, esta representación contiene: las ecuaciones matemáticas de los diferentes tipos de monopuertas, solución de ecuaciones lineales, solución de ecuaciones no lineales e integración numérica. Sanchez-Perez, JF *et al* (2016).



Figura 4.5 Diagrama de bloques del programa de simulación de circuitos NgSpice. Sánchez-Pérez (2012).

El uso cada vez más extendido de NgSpice demuestra su capacidad para el tratamiento de una extensa variedad de problemas en simulación de circuitos, resolviendo respuesta en corriente continua, respuesta transitoria en el tiempo y análisis de Fourier en el dominio de la frecuencia y análisis de pequeña señal en corriente alterna y distorsión. Sanchez-Perez, JF *et al* (2016).

5.- Análisis de los resultados:

5.- Análisis de los resultados:

Para estudiar los efectos de la difusividad de los cloruros libres, tomamos un valor típico a temperatura de referencia, $1,0 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Las condiciones límite se definen por el valor de referencia característico de cloruro libre, 1 kg/m^3 de hormigón, y el rango de temperatura a estudiar está entre 10°C y 50°C . La distancia desde la superficie hasta el acero es de $0,05 \text{ m}$.

$C_{\text{extr}}=19.455 \rightarrow \text{kg/m}^3$ de solución en los poros, Concentración de cloro libre inicial en el extremo en contacto con el agua

$\Phi_{0,\text{ini}}=0.1138 \rightarrow$ Porosidad

$\text{sat}=1 \rightarrow$ Saturación

$C_{\text{F,ini}}=0.001 \rightarrow \text{kg/m}^3$ de hormigón, Concentración de cloro libre inicial

$K=2.1336 \rightarrow$ Constante K de la ecuación de cloro ligado

$\tilde{C}_B=9.0727 \rightarrow$ Constante CB de la ecuación de cloro ligado

$\text{CBK}=\text{CB} \cdot K \rightarrow$ Producto de $\text{CB} \cdot K$ de la ecuación de cloro ligado

$\text{Lim.ox}= 0.9 \rightarrow$ Límite sobre el cual se produce oxidación en el interior de la estructura.

Temperatura ($^\circ\text{C}$)	D_{cf} (m^2/s)	Tiempo inicio corrosión(días)
10	$2,83 \cdot 10^2$	38,48
15	$2,88 \cdot 10^2$	33,38
20	$2,93 \cdot 10^2$	29,02
25	$2,98 \cdot 10^2$	25,23
30	$3,03 \cdot 10^2$	22,17
35	$3,08 \cdot 10^2$	19,41
40	$3,13 \cdot 10^2$	17,27
45	$3,18 \cdot 10^2$	15,24
50	$3,23 \cdot 10^2$	13,56

Tabla 5.1. Difusividad de cloruros libres para cada temperatura y tiempo de inicio de corrosión.

Las Figuras 5.1 a 5.9 muestran la evolución de la concentración de cloruro libre para diferentes temperaturas y durante 100 días a una distancia de 0,05 m.

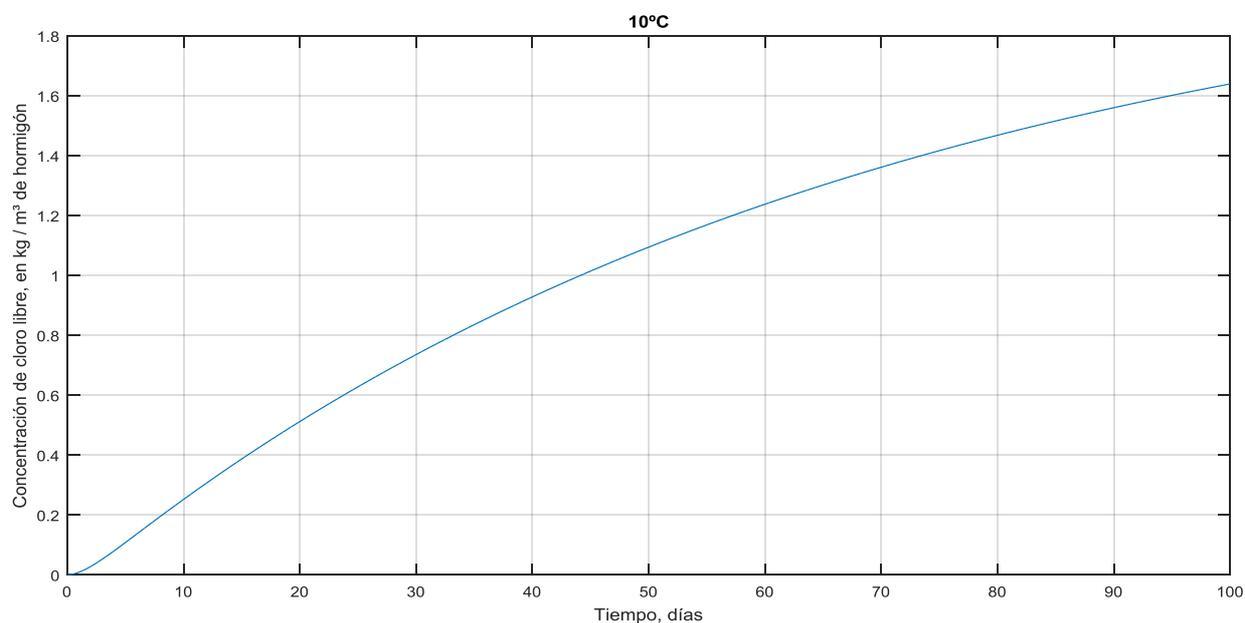


Figura 5.1. Evolución de la concentración de cloruros libres a 10°C y a una distancia de 0,05m.

