

LA DURABILIDAD EN LAS ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO DESDE LA PERSPECTIVA DE LA NORMA ESPAÑOLA PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO

Francisco Muñoz Salinas¹, Carlos Javier Mendoza Escobedo².

RESUMEN

La durabilidad de las estructuras de concreto reforzado, es uno de los aspectos más importantes que actualmente el Eurocódigo considera como prioridad en la estimación de la vida útil de las edificaciones. Tan es así que existen tres estados límites: Estado Límite Último, Estado Límite de Servicio, Estado Límite de Durabilidad, que se consideran para comprobar la funcionalidad estructural de las edificaciones. El Estado Límite de Durabilidad, se encarga de corroborar la capacidad que tienen las estructuras de soportar durante su vida útil, las condiciones físicas y químicas a las que están expuestas. En este documento se detalla la metodología utilizada en España en lo que respecta a este Estado Límite, y se compara con lo que se hace en México.

Palabras clave: Vida útil, durabilidad.

ABSTRACT

The durability of reinforced concrete structures is one of the more important aspects that is currently considered by Eurocode to be a priority in the estimation of the service life of buildings. It is so much so that three states of limitations now exist: Ultimate Limit State, Service Limit State, and Durability Limit State which are taken into consideration to test the structural functionality of buildings. The Durability Limit State is used to corroborate the capacity that a structure can support during its service life, and the physical and chemical conditions to which they are exposed. This document details the methodology used in Spain with respect to the Durability Limit State, and is compares it with what is being done in Mexico.

Key words: Service life, durability limit.

RESUMO

A durabilidade das estruturas de concreto reforçado é um dos aspectos mais importantes que atualmente o Euro código considera como prioridade na estimativa de vida útil das edificações. Tanto é assim que existem três estados limites: *Estado Limite Último*, *Estado Limite de Serviço*, *Estado Limite de Durabilidade*, que são considerados para comprovar a funcionalidade estrutural das edificações. O Estado Limite de Durabilidade é responsável por corroborar a capacidade que têm as estruturas de suportar, durante sua vida útil, as condições físicas e químicas a que são expostas. Neste documento detalha-se a metodologia utilizada na Espanha em relação a este Estado Limite, comparando-o com o que é feito no México.

Palavra chave: Vida útil, durabilidade.

INTRODUCCIÓN

La durabilidad es la capacidad que tienen las estructuras de concreto reforzado de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su material por diferentes efectos de cargas y sollicitaciones, las cuales están previstas en su diseño estructural. El diseño estructural de un edificio de concreto reforzado, debe estipular las medidas adecuadas para que éste alcance la vida útil establecida en

¹Fernando Muñoz Salinas trabaja en el de Arquitectura y Tecnología I, ETSAB, UPC, Barcelona, España.

²Carlos Javier Mendoza Escobedo es Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM.

el proyecto, teniendo en cuenta las condiciones ambientales, climatológicas y el género de edificio a construir.

Todos los agentes agresivos a los cuales estará expuesto el edificio deberán de identificarse. Las medidas preventivas indicadas en la etapa de proyecto suelen ser muy eficaces y reducen posibles gastos posteriores.

1. VIDA ÚTIL DE LA ESTRUCTURA³

En la actualidad, una de las prioridades en Europa y en muchas otras regiones, incluido México, corresponde a la seguridad de las personas, los bienes inmuebles y la protección del medio ambiente. Por ello, las nuevas normativas buscan que las edificaciones sean idóneas para su uso durante su vida útil. Para que eso se alcance, las estructuras deben cumplir con los siguientes requisitos:

a) Los edificios deben de ser seguros y funcionales esto quiere decir, que las estructuras deben soportar las acciones mecánicas, físicas y químicas a las que puedan estar sometidas durante su construcción y su vida útil.

b) Deben de ser capaces de soportar las acciones del fuego, reduciendo al mínimo el riesgo de que los usuarios de las edificaciones sufran daños derivados de un posible incendio accidental.

c) Las edificaciones deben cumplir mínimos de higiene, salud y protección del medio ambiente, esto consiste en reducir al mínimo el riesgo de que se provoquen impactos negativos sobre el medio ambiente como consecuencia de la ejecución de la obra, su uso y su demolición.

