

ENSAYOS INDIRECTOS DE DURABILIDAD PARA ESTIMACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DEL HORMIGÓN RESPECTO A LA PENETRACIÓN DE CLORUROS

Indirect durability tests for estimation of the service life of concrete due to chloride penetration

Idoya Sanz Ruiz^a, Rosario Martínez Lebrusant^b, Pedro López Sánchez^c

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Directora del Área de Ensayos Estructurales de INTEMAC (isanz@intemac.es)

^b Dra. en Ciencias Químicas Jefa del Área de Certificación y Normalización de IECA (charoml@ieca.es)

^c Dr. en Ciencias Químicas. Director del Laboratorio Central de INTEMAC (plopez@intemac.es)

RESUMEN

Para el desarrollo del presente trabajo se han caracterizado hormigones fabricados con dosificaciones compatibles con las prescritas para clases de exposición XS. Sobre estos se han determinado experimentalmente diversos parámetros comúnmente asociados a la durabilidad del hormigón, para evaluar la relación existente entre estos y el coeficiente de difusión de cloruros, según EN 12390-11.

Los resultados obtenidos permiten verificar el buen comportamiento de los cementos con adición de escorias granuladas de alto horno y con cenizas volantes en relación a la mejora de la resistencia del hormigón frente a la penetración de cloruros y la relación existente entre esta y la resistividad.

ABSTRACT

For this study, concretes manufactured with dosages compatible with those prescribed for XS exposure classes have been characterized. On these, various parameters commonly associated with the durability of concrete have been experimentally determined, to evaluate the relationship between them and the diffusion coefficient of chlorides, according to EN 12390-11

The results obtained allow us to verify the good behaviour of cements with addition of granulated blast furnace slags and fly ashes in relation to the improvement of the resistance of concrete against chloride penetration and its relationship with the electrical resistivity.

PALABRAS CLAVE: hormigón, porosidad, difusión de cloruros, resistividad, durabilidad

KEYWORDS: concrete, porosity, chloride diffusion, resistivity, durability

1. Introducción

En Europa el diseño de la durabilidad de nuevas estructuras de hormigón armado está basado en un enfoque prescriptivo. En la norma UNE-EN 206 [1] están definidas las clases de exposición ambiental que pueden condicionar la durabilidad de las estructuras de hormigón. Para cada una de esas clases están prescritos unos requisitos como son la clase de resistencia, el contenido mínimo de cemento, la máxima relación agua/cemento,

el espesor de recubrimiento, el tipo de cemento más adecuado, etc.

En la actualidad se está implementando un nuevo enfoque, más prestacional, basado en la definición de Clases de Resistencia a la Exposición (ERC), por su acrónimo en inglés. Este enfoque se basa en definir una serie de categorías mediante un ensayo de prestaciones que aporte información del comportamiento durable del hormigón frente a cada medio agresivo. El proyecto de la norma europea prEN 206-1 [2] (en elaboración) define los parámetros

de vida útil asociados a cada ERC. En el caso de las clases de exposición que ocasionan corrosión por cloruros (XS y XD) el ensayo prestacional que se ha propuesto como indicador de durabilidad es el coeficiente de difusión de cloruros, calculado conforme a la norma UNE-EN 12390-11 [3], y las clases de resistencia a la exposición (ERC) serían las indicadas en la Tabla 1. Los valores del coeficiente de difusión [10^{-12} m²/s] están calculados para un factor de edad (α) de 0,5 a 90 días:

Tabla 1. Coeficiente de difusión máximo y recubrimientos mínimos aplicables (mm) de cada clase ERC definida para corrosión por cloruros de origen marino

ERC	XS1		XS2		XS3	
	Vida útil prevista (años)					
	50	100	50	100	50	100
XRDS 0,5	20	20	20	30	30	40
XRDS 1	20	25	25	35	35	45
XRDS 1,5	25	30	30	40	40	50
XRDS 2	25	30	35	45	45	55
XRDS 3	30	35	40	50	55	65
XRDS 4	30	40	50	60	60	80
XRDS 5	35	45	60	70	70	-
XRDS 6	40	50	65	80	-	-
XRDS 8	45	55	75	-	-	-
XRDS 10	50	65	80	-	-	-

Para el desarrollo de este trabajo se han caracterizado 9 tipos de hormigones fabricados con dosificaciones compatibles con las prescritas para clases de exposición XS. Sobre estos se ha determinado experimentalmente la resistencia a la penetración de cloruros definida en la norma UNE-EN 12390-11, para determinar cómo resultarían calificados respecto a las ERC indicadas en la Tabla 1, y para evaluar la relación existente entre este indicador con otros parámetros comúnmente asociados a la durabilidad del hormigón.