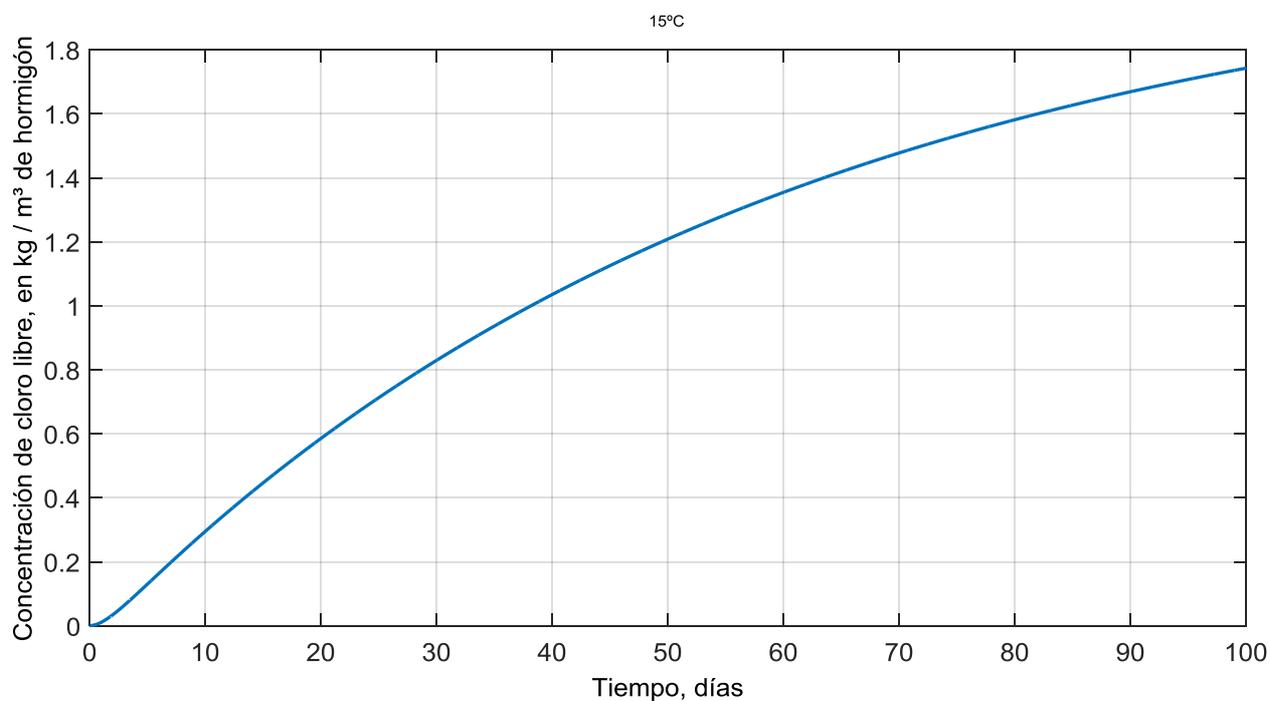


Figura 5.2. Evolución de la concentración de cloruros libres a 15°C y a una distancia de 0,05m.

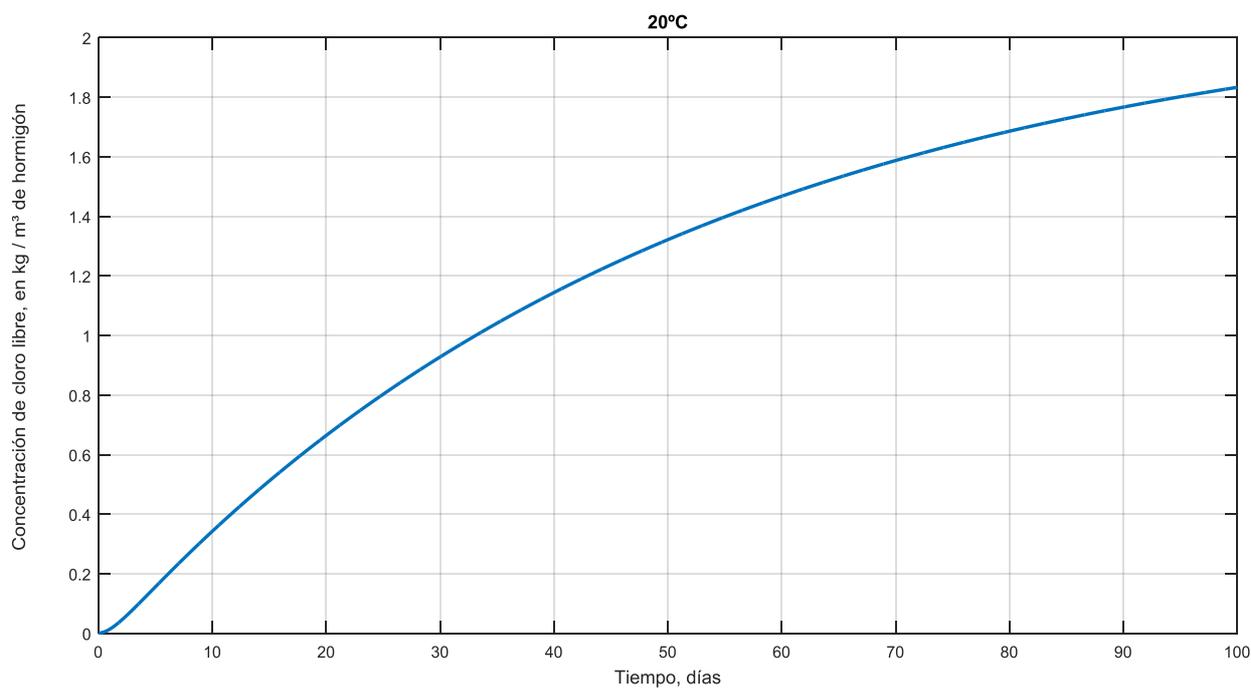


Figura 5.3. Evolución de la concentración de cloruros libres a 20°C y a una distancia de 0,05m.