Para que estos requisitos se cumplan, es importante definir la vida útil que tendrá la edificación en el momento del diseño del proyecto; ésta no podrá ser inferior a lo especificado por las normativas vigentes en el lugar donde se vaya a desarrollar el proyecto. En México las *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal* (NTCC, RCDF) establecen que las estructuras para edificios deben tener una vida útil de 50 años.

Tabla 1. Vida útil nominal de los diferentes tipos de estructuras según la normativa Española del Concreto Estructural.

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

³ Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la "Instrucción de hormigón estructural (EHE-08).

2. DURABILIDAD

La durabilidad en la normativa española es uno dentro de los tres estados límites que hay que cumplir para que las estructuras sean seguras y funcionales y sean capaces de soportar las acciones externas e internas a las que se verán expuesta y sometidas. Cabe decir que los tres Estados límites que se deben comprobar, y que una estructura no deberá exceder son:

- Estado Límites Últimos.
- Estado Límite de Servicio.
- Estado Límite de Durabilidad: $tL \geq td$.

Donde:

tL: Tiempo necesario para que el agente agresivo produzca un ataque o degradación significativa.

td: Valor de cálculo de la vida útil afectado por el correspondiente coeficiente de seguridad.

2.1. Grado de agresividad ambiental

En el proyecto se deberá definir el grado de agresividad ambiental al que estará expuesta la estructura, definiendo para cada elemento que la configura una clase de exposición y haciendo referencia a los procesos de corrosión que se pueden presentar en el refuerzo. En la designación del tipo de ambiente se reflejarán todas las clases de agentes agresivos a los que estarán expuestas las estructuras.

La definición del tipo de ambiente para cada conjunto de elementos estructurales repercutirá en:

- La tipificación del concreto.

Tabla 2. Clasificación de la agresividad química.

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición		
		Qa	Qb	Qc
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	Valor del pH, según UNE-EN 13,577	6,5 – 5,5	5,5 – 4,5	<4,5
	CO ₂ AGRESIVO (mg CO ₂ /l) según UNE 83,954	15 -40	40-100	>100
	IÓN AMONIO (mg NH ₄ ⁺ /l), según UNE 83.954	15–30	30–60	>60
	IÓN MAGNESIO (mg Mg ²⁺ /l), según UNE 83.955	300–1000	1000–3000	>3000
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ /l), según UNE 83.956	200 – 600	600 – 3000	>3000
	RESIDUO SECO (mg / l), según UNE 83.957	75–150	50 – 75	<50
Suelo	GRADO DE ACIDEZ BAUMANN-GULLY (ml/kg), según UNE 83.962	>200	(*)	(*)
	IÓN SULFATO (mg SO ₄ ²⁻ / kg de suelo seco), según UNE 83.963	2000–3000	3000–12000	> 12000

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

Tabla 3. Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
No agresiva.		I	Ninguno	-Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. -Elementos de concreto en masa.	-Elementos estructurales de edificios, incluidos los elementos, que estén protegidos de la intemperie.
Normal	Humedad alta.	Ila	Corrosión de origen diferente de los cloruros.	-Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (> 65%) o a condensaciones. - Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - Elementos enterrados o sumergidos.	-Elementos estructurales en sótanos no ventilados. -Cimentaciones. -Estribos, pilas y tableros de puentes en zonas, sin impermeabilizar con precipitación media anual superior a 600 mm. -Tableros de puentes impermeabilizados, en zonas con sales de deshielo y precipitación media anual superior a 600 mm. -Elementos de concreto que se encuentren a la intemperie o en las cubiertas de edificios en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. - Colados en cámara sanitaria, o en interiores en cocinas y baños, o en cubierta no protegida.

Tabla 3. Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Marina	Humedad media.	IIb	Corrosión de origen diferente de los cloruros.	Exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.	Elementos estructurales en construcciones exteriores protegidas de la lluvia. -Tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.
	Aérea	IIIa	Corrosión por cloruros.	-Elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar. -Elementos exteriores de estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km).	-Elementos estructurales de edificaciones en las proximidades de la costa. -Puentes en las proximidades de la costa. -Zonas aéreas de diques, muelle y otras obras de defensa litoral. -Instalaciones portuarias.
	Sumergida	IIIb	Corrosión por cloruros.	-Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar.	-Zonas sumergidas de diques, muelle y otras obras de defensa litoral. -Cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar.
	En zona de carrera de mareas y en zonas de salpicaduras	IIIc	Corrosión por cloruros.	-Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de salpicaduras o en zona de carrera de mareas.	- Zonas situadas en el recorrido de marea de diques, muelle y otras obras de defensa litoral. -Zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea.