2. Procedimiento experimental

2.1 Materiales

En este estudio se han empleado seis tipos de cemento comunes de entre los definidos en la norma europea UNE-EN 197-1 [4].

El diseño de los hormigones se llevó a cabo en distintos laboratorios empleando dosificaciones compatibles con las prescritas para las respectivas clases de exposición XS, pero con las fórmulas de trabajo reales que estaban siendo empleadas para suministrar hormigón de estas características desde cinco distintas centrales de hormigón preparado de la geografía española, con los materiales componentes propios de su producción habitual.

Al tratarse de hormigones reales en su condición habitual de suministro, no se adoptaron los mínimos contenidos de cemento y máximas relaciones a/c que se admiten para las correspondientes clases de exposición en ambiente marino (XS1, XS2 y XS3), sino los parámetros establecidos por cada suministrador, siempre comprendidos entre los valores admisibles dentro de los rangos definidos para cada respectiva clase de exposición.

La procedencia de los materiales constituyentes de hormigón, designados correlativamente desde “1” a “5”, correspondía a distintas zonas geográficas, por lo que los áridos y los cementos empleados en cada zona de suministro eran diferentes.

En la Tabla 2 se exponen los parámetros de dosificación empleados en cada suministro, todos ellos conformes con los criterios prescriptivos exigidos para esas clases de exposición.

2.2 Métodos

Para la caracterización de las prestaciones de cada tipo de hormigón se realizaron dos amasadas en fechas distintas y en las condiciones habituales de suministro de cada planta. Para los ensayos de resistividad, porosidad y penetración de agua, seis probetas de 15x15 cm para ensayos mecánicos y dos de 10x20 para los ensayos de difusión de cloruros.

Tabla 2. Dosificación de los hormigones y tipos de cemento empleados

Hormigón	Clase de exposición	Contenido de cemento (kg/m ³)	Relación agua/cemento	Tipo de cemento	Zona geográfica de suministro
1-C30/37	XS1	300	0,50	CEM I 42,5 R-SR5	3
2-C30/37	XS1	310	0,50	CEM II/B-M (V-L) 42,5 R	2
3-C35/45	XS3	350	0,44	III/A 42,5 N/SRC	4
4-C30/37	XS1	300	0,50	III/A 42,5 N/SRC	4
5-C35/45	XS3	375	0,44	III/A 42,5 N/SRC	2
6-C35/45	XS3	375	0,45	CEM IV/A (P) 42,5 R-SR	3
7-C30/37	XS1	325	0,50	CEM IV/A (P) 42,5 R-SR	5
8-C35/45	XS3	360	0,43	CEM IV/A (P) 42,5 R-SR	5
9-C30/37	XS1	340	0,44	CEM IV/A (V) 42,5 R-SR	1
10-C35/45	XS3	370	0,42	CEM IV/A (V) 42,5 R-SR	1
11-C35/45	XS3	350	0,44	CEM V/A (S-V) 32,5 N	4
12-C30/37	XS1	325	0,48	CEM V/A (S-V) 32,5 N	2

Del hormigón fresco de ambas amasadas se determinó la consistencia, según UNE-EN 12350-2 [6] y la densidad, según UNE-EN 12350-6 [7].

2.2.1 Caracterización físico-mecánica de hormigones

Sobre las probetas, curadas y conservadas según UNE-EN 12390-2, se ha determinado la resistencia a compresión a 7 y 28 días, según UNE-EN 12390-3 [8].