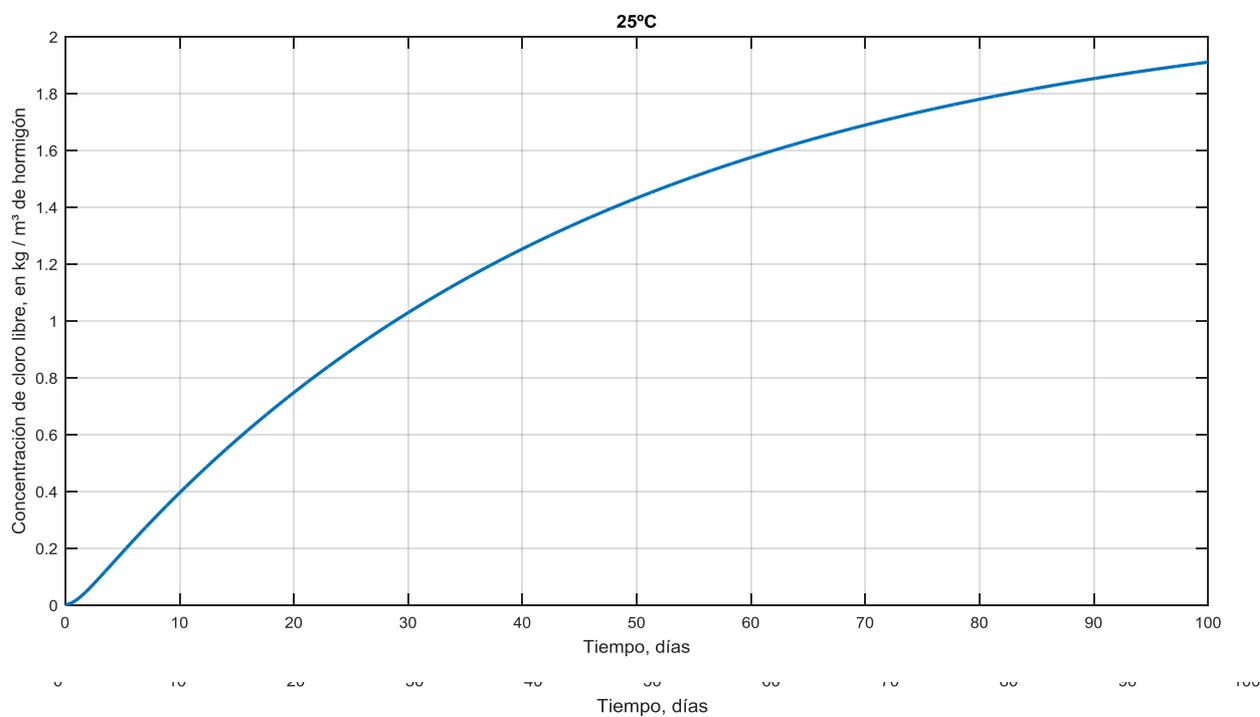


Figura 5.4. Evolución de la concentración de cloruros libres a 25°C y a una distancia de 0,05m.

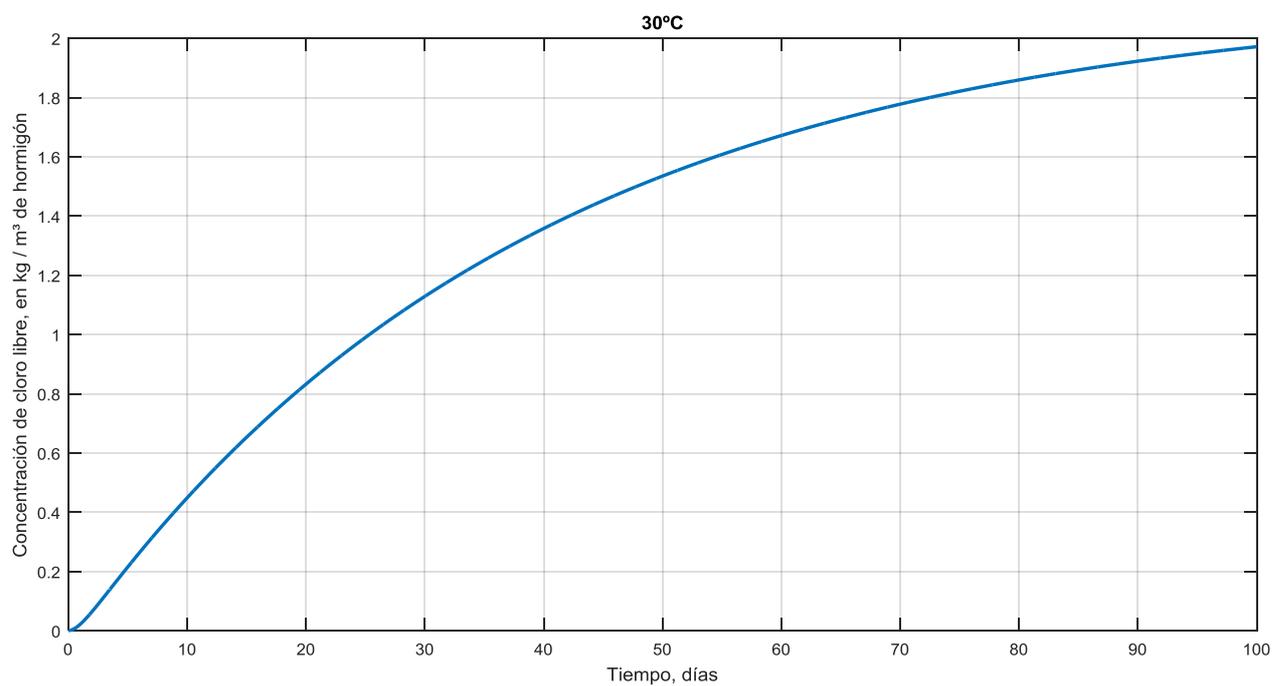


Figura 5.5. Evolución de la concentración de cloruros libres a 30°C y a una distancia de 0,05m