Tabla 3. Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
		IV	Corrosión por cloruros.	-Instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionados con el ambiente marino. -Superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas.	-Piscinas e interiores de los edificios que las albergan. -Pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve. -Estaciones de tratamiento de agua.
Química Agresiva	Débil	Qa	Ataque químico.	- Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del concreto con velocidad lenta.	-Instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas. -Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil.
	Media	Qb	Ataque químico.	-Ataque químico-elementos en contacto con agua de mar. -Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del concreto con velocidad media.	-Dolos, bloques y otros elementos para diques. - Estructuras marinas, en general. -Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media. -Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media.

Tabla 3. Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Química Agresiva	Fuerte	Qc	Ataque químico.	-Elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del concreto con velocidad rápida.	-Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media. -Instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta. -Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta. -Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad fuerte.
Con heladas	Sin sales fundentes	H	Ataque congelación-deshielo.	-Elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C.	-Construcciones en zonas de alta montaña. -Estaciones invernales.

Tabla 3. Clases generales de exposición relativas a la corrosión del refuerzo.

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
Clase	Subclase	Designación	Tipo de proceso		
Con heladas	Con sales fundentes	F	Ataque por sales fundentes.	-Elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C.	-Tableros de puentes o pasarelas en zonas de alta montaña, en las que se utilizan sales fundentes.
Erosión		E	Abrasión. Cavitación.	-Elementos sometidos a desgaste superficial. -Elementos de Estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor del agua.	-Pilas de puente en cauces muy torrenciales. -Elementos de diques, muelle y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes. -Pavimentos de concreto. -Tuberías de alta presión.

- La prescripción de recubrimientos.
- En algunos casos, en el tipo de cemento a emplear (resistente a sulfatos o agua de mar, por ejemplo).

Cada elemento estructural puede tener un tipo de ambiente diferente y habrá que reunir los elementos en grupos con la finalidad de una ejecución de obra razonable (Cimentaciones y muro de contención; elementos estructurales interiores; elementos estructurales de concreto expuestos, obras sanitarias, etc.).

Prescripciones generales de durabilidad en el proyecto:

- Diseño de la estructura.
- Adecuación de la calidad del concreto.
- Recubrimientos adecuados para la protección del refuerzo. Separadores.
- Control del valor máximo de abertura de fisura.
- Disposición de protecciones especiales para el caso de ambientes muy agresivos.
- Adopción de medidas de protección del refuerzo frente a la corrosión.

En las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto, RCDF, y en la Norma mexicana NMX-C-403-ONNCCE, aparecen consideraciones sobre las diferentes clases de exposición que se manejan en la normativa mexicana. Aunque las clases de exposición señaladas en esos documentos son similares, la clasificación aquí presentada es más detallada y con ejemplos de situaciones en las que se pueden dar.

Tabla 4. Cementos recomendados según las diferentes clases de exposición.

Clase de exposición	Tipo de proceso (Agresividad debido a)	Cemento recomendado
I	Ninguno.	Todos los recomendados según la aplicación prevista
II	Corrosión del refuerzo de origen diferente de los cloruros.	CEM I, cualquier CEM II (preferentemente CEM II/A), CEM III/A, CEM IV/A.
III (*)	Corrosión del refuerzo por cloruros de origen marino.	Muy adecuados los cementos CEM II/S, CEM II/V (preferentemente los CEM II/B-V), CEM II/P (preferentemente los CEM II/B-P), CEM II/A-D, CEM III, CEM IV (preferentemente los CEM IV/A) y CEM V/A.
IV	Corrosión del refuerzo por cloruros de origen no marino.	Preferentemente, los CEM I y CEM II/A y, además, los mismos que para la clase de exposición III.
Q (**)	Ataque al concreto por Sulfatos.	Los mismos que para la exposición III
Q	Lixiviación del concreto por aguas puras, ácidas, o con CO ₂ agresivo.	Los cementos comunes de los tipos: CEM II/P, CEM II/V, CEM II/A-D, CEM II/S, CEM III, CEM IV y CEM V
Q	Reactividad álcali-agregado.	Cementos de bajo contenido en alcalinos (***) (óxidos de sodio y de potasio) en los que $(Na_2O)_{eq} = Na_2O (\%) + 0'658 K_2O (\%) < 0'60$.