Una vez alcanzada la edad de 28 días se ha determinado la porosidad, según UNE 83980 [9] y la profundidad de penetración de agua a presión, según UNE-EN 12390-8 [10]

2.2.2 Determinación de la resistividad eléctrica

Las probetas de los doce tipos de hormigón fabricadas para esta determinación eran cilíndricas de 15x30 cm. Una vez conservadas en balsa de curado hasta los 120 días de edad se determinó la resistividad según UNE-EN 12390-19 [11], sobre dos probetas de cada tipo de hormigón.

Las medidas fueron realizadas a una temperatura de 20 ± 2 °C.

Para la realización del ensayo se empleó el método de referencia (volumétrico, véase la figura 1).

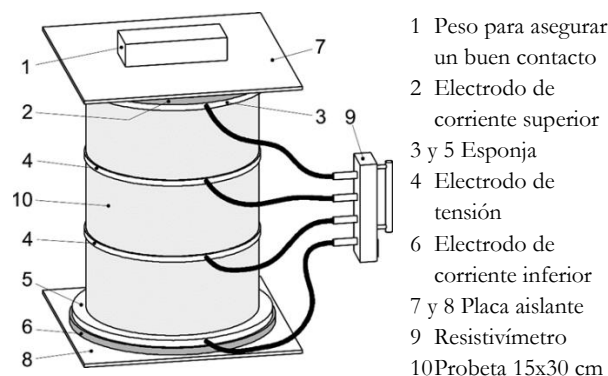


Figura 1. Croquis de equipo de medida de la resistividad por el método volumétrico

Se colocó la esponja empapada en agua potable sobre el electrodo de corriente inferior, que a su vez estaba apoyado sobre una placa de plástico nivelada horizontalmente.

Seguidamente la probeta se posicionó centrada sobre la esponja y los dos electrodos de tensión (abrazaderas metálicas ajustables) se introdujeron por la parte superior. Al tratarse de probetas de 15x30 cm la distancia de las abrazaderas a la cara inferior, a la superior y entre ellas fue de 10 cm.

Una vez fijados ambos electrodos de tensión se colocó la segunda esponja y el electrodo en la parte superior de la probeta.

Por último, se posicionó una placa de plástico sobre el electrodo de corriente superior y sobre este una masa metálica de unos 3 kg para garantizar un contacto homogéneo del electrodo

de corriente con la superficie superior de la probeta.

Se hizo pasar una corriente eléctrica por los electrodos de corriente situados en la parte superior e inferior de la probeta, de una magnitud suficiente para medir en el rango de valores de resistividad de la probeta. Cuando la corriente se había estabilizado, se registraron simultáneamente la tensión entre los dos electrodos centrales (en voltios) y la intensidad de corriente (en amperios).

El valor de resistividad volumétrica (ρ_v) se calcula a partir de la resistencia total del hormigón (R_e , expresado en Ohm como el cociente de la diferencia de potencial entre la corriente), conforme a la Ec. 1.

Ec. 1. Cálculo de la resistividad volumétrica

$$\rho_v = R_e \times F_{gv} \quad \text{Ec. 1}$$

donde F_{gv} es el factor de forma de la probeta=0,177 (superficie de la sección circular, en m², de la probeta, dividida por la distancia, en m, entre los electrodos de tensión, en m).

Se obtuvieron tres series de medidas para cada probeta y se efectuó el promedio de los tres valores.

2.2.3 Determinación del coeficiente de difusión

Las probetas de los doce tipos de hormigón fabricadas para esta determinación eran cilíndricas de 10x20 cm.

Una vez alcanzada la edad de 28 días de curado en cámara húmeda estándar se seleccionaron dos probetas de cada tipo de hormigón para la realización del ensayo.

De acuerdo con lo indicado en la norma UNE-EN 12390-11, cada una de estas probetas fue tallada transversalmente a su dimensión mayor para subdividirla en dos subprobetas cilíndricas, una para la realización del perfil de penetración de cloruros, después de someterla a la entrada unidireccional de este anión y la otra (patrón) para la determinación del contenido de cloruros aportado por los materiales componentes.

Las subprobetas para la realización del perfil fueron introducidas en un contenedor estanco en el que se conectó una bomba de vacío hasta una presión comprendida entre 1 y 5 kPa. Tras tres horas manteniendo esas condiciones, se abrió la espita superior del contenedor para permitir la entrada gradual de agua destilada hasta conseguir que todas las probetas quedaran completamente sumergidas. Se mantuvieron esas condiciones de vacío en el sistema durante una hora adicional.