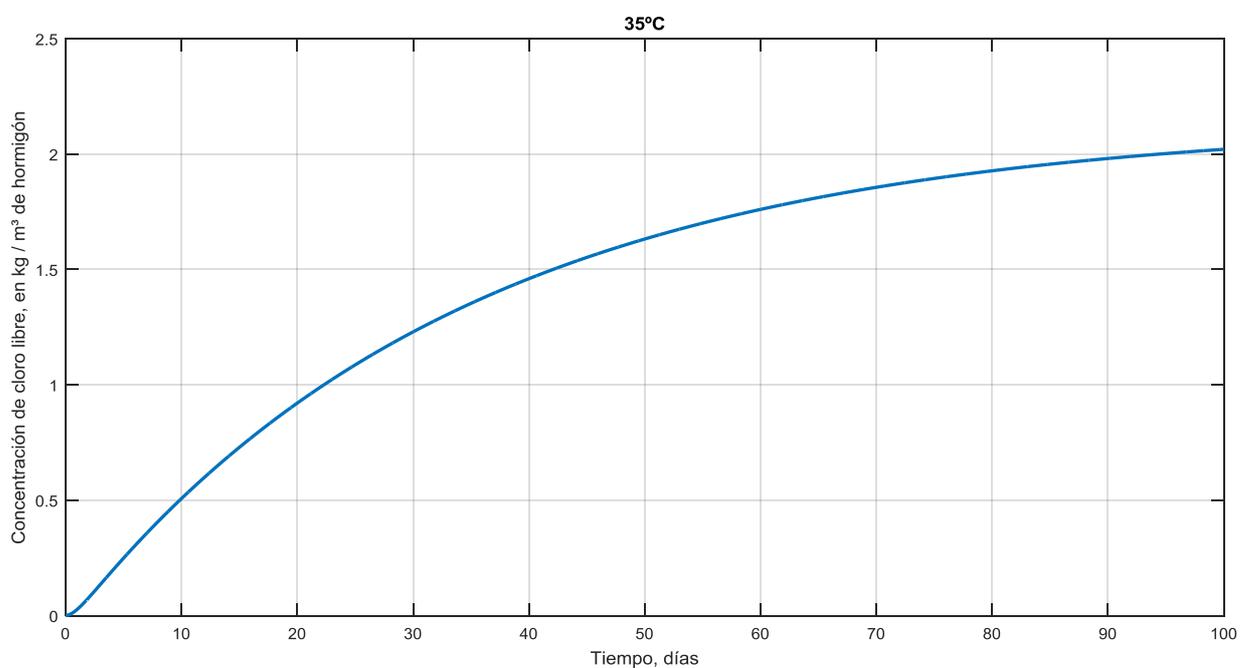


Figura 5.6. Evolución de la concentración de cloruros libres a 35°C y a una distancia de 0,05m.

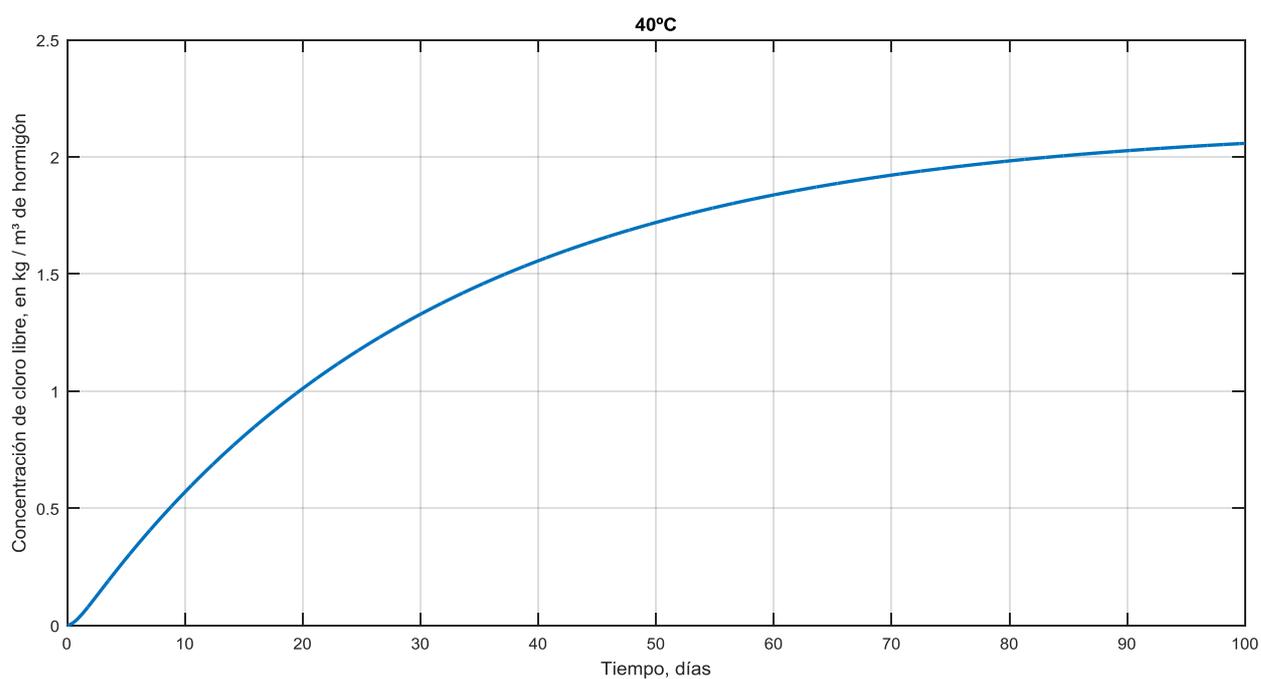


Figura 5.7. Evolución de la concentración de cloruros libres a 40°C y a una distancia de 0,05m.