(*) En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR), tal y como establece la Instrucción de Hormigón Estructural EHE.

(**) En esta clase de exposición es necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR), en el caso de la clase específica Qb o Qc, tal y como establece el articulado de esta Instrucción. En los casos en que el elemento esté en contacto con agua de mar será necesario cumplir las prescripciones relativas al empleo de la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR).

(***) También son recomendables los cementos citados en tablas posteriores. Para concretos con agregados potencialmente reactivos (que necesitarían cementos con bajo contenido en alcalinos).

Tipos de cementos utilizados en España.	
CEM I Cemento Portland CEM I 95 -100% Clinker K.	
CEM II Cemento Portland con escoria de horno alto S.	CEM II/A-S 80-94% K 6-20% S.
CEM II Cemento Portland con escoria de horno alto S.	CEM II/B-S 65-79% K 21-35% S.
CEM II Cemento portland con humo de sílice D.	CEM II/A-D 90-94% K 6-10% D.
CEM II Cemento Portland con puzolana Natural P.	CEM II/A-P 80-94% K 6-20% P.
CEM II Cemento Portland con puzolana Natural P.	CEM II/B-P 65-79% K 21-35% P.
CEM II Cemento Portland con puzolana Natural Calcinada Q.	CEM II/A-Q 80-94% K 6-20% Q.
CEM II Cemento Portland con puzolana Natural Calcinada Q.	CEM II/B-Q 65-79% K 21-35% Q.
CEMII Cemento Portland con ceniza volante Silíceas V.	CEM II/A-V 80-94% K 6-20% V.
CEM II Cemento Portland con ceniza volante Silíceas V.	CEM II/B-V 65-79% K 21-35% V.
CEM II Cemento Portland con ceniza volante Calcáreas W.	CEM II/A-W 80-94% K 6-20% W.
CEM II Cemento Portland con ceniza volante Calcáreas W.	CEM II/B-W 65-79% K 21-35% W.
CEM II Cemento Portland con esquistos calcinados T.	CEM II/A-T 80-94% K 6-20% T.
CEM II Cemento Portland con esquistos calcinados T.	CEM II/B-T 65-79% K 21-35% T.
CEM II Cemento Portland con caliza L < 0.20% en masa para caliza.	CEM II/A-L 80-94% K 6-20% L.
CEM II Cemento Portland con caliza L < 0.20% en masa para caliza.	CEM II/B-L 65-79 % K 21-35% L.
CEM II Cemento Portland con caliza LL<0.50% en masa para caliza.	CEM II/A-LL 80-94% K 6-20% LL.
CEM II Cemento Portland con caliza LL< 0.50% en masa para caliza. <i>Será inferior al 0,20% en masa para calizas LL.</i> <i>Sera inferior al 0,50% en masa para calizas L.</i>	CEM II/B-LL 65-79% K 21-35% LL.
CEM II Cemento Portland mixto.	CEM II/A-M 80-94 K < 6-20> P,Q,V,W,T.
CEM II Cemento Portland mixto.	CEM II/B-M 65-79 K < 21-35> P,Q,V,W,T.
CEM III Cemento con escorias de horno alto.	CEM III/A 35-64% K 36-65% S.
CEM III Cemento con escorias de horno alto.	CEM III/B 20-34% K 66-80% S.
CEM III Cemento con escorias de horno alto.	CEM III/C 5-19% K 81-95% S.
CEM IV Cemento puzolánico.	CEM IV/A 65-89% K <11-35> D,P,Q,V,W.
CEM IV Cemento puzolánico.	CEM IV/B 45-64% K < 36-55> D,P,Q,V,W.
CEM V Cemento compuesto.	CEM V/A 40-64% K 18-30% S <18-30> P.Q.V.
CEM V Cemento compuesto.	CEM V/B 20-38% K 31-50% S <31-50> P,Q,V.