Antes de haber transcurrido 24 horas desde su saturación, las “subprobetas para el perfil” fueron revestidas por todas sus caras con una pintura epoxi impermeabilizante apta para superficies húmedas, excepto por la superficie circular correspondiente a la cara tallada que quedó sin revestir.

El objeto de este sellado de todas las superficies excepto la que va a quedar expuesta a la penetración de cloruros es que este proceso se lleve a cabo con un mecanismo de difusión unidireccional puro, y no por uno combinado de difusión y otros procesos de transporte, como la absorción capilar.

Seguidamente las “subprobetas para el perfil” fueron sumergidas durante 18 horas en una disolución saturada de hidróxido cálcico, e inmediatamente después la exposición a cloruros se efectuó por inmersión completa de la probeta en un recipiente con la disolución acuosa de NaCl, al 3% en peso.

Cada subprobeta se mantuvo en esas condiciones de exposición por inmersión durante 90 días, en el recipiente situado en una sala regulada a una temperatura de 20 ± 2 °C.

Después de retirar la “subprobeta para el perfil” del recipiente de inmersión se procedió a su desbaste por pulido superficial sobre una zona concéntrica de la cara no revestida, hasta obtener el material en polvo correspondiente a ocho capas paralelas correspondientes a profundidades adyacentes.

Cada una de las ocho submuestras resultantes ha sido compuesta por recolección

del polvo obtenido en cada etapa de desbaste correspondiente al avance de perforación en capas independientes de, como mínimo, 1,0 mm de profundidad.

De igual modo, se procedió al desbaste por pulido superficial de una zona concéntrica de la cara tallada no revestida de la subprobeta “patrón”, hasta obtener el material en polvo correspondiente a la capa más superficial, de 1,0 mm de profundidad.

La determinación de la concentración de cloruros solubles en ácido de cada una de las submuestras en polvo (sobre las ocho de la “subprobeta para el perfil” más la adicional de la “subprobeta patrón”), correspondientes a las capas de distintas profundidades de cada subprobeta, ha sido efectuada mediante el método A de la norma UNE-EN 14629 [12] (método de Volhard).

El cálculo del contenido de cloruros en la superficie expuesta del hormigón (C_s , en %) y el coeficiente de difusión en estado no estacionario (D_{nss} , en $m^2 \cdot s^{-1}$) fue efectuado a partir de todos los restantes valores de cloruros mediante su ajuste por mínimos cuadrados a la Ec. 2.

Ec. 2. Ajuste del contenido externo de cloruros y del coeficiente de difusión

$$C_x = C_i + (C_s - C_i) \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{\sqrt{2D_{nss}t}} \right] \right) \quad \text{Ec. 2}$$

donde C_x es el contenido de cloruros en % en peso de hormigón, a la profundidad x (en

metros) y al cabo de un tiempo t (en segundos); C_i es el contenido inicial de cloruros del hormigón de la subprobeta “patrón” y erf es la función de error.

Para determinar el coeficiente de difusión se descartó el contenido de cloruros de la capa más superficial de la “subprobeta para el perfil”. El análisis de regresión se efectuó con los contenidos obtenidos a partir de la submuestra en polvo correspondiente a la 2ª profundidad de desbaste, pero también se descartaron los valores obtenidos a mayores profundidades cuyo contenido de cloruros ya era próximo al de la subprobeta “patrón”

La idoneidad del ajuste del modelo matemático aplicado a la población de datos disponible se evaluó a partir del coeficiente de correlación. Se consideró como válido un valor de R^2 superior a 0,950, salvo en los casos en los que el gradiente de concentración presentaba una pendiente muy horizontal, en cuyo caso se consideraron válidos los valores superiores a 0,90.

3. Resultados obtenidos

3.1 Resultados de caracterización

En la Tabla 3, se exponen los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización físico-mecánica de los hormigones objeto de estudio.