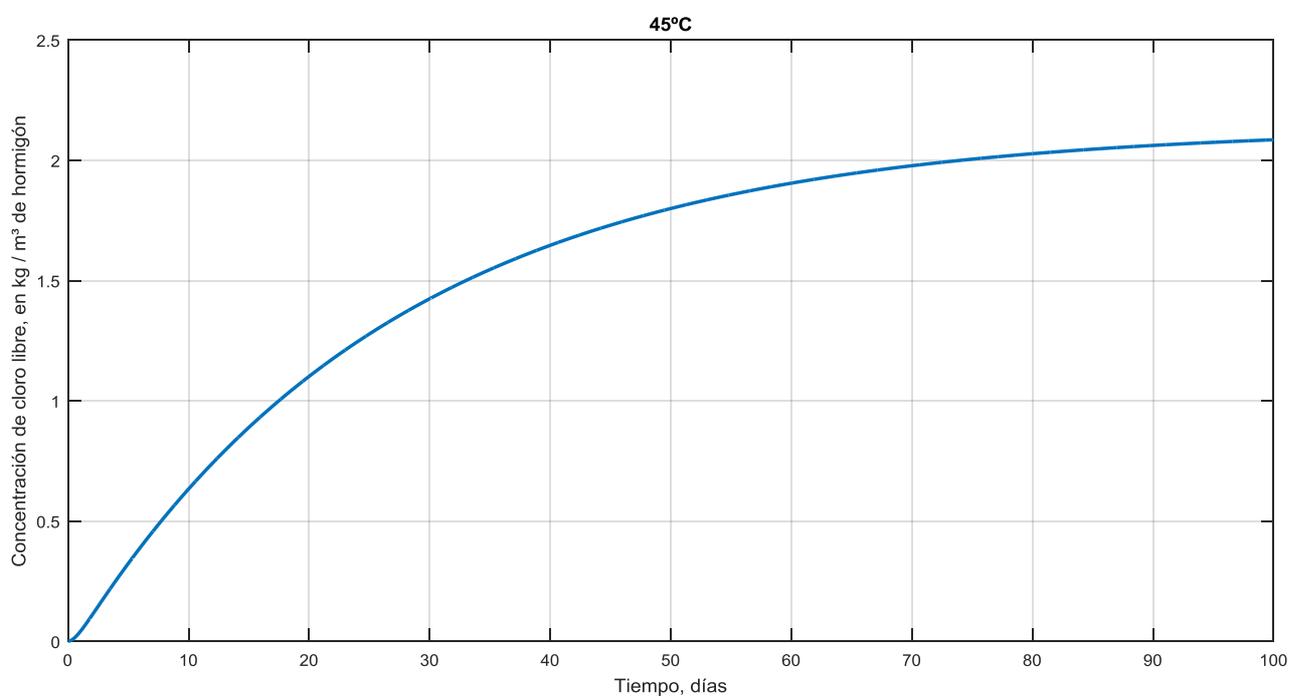


Figura 5.8. Evolución de la concentración de cloruros libres a 45°C y a una distancia de 0,05m.

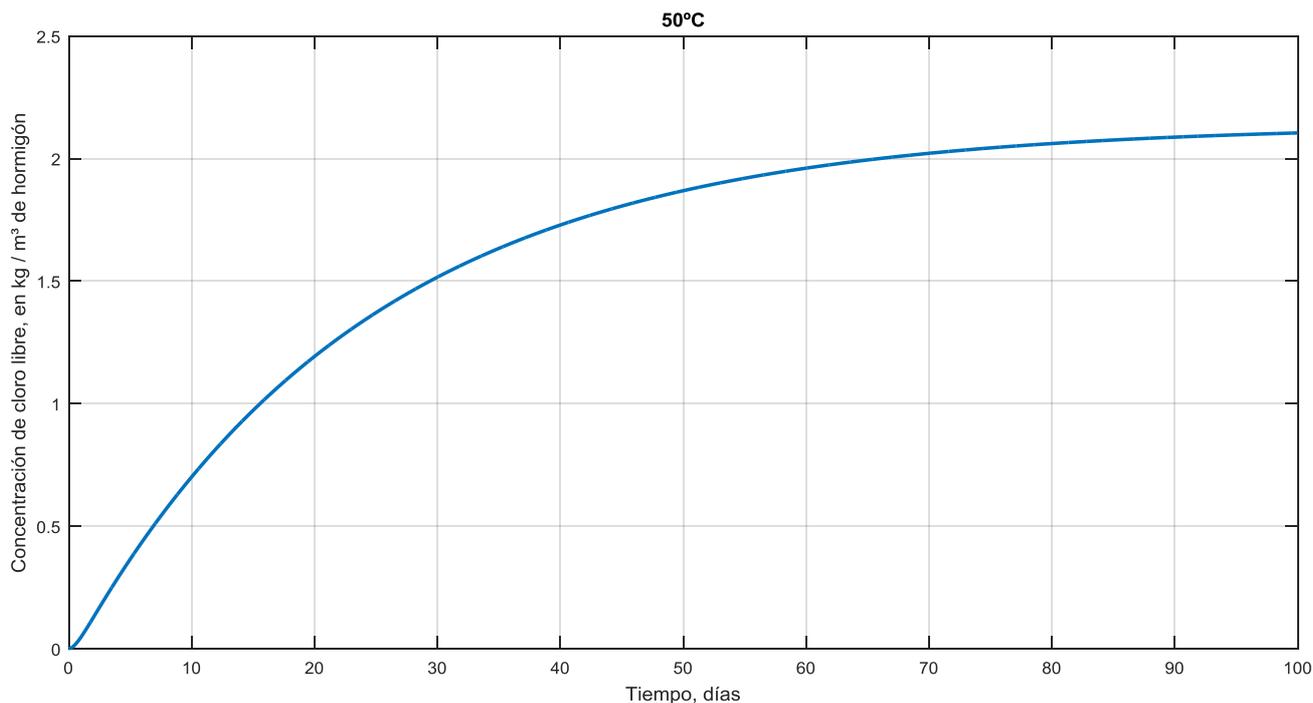


Figura 5.9. Evolución de la concentración de cloruros libres a 50°C y a una distancia de 0,05m.

La Tabla 5.2 muestra las concentraciones de cloruros libres para cada temperatura a 45 días y a una distancia de 0,05 m. Además, se calcula la relación entre los coeficientes de difusión y las concentraciones con respecto a sus valores de referencia.