2.2 Diseño de la estructura

- Selección de formas geométricas adecuadas para reducir al mínimo el contacto entre agua y concreto.
- Diseño de los detalles necesarios para una rápida evacuación del agua, ventilación o drenaje.
- Sistemas que faciliten el mantenimiento.
- Definir manuales de uso y mantenimiento a llevar a cabo a lo largo de la vida útil del edificio para garantizar la durabilidad.

2.3 Adecuación de la calidad del concreto

Se garantizará el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Materias primas que cumplan los requisitos de control de calidad.
- Dosificación adecuada.
- Puesta en obra y curado del concreto correctas.
- Curado del concreto.
- Resistencia de acuerdo con el comportamiento estructural y los requisitos de durabilidad.

2.4 Materias primas

Es importante para la durabilidad la selección del tipo de cemento más adecuado según las recomendaciones de la instrucción para la Recepción de Cementos (RC-08)⁴.

Los cementos que se producen en México tienen un número menor de tipos, pero suficientes para seleccionar el que tenga las características requeridas. Las equivalencias de la clasificación española con la mexicana se pueden encontrar consultando la Norma NMX-C-414-ONNCCE.

2.5 Dosificación adecuada

Los requisitos de dosificación del concreto dependen del grado de agresividad ambiental a la que estará sometida la estructura:

a) Requisitos generales

Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento, (si se utilizan adiciones para la fabricación del concreto se podrán tener en cuenta a efectos de contenido de cemento y relación agua/cemento en las condiciones fijadas).

Las especificaciones de relación agua/cemento y de contenido de cemento son las que determinan la dosificación pero a la vez condicionan unas determinadas características mecánicas del concreto. Los valores de las resistencias de la tabla, a título meramente indicativo, son las que resultan coherentes con las respectivas dosificaciones.

Tabla 5. Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento.

Parámetro de dosificación	Tipo de concreto	Clase de exposición												
		I	Ila	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Máxima relación a/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Reforzado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,45	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50
Mínimo contenido de cemento (kg/m ³).	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275
	Reforzado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300
	Pretensado	275	300	300	300	300	350	325	325	350	350	300	325	300

⁴Real Decreto 956/2008, del 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC- 08).

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

Parámetro de dosificación	Tipo de concreto	Clase de exposición												
		I	Ila	Ilb	IIla	IIlb	IIlc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E
Resistencia Mínima (N/mm ²)	Masa	20	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	Reforzado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30
	Pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30

En las NTC para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto y en la NMX-C-403-ONNCCE se dan recomendaciones similares, aunque los valores especificados no coinciden para todas las condiciones de exposición.

b) Requisitos adicionales

Impermeabilidad del concreto

Una comprobación experimental de la obtención de una estructura porosa del concreto suficientemente impermeable para el ambiente en el que va a estar ubicado, puede realizarse comprobando la impermeabilidad al agua del concreto, mediante el método de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión, según la UNE EN 12390-8. Esta comprobación se deberá realizar cuando las clases generales de exposición sean III o IV, o cuando el ambiente presente cualquier clase específica de exposición.

Un concreto se considera suficientemente impermeable al agua si los resultados del ensayo de penetración de agua cumplen simultáneamente con:

Tabla 7. Parámetros de penetración del agua en el concreto.

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

Nota: Las normas mexicanas no hacen referencia a este requisito.

c) Resistencia del concreto a las heladas

Para la clase de exposición F, hace falta introducir en el concreto un contenido mínimo de aire incluido del 4.5% según UNE-EN 12350-7. Para las clases de exposición H o F, ataque por heladas con o sin sales fundentes, se recomienda el cumplimiento de las especificaciones relativas a la estabilidad de los agregados .

El *Reglamento de Construcciones del Distrito Federal* no hace referencia a este requisito porque el clima de la Ciudad de México no lo amerita. La NMX-C-403-ONNCCE si lo incluye y hace variar el contenido de aire incluido en función del tamaño máximo del agregado grueso.

d) Resistencia del concreto al ataque por sulfatos.

Para contenidos de sulfatos ≥ 600 mg/l en el caso de aguas o ≥ 3000 mg/kg en el caso de suelos, el cemento deberá tener la característica adicional de resistencia a sulfatos (SR), excepto que se trate de agua de mar o con un contenido de cloruros > 5000 mg/l, casos en que se aplicará el que se establece en el apartado siguiente de resistencia del concreto al agua de mar.

e) Resistencia del concreto al agua de mar.