Tabla 3. Resultados de caracterización de los doce tipos de hormigón analizados

Hormigón	Densidad en fresco (kg/m³)	Consistencia (asiento de cono, mm)	Resistencia a compresión (MPa)		Porosidad accesible al agua (%)	Penetración de agua a presión (valor medio, mm)	
			7 días	28 días		Penetración media	Penetración máxima
1-C30/37	2415	160	52,1	59,3	10,4	13	19
2-C30/37	2355	155	41,3	50,0	11,4	15	25
3-C35/45	2400	170	59,3	73,2	10,5	12	20
4-C30/37	2325	170	42,9	57,4	11,7	9	15
5-C35/45	2405	150	52,6	66,2	10,5	9	20
6-C35/45	2395	190	58,4	75,9	12,4	8	15
7-C30/37	2360	140	31,2	38,3	12,3	13	27
8-C35/45	2350	130	33,2	42,4	11,3	11	23
9-C30/37	2400	120	41,2	46,3	11,1	11	21
10-C35/45	2400	150	44,2	50,9	10,0	8	20
11-C35/45	2370	170	47,5	63,7	10,2	15	16
12-C30/37	2390	160	37,5	53,4	10,7	12	23

3.2 Resultados de resistividad

En la Tabla 4 se exponen los resultados medios obtenidos en los ensayos de resistividad volumétrica, efectuados una vez transcurridos cuatro meses desde la fabricación de las probetas.

Tabla 4. Resultados de resistividad

Nº	Cont. cemento (kg/m³)	a/c	CEM	Resistividad volumétrica ($\Omega \cdot m$)
1	300	0,50	I	64
2	310	0,50	II/B-M (V-L)	182
3	350	0,44	III/A	384
4	300	0,50	III/A	345
5	375	0,44	III/A	196
6	375	0,45	IV/A (P)	81
7	325	0,50	IV/A (P)	102
8	360	0,43	IV/A (P)	131
9	340	0,44	IV/A (V)	303
10	370	0,42	IV/A (V)	200
11	350	0,44	V/A (S-V)	655
12	325	0,48	V/A (S-V)	474

3.3 Resultados de perfil de cloruros y coeficiente de difusión

En la Tabla 5 se exponen los resultados obtenidos en los perfiles de concentración de cloruros solubles en ácido de cada una de las submuestras en polvo (sobre las ocho de la “subprobeta para el perfil” más la adicional de la “subprobeta patrón”), correspondientes a las capas de distintas profundidades de cada subprobeta.

También se indica el coeficiente de correlación de los valores de cada perfil de concentración y los contenidos de cloruros en la superficie expuesta del hormigón (Cs) obtenidos por ajuste a la Ec. 2, de igual modo que los resultados del coeficiente de difusión en estado no estacionario (Dnss) de cada tipo de hormigón que se exponen en la Tabla 6.

Tabla 5. Resultados del perfil de cloruros y contenido exterior de cloruros, en peso de hormigón

Profundidad (mm)	Tipo de hormigón y contenido de cloruros (%)											
	1-	2-	3-	4-	5-	6-	7-	8-	9-	10-	11-	12-
	C30/ 37	C30/ 37	C35/ 45	C30/ 37	C35/ 45	C35/ 45	C30/ 37	C35/ 45	C30/ 37	C35/ 45	C35/ 45	C30/ 37
0-1 Patrón Ci	0,022	0,009	0,009	0,022	0,013	0,009	0,009	0,022	0,027	0,022	0,004	0,009
0-1	0,204	0,253	0,253	0,200	0,253	0,355	0,266	0,315	0,337	0,275	0,208	0,235
1-2	0,222	0,257	0,244	0,195	0,262	0,359	0,284	0,346	0,340	0,275	0,253	0,226
2-3	0,217	0,222	0,191	0,164	0,222	0,337	0,279	0,328	0,279	0,240	0,204	0,204
3-4	0,217	0,204	0,151	0,166	0,199	0,301	0,275	0,306	0,230	0,213	0,129	0,164
4-5	0,200	0,173	0,111	0,106	0,164	0,279	0,245	0,266	0,191	0,180	0,075	0,106
5-6	0,191	0,146	0,089	0,084	0,133	0,253	0,239	0,230	0,142	0,160	0,044	0,084
6-7	0,168	0,129	0,062	0,066	0,102	0,226	0,208	0,195	0,120	0,130	0,022	0,066
7-8	0,155	0,111	0,044	0,04	0,089	0,208	0,186	0,168	0,093	0,098	0,013	0,044
R ²	0,928	0,959	0,970	0,992	0,990	0,995	0,940	0,989	0,961	0,982	0,965	0,969
Cs	0,255	0,314	0,349	0,277	0,341	0,417	0,331	0,432	0,424	0,350	0,455	0,338