Temperatura (°C)	C_f a 45 días (kg/m ³)	D_{cf}/D_{cfo}	T/T_o	C_f/C_{fo}
10	1,014	$9,66 \cdot 10^{-1}$	0,5	0,819063005
15	1,128	$9,83 \cdot 10^{-1}$	0,75	0,911147011
20	1,238	1,00	1	1
25	1,347	1,02	1,25	1,088045234
30	1,454	1,03	1,5	1,17447496
35	1,554	1,05	1,75	1,255250404
40	1,645	1,07	2	1,328756058
45	1,731	1,09	2,25	1,39822294
50	1,807	1,10	2,5	1,459612278

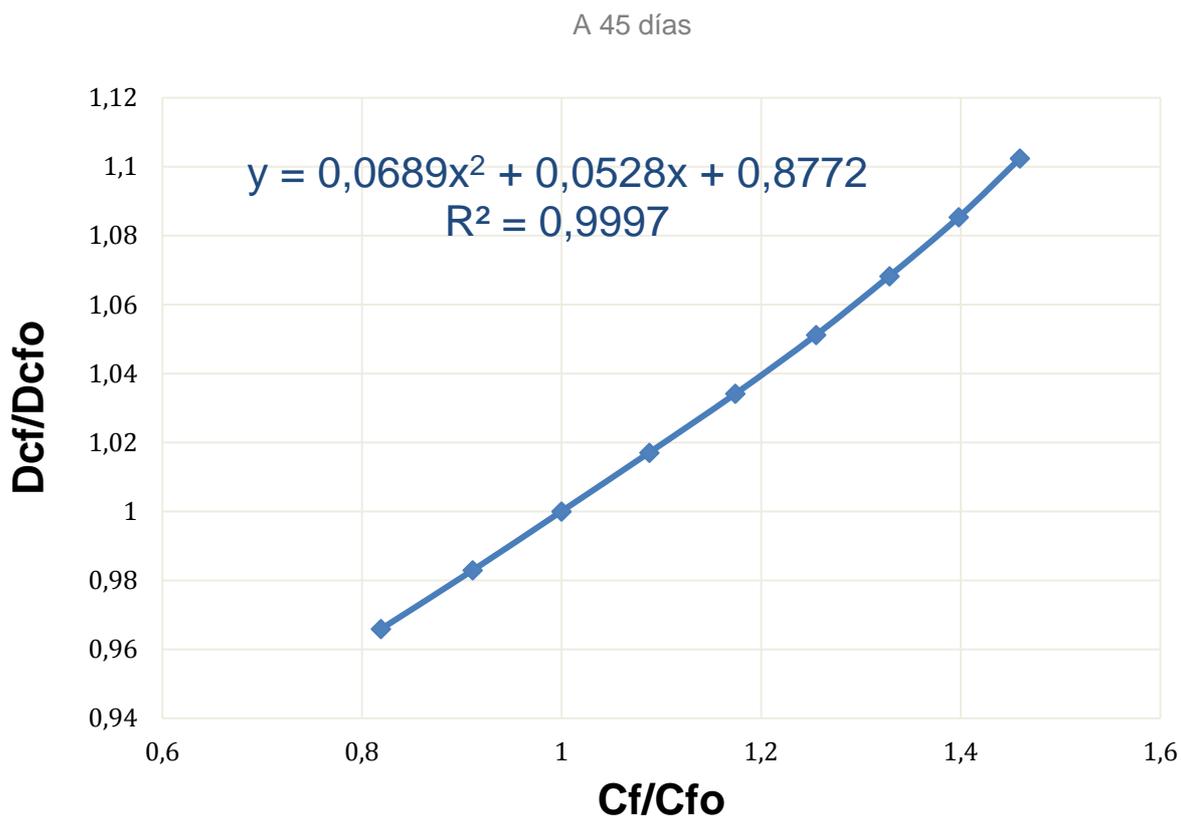


Figura 5.10. Relación entre los coeficientes de difusividad y la relación de las concentraciones de cloro libre a 45 días.

La Tabla 5.3 muestra las concentraciones de cloruros libres para cada temperatura a 90 días y a una distancia de 0,05 m. Además, se calcula la relación entre los coeficientes de difusión y las concentraciones con respecto a sus valores de referencia.

Temperatura (°C)	C_f a 90 días (kg/m ³)	$D_{cf}/D_{cf,o}$	T/T_o	C_f/C_{f_o}
10	1,56	$9,66 \cdot 10^{-1}$	0,5	0,8823529
15	1,67	$9,83 \cdot 10^{-1}$	0,75	0,9445701
20	1,768	1,00	1	1
25	1,851	1,02	1,25	1,0469457
30	1,923	1,03	1,5	1,0876696
35	1,981	1,05	1,75	1,120475
40	2,028	1,07	2	1,1470588
45	2,062	1,09	2,25	1,1662895
50	2,088	1,10	2,5	1,1809954

Tabla 5.3. Concentración de cloruros libres para cada temperatura y su relación.