Tabla 6. Resultados de coeficiente de difusión

Nº	Cont. cemento (kg/m³)	a/c	CEM	Coeficiente de difusión D _{nss} (m²/s) .10 ⁻¹²
1	300	0,50	I	14,9
2	310	0,50	II/B-M(V-L)	4,23
3	350	0,44	III/A	1,54
4	300	0,50	III/A	1,61
5	375	0,44	III/A	2,80
6	375	0,45	IV/A (P)	8,18
7	325	0,50	IV/A (P)	13,3
8	360	0,43	IV/A (P)	5,14
9	340	0,44	IV/A (V)	1,88
10	370	0,42	IV/A (V)	3,28
11	350	0,44	V/A (S-V)	0,822
12	325	0,48	V/A (S-V)	1,65

4. Discusión

El proyecto de la norma europea prEN 206-1 (en elaboración) define los parámetros de vida útil asociados a las Clases de Resistencia a la Exposición (ERC), indicando los recubrimientos mínimos aplicables a cada una. En el caso de las clases de exposición que ocasionan corrosión por cloruros (XS y XD) el ensayo prestacional que se ha propuesto como indicador de durabilidad es el coeficiente de difusión de cloruros, calculado conforme a la norma UNE-EN 12390-11.

Para comparar los recubrimientos mínimos aplicables derivados de este enfoque prestacional [13] en el diseño de durabilidad recogidos en el apartado 6 de la norma EN 1992-1-1 (EC-2) [14], respecto a los del artículo 44.2.1.1 del Código Estructural [15], se han determinado los coeficientes de difusión de doce tipos de hormigón con dosificaciones compatibles con las prescritas para las respectivas clases de exposición XS.

Estos hormigones fueron fabricados en laboratorio con las fórmulas de trabajo reales que estaban siendo empleadas para suministrar hormigón de estas características desde distintas centrales de hormigón preparado de la geografía española, con los materiales componentes propios de su producción habitual.

Respecto a los recubrimientos aplicables en función de cada enfoque, en las Tablas 7 y 8 se exponen comparativamente los recubrimientos mínimos que serían exigibles a los hormigones objeto de estudio para las clases XS1 y XS3, en cada uno de los dos casos indicados anteriormente. Para el diseño de durabilidad conforme al apartado 6 de la norma EN 1992-1-1 (EC-2) se han considerado las clases ERP indicadas para el supuesto descrito en la Tabla 1.

Tabla 7. Recubrimientos nominales mínimos para hormigón armado y vida útil de 50 años en clase XS1

Hormigón	Clase de exposición	Cont. cemento (kg/m ³)	a/c	CEM	Coeficiente de difusión D _{nss} (m ² /s) · 10 ⁻¹²	Clase ERP	Recubrimiento nominal (mm)	
							EC-2 Art. 6	Código Estructural
1-C30/37	XS1	300	0,50	I	14,9	No apta	-	40
2-C30/37	XS1	310	0,50	II/B-M (V-L)	4,23	XRDS 5	35	40
4-C30/37	XS1	300	0,50	III/A	1,61	XRDS 2	25	25
7-C30/37	XS1	325	0,50	IV/A (P)	13,3	No apta	-	25
9-C30/37	XS1	340	0,44	IV/A (V)	1,88	XRDS 2	25	25
12-C30/37	XS1	325	0,48	V/A (S-V)	1,65	XRDS 2	25	40

Tabla 8. Recubrimientos nominales mínimos para hormigón armado y vida útil de 50 años en clase XS3

Hormigón	Clase de exposición	Cont. cemento (kg/m ³)	a/c	CEM	Coeficiente de difusión D _{nss} (m ² /s) · 10 ⁻¹²	Clase ERP	Recubrimiento nominal (mm)	
							EC-2 Art. 6	Código Estructural
3-C35/45	XS3	350	0,44	III/A	1,54	XRDS 2	45	45
5-C35/45	XS3	375	0,44	III/A	2,80	XRDS 3	55	45
6-C35/45	XS3	375	0,45	IV/A (P)	8,18	XRDS 10	-	45
8-C35/45	XS3	360	0,43	IV/A (P)	5,14	XRDS 6	40	45
10-C35/45	XS3	370	0,42	IV/A (V)	3,28	XRDS 4	60	45
11-C35/45	XS3	350	0,44	V/A (S-V)	0,822	XRDS 1	35	-

De los datos de la tabla 7 se deduce que para la clase de exposición XS1 los recubrimientos nominales mínimos definidos en el apartado 6 de la norma EN 1992-1-1 (EC-2) para elementos de hormigón armado con una vida útil de 50 años son iguales o inferiores a los especificados en el Código Estructural. En cambio, para la clase de exposición XS3 en la Tabla 8 se observa que este comportamiento se invierte de forma significativa, dado que para la mayoría de hormigones analizados (en todos menos uno) el enfoque prestacional de la norma EN 1992-1-1 (EC-2) conduciría a recubrimientos iguales o superiores a los del Código Estructural.

En relación a la influencia de los parámetros de diseño de los hormigones comúnmente asociados a la penetración de cloruros, como la relación a/c [16], la finura de molido del cemento [17] y otros, se ha efectuado un análisis comparativo de los coeficientes de difusión determinados experimentalmente en los doce casos analizados del que se deduce que ha resultado mucho más limitante el tipo de cemento empleado (tipo y contenido de adición)

que la relación a/c. En concreto, en la Figura 2 se representan los rangos en los que oscilan los coeficientes de difusión determinados experimentalmente en función del tipo de cemento empleado.

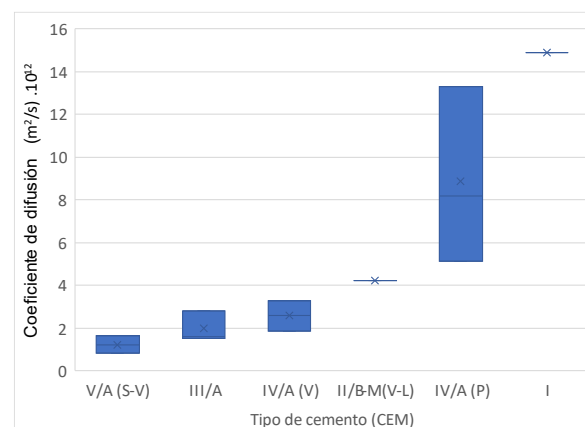


Figura 2. Coeficientes de difusión según el tipo de cemento

Como era de esperar, el hormigón con cemento CEM I-SR, sin adición y bajo contenido de aluminato tricálcico [17] es el que presenta una menor resistencia a la penetración de cloruros, habiendo obtenido para este hormigón el coeficiente de difusión claramente superior al resto. El comportamiento del

hormigón con cementos con adición de puzolanas es mejor en lo que a penetración de cloruros se refiere que el de los CEM I, y a su vez, los hormigones fabricados con cementos con cenizas volantes y/o escorias manifiestan un mejor comportamiento que los anteriores.

Las correlaciones estudiadas de los coeficientes de difusión con las características tradicionalmente vinculadas a la calidad del hormigón (contenido de cemento, relación a/c, resistencia a compresión, porosidad accesible al agua y penetración de agua a presión) no han aportado resultados que se puedan calificar como estadísticamente representativos.

Sin embargo, los valores del coeficiente de difusión de cloruros y los de resistividad eléctrica [18] [19] sí se ajustan a una ecuación exponencial, según se observa en la Figura 3.