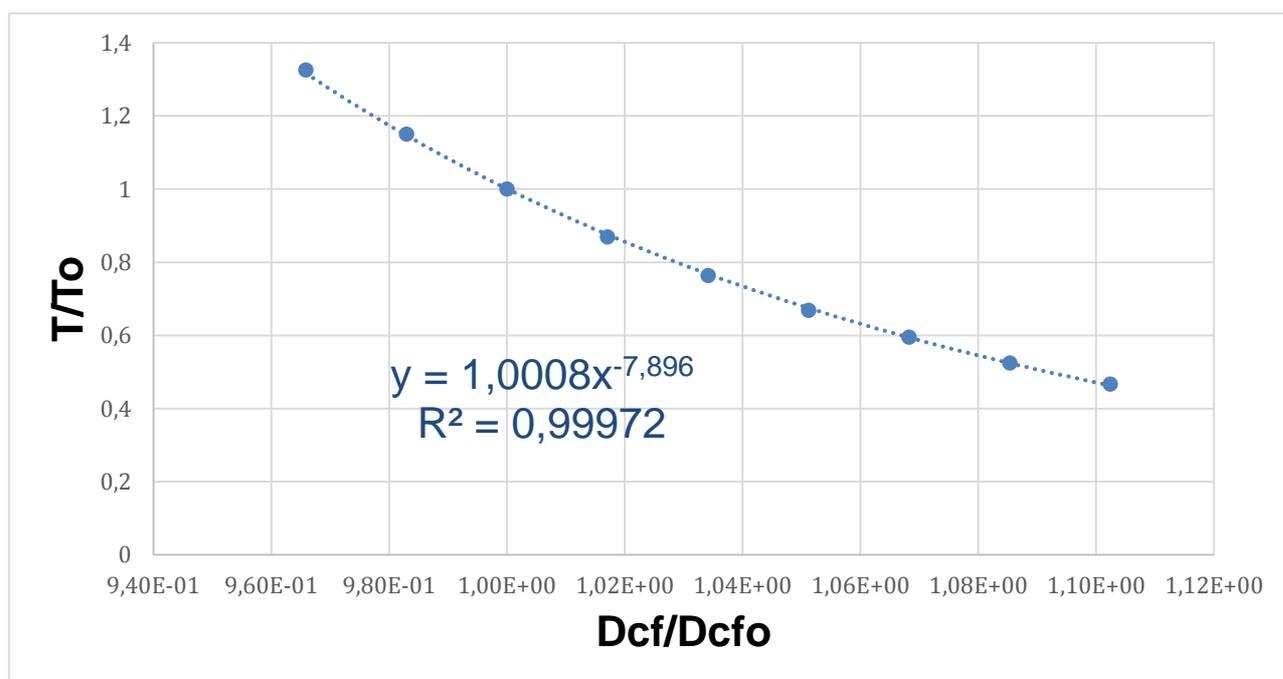


Figura 5.11. Relación entre los coeficientes de difusividad y la relación de las concentraciones de cloro libre.

Comparando las relaciones mostradas en la Tabla 5.3, se puede observar que cumplen una relación potencial, Figura 5.12. Es decir, a medida que aumenta la temperatura, la concentración aumenta potencialmente.

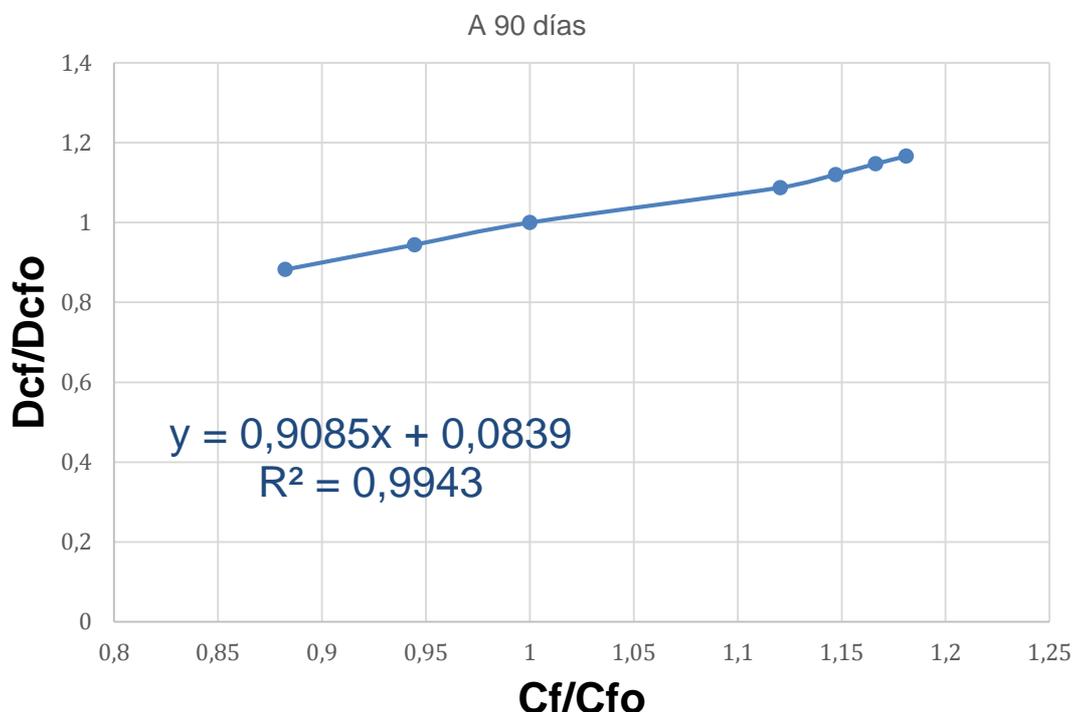


Figura 5.12. Relación entre los coeficientes de difusividad y la relación de las concentraciones de cloro libre a 90 días.

Tanto a 45 días como a 90 días podemos observar en las gráficas que ambas tienen un ajuste perfecto, lo que significa que existe una relación entre el aumento de temperatura y el de concentración de cloro libre.

También podemos comparar como aumenta la concentración de cloro libre a lo largo de los días con sus diferentes temperaturas; se aprecia claramente, que en la tabla de 45 días, que un pequeño aumento en el coeficiente de difusión, entre 20-30°C, produce un aumento de un 17.45% más de cloro. En cambio cuando analizamos las tablas de 90 días observamos que este aumento es solo de un 8.7% de cloro.

Si analizamos un incremento de temperatura mayor, entre los 20-40°C se puede observar un aumento de cloro más significativo, en el caso de 45 días tenemos 1,33 veces más de cloro y en 90 días 1,15 veces más cloro; por lo

cual podríamos afirmar que un aumento de 20°C conllevaría a una disminución en tiempo de inicio de corrosión puesto que se alcanzaría antes el valor umbral.

Otra conclusión, la cual también se puede obtener comparando las tablas de 45 y 90 días, sería como afecta el paso del tiempo en este fenómeno; al aumentar el tiempo la diferencia de cloro entre la temperatura de referencia y otras temperatura superiores se reduce, por ejemplo, a 45 días y 30°C tenemos que la relación de cloro con respecto el de referencia es de 1.17, sin embargo a 90 días se reduce a una relación de 1.09. Es decir, al aumentar el tiempo la concentración de cloro con respecto a la de la temperatura de referencia se reduce, por lo que se va perdiendo la influencia de la temperatura.