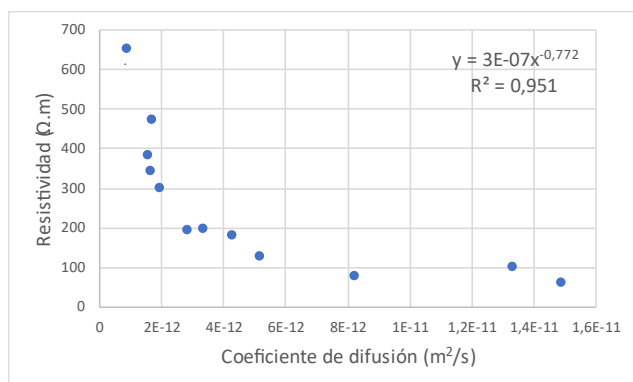


Figura 3. Correlación entre el coeficiente de difusión volumétrico y la resistividad eléctrica

Referencias

[1] UNE. UNE-EN 206:2013+A2:2021 Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad (2021)

[2] CEN. prEN 206-1 Hormigón. Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad. Parte 1: Desempeño, requisitos, control de producción en fábrica y criterios de evaluación para valores individuales (en elaboración)

[3] UNE. UNE-EN 12390-11:2019 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 11: Determinación de la resistencia a los cloruros del hormigón, difusión unidireccional (2019)

5. Conclusiones

Seguidamente se indican las conclusiones y consideraciones finales del estudio:

- Para la clase de exposición XS1 los recubrimientos nominales aplicables a los hormigones analizados empleando el coeficiente de difusión como indicador de durabilidad son iguales o menos restrictivos que los del Código Estructural.

- Los hormigones fabricados con cementos con adición de cenizas volantes y/o escorias granuladas de alto horno han manifestado mejores prestaciones, en relación a la resistencia a la penetración de cloruros. A este respecto, la influencia del tipo de adición ha resultado más determinante que la relación a/c.

- Para los doce hormigones diseñados con una dosificación compatible con las exigidas para clases de exposición XS1 o XS3 se ha observado que existe una correlación entre los valores del coeficiente de difusión de cloruros y los de resistividad, que se ajustan a una ecuación exponencial del tipo: $\rho_v = 3 \cdot 10^{-7} \cdot D_{ns}^{0,772}$

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

[5] UNE. UNE-EN 12390-2:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 2: Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia (2020)

[6] UNE. UNE-EN 12350-2:2020 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento (2020)

[7] UNE. UNE-EN 12350-6:2020 Ensayos de hormigón fresco. Parte 6: Densidad (2020)

- [8] UNE. UNE-EN 12390-3:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas (2020)
- [9] UNE. UNE 83980:2014 Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua, la densidad y la porosidad accesible al agua del hormigón (2014)
- [10] UNE. UNE-EN 12390-8:2020 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión (2020)
- [11] UNE. UNE-EN 12390-19:2023 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 19: Determinación de la resistividad eléctrica (2023)
- [12] UNE. UNE-EN 14629:2007 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del contenido en cloruros en el hormigón (2007)
- [13] M.R. Geiker, M.A.N. Hendriks, B. Elsener. Durability-based design: the European perspective. Sustainable and resilient infrastructure. Vol. 8, nº 2 (2023) 169-184
- [14] CEN. EN 1992-1-1:2023 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales- Reglas para edificación, puentes y estructuras de ingeniería civil
- [15] MITMA. Código Estructural. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio (2021)
- [16] J.A. Fiallos-Lezcano, M.M. Rodríguez-Veliz, J.C. Guerra-Mera. Incidencia de la relación agua/cemento en la resistividad del hormigón. Pol. Con. (Ed. 85) Vol. 9, No 2. (2024) 710-724
- [17] D.V. Ribeiro, S.A. Pinto, N. Amorim, J.S. Andrade, I.H.L. Santos, S.L. Marques, M.J.S. França. Effects of binders characteristics and concrete dosing parameters on the chloride diffusion coefficient. CONPAT2021 Brasil (2021) 2156-2172
- [18] Y. Liu, F. Presuel-Moreno, M. Paredes. Determination of chloride diffusion coefficients in concrete by electrical resistivity method. ACI Materials Journal. V 112, nº 5 (2015) 631-640
- [19] C. Andrade, R. D'Andrea. La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. Revista ALCONPAT. Vol. 1, nº 2 (2011) 93-101