Además, se puede observar que el coeficiente de difusión mantiene una relación directa con la porosidad y la temperatura.

6.- Conclusión:

6.- Conclusión:

- **Valoración sobre el software utilizado.** Se ha realizado un estudio detallado sobre la utilización de una parte del programa, la de corrosión en estructuras, que trabajando con ella se han podido estudiar y analizar perfectamente todas las situaciones que aparecen en nuestro caso, por lo que es un software muy preciso y de gran utilidad para el estudio de este tipo de casos, arrojando rápidamente resultados y conclusiones de que otra forma sería mucho más difícil obtener.

- Una de las partes más importantes es la **puesta en práctica por parte del alumno** para trabajar con un software de análisis y predicción basado en ecuaciones de gran complejidad pudiendo el mismo, ser capaz de sacar conclusiones dando a entender por tanto que el trabajo ha sido cumplido con un gran éxito, ya que se ha analizado un caso real donde el alumno ha adquirido los conocimientos y ha sido capaz de aplicarlos para un caso práctico.

Se ha diseñado y utilizado un modelo numérico basado en el método de red para simular con éxito la evolución de la concentración de cloruro libre en estructuras de hormigón armado. Se estudia la influencia de la difusividad de los cloruros libres en función de la temperatura, demostrando que es un factor importante y no puede ser asumida como despreciable. Una conclusión inmediata que se puede observar es: a medida que la temperatura aumenta, la concentración de cloruro aumenta.

Tanto a 45 días como a 90 días podemos observar en las gráficas que ambas tienen un ajuste perfecto, lo que significa que existe una relación entre el aumento de temperatura y el de concentración de cloro libre.

También podemos comparar como aumenta la concentración de cloro libre a lo largo de los días con sus diferentes temperaturas; se aprecia claramente, que en la tabla de 45 días, que un pequeño aumento en el coeficiente de difusión, entre 20-30°C, produce un aumento de un 17.45% más de cloro. En cambio cuando analizamos las tablas de 90 días observamos que este aumento es

solo de un 8.7% de cloro.

Si analizamos un incremento de temperatura mayor, entre los 20-40°C se puede observar un aumento de cloro más significativo, en el caso de 45 días tenemos 1,33 veces más de cloro y en 90 días 1,15 veces más cloro; por lo cual podríamos afirmar que un aumento de 20°C conllevaría a una disminución en tiempo de inicio de corrosión puesto que se alcanzaría antes el valor umbral.

Otra conclusión, la cual también se puede obtener comparando las tablas de 45 y 90 días, sería como afecta el paso del tiempo en este fenómeno; al aumentar el tiempo la diferencia de cloro entre la temperatura de referencia y otras temperatura superiores se reduce, por ejemplo, a 45 días y 30°C tenemos que la relación de cloro con respecto el de referencia es de 1.17, sin embargo a 90 días se reduce a una relación de 1.09. Es decir, al aumentar el tiempo la concentración de cloro con respecto a la de la temperatura de referencia se reduce, por lo que se va perdiendo la influencia de la temperatura.

Además, se puede observar que el coeficiente de difusión mantiene una relación directa con la porosidad y la temperatura.

Por ello, debería ser un aspecto a tener en cuenta al utilizar estructuras de este tipo, ya sea desde su proyección, elaboración, construcción o mantenimiento; además de encontrarnos en un país que se caracteriza por sus elevadas temperaturas y sus extensos kilómetros de costa, sería un punto a tener en cuenta considerar este tipo de fenómeno.

7.- Bibliografía:

7.- Bibliografía:

- ❖ Ministerio de Fomento- Gobierno de España, Clases de exposición ambiental, Consulta Exposición de Ambientes - CPH - Comisión Permanente del hormigón
Disponibile en
https://www.fomento.gob.es/mfom.cea.web/pg_info_eambiental.aspx?idClasesExposicion=G&lang=es-ES
- ❖ Ministerio de Economía y Competitividad (2010). Código técnico de la edificación.
Disponibile en
<http://www.codigotecnico.org/web/recursos/documentos/dbhs/hs4/>
- ❖ EHE 08.
https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPH/instrucciones/EHE_es/
- ❖ Sánchez-Pérez, (2012). Solución numérica de problemas de oxidación mediante el método de simulación por redes, PhD Thesis, Technical University of Cartagena, Spain.
- ❖ Sanjuán Barbudo, M.A. (2002) Cálculo del período de iniciación de la corrosión de la armadura del hormigón, PhD Thesis, Universidad Complutense De Madrid, Spain
- ❖ Fenaux, M. (2013) Modelling of chloride transport in non-saturated concrete: from microscale to macroscale, PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, Spain
- ❖ Liu, T. and Weyers, R. W. (1997) Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. Cement Concr. Res. Vol. 28. Issue 3. pp. 365-379.
- ❖ González-Fernández, C.F. and Alhama, F. (2001) Heat Transfer and the

Network Simulation Method. J. Horno (ed.) Transworld Research Network, Trivandrum

❖ NgSpice software [on line]. (citado julio 2017) Disponible en: <http://ngspice.sourceforge.net/index.html>

❖ Revista hidrodemolición . [on line]. (Citado junio 2017) Imagen estructura de hormigón en ambiente marino.

Disponible en <http://blog.hidrodemolicion.com/2013/02/corrosion-del-hormigon-en-ambiente.html>

❖ RB Conspro-Productos para la construcción. [on line]. (Citado julio 2017). Disponible en <https://rbconspro.wordpress.com/tag/corrosion-acero-de-refuerzo/>

❖ Revista Master Construcc. [on line]. (Citado junio 2017) Representación gráfica de los factores que intervienen en el proceso de absorción capilar. Estudio de la absorción capilar de hormigones

Disponible en:

<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/download/1290/1420>

❖ JF Sánchez-Pérez, M Conesa and F Alhama European Journal Physics 37 (2016).