Para ambientes IIIb o IIIc y en elementos de concreto en masa sumergidos o en zonas de mareas el cemento a emplear deberá tener la característica adicional de resistencia al agua de mar (MR).

En relación con los casos d) Resistencia del concreto al ataque por sulfatos y e) Resistencia del concreto al agua de mar, las normas mexicanas antes señaladas (NTC y NMX) dan recomendaciones más detalladas para diferentes niveles de agresividad.

f) Por clase de exposición E, concreto resistente a la erosión.

- * Resistencia mínima del concreto: 30 N/mm².
- * El agregado fino deberá ser cuarzo u otro material de igual dureza.
- * El agregado grueso deberá tener un coeficiente de Los Ángeles inferior a 30.
- * No superar los contenidos de cemento en función del tamaño máximo del agregado.

Tabla 8. Contenido de cemento en función de los agregados.	
D	Contenido máximo de cemento
10 mm.	400 kg/m ³
20 mm.	375 kg/m ³
40 mm.	350 kg/m ³

Duración del curado como mínimo un 50% superior al que se aplicaría a un concreto de las mismas características no sometido a erosión.

Las normas mexicanas NTC y NMX antes señaladas dan recomendaciones similares.

g) Resistencia frente a la reactividad álcali-agregado

Se puede producir en cuanto concurren simultáneamente la existencia de un ambiente húmedo (cualquier ambiente, excepto I o IIb se considera húmedo), la presencia de un alto contenido de álcalis en el concreto y la utilización de agregados reactivos. Hay que seleccionar agregados inertes y si no es posible se pueden estudiar métodos de impermeabilización superficial. Las normas mexicanas NTC y NMX antes señaladas dan recomendaciones similares.

2.6 Recubrimientos adecuados

El recubrimiento del concreto es la distancia entre la superficie exterior del refuerzo (incluyendo estribos) y la superficie del concreto más cercana. El recubrimiento mínimo es el que se debe cumplir en cualquier punto. Para garantizar este valor mínimo, en el proyecto se debe prescribir un valor de recubrimiento nominal.

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

Donde:

- r_{nom}: recubrimiento nominal: el que se especifica en planos y lo que sirve para definir los separadores.
- r_{min}: recubrimiento mínimo: el que se debe cumplir en cualquier punto.

Δr : margen de recubrimiento en función del control de ejecución:

0 mm en elementos prefabricados con control intenso de ejecución

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

10 mm en el resto de los casos.

Tabla 9. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición I y II.

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del concreto (N/mm^2)	Vida útil del proyecto (tg), (años)	
			50	100
I	Cualquiera.	$f_{ck} \geq 25$	15	25
IIa	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	15	25
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al concreto.	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
IIb	CEM I	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	30
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al concreto.	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	35
		$f_{ck} \geq 40$	20	30

Los valores de recubrimiento mínimo de las tablas anteriores están asociados al cumplimiento simultáneo de las especificaciones de dosificación del concreto contempladas en las clases de exposición.

En el caso de que se dispongan de datos experimentales sobre la agresividad del ambiente en estructuras similares situadas en zonas próximas y con el mismo grado de exposición, o bien en el caso de que se decida adoptar en el proyecto unas características del concreto más exigentes que las indicadas en este documento, el responsable del proyecto podrá comprobar el cumplimiento del Estado Límite de Durabilidad, de acuerdo con lo descrito en este documento.

En el caso de que el responsable del proyecto establezca en el mismo la adopción de medidas especiales de protección frente a la corrosión del refuerzo (protección catódica, refuerzo galvanizado o empleo de aditivos inhibidores de corrosión en el concreto) podrá disponer unos recubrimientos mínimos reducidos para las clases

Tabla 10. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases generales de exposición III y VI.

Concreto	Cemento	Vida útil del proyecto (tg), (años)	Clase de exposición				
			IIIa	IIIb	IIIc	IV	
Reforzado	CEMIII/A, CEMIII/B, CEMIV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D o concreto con adición de microsílíce superior al 6%.	50	25	30	35	35	
		100	30	35	40	40	
	Resto de cementos utilizables.	50	45	40	*	*	
		100	65	*	*	*	
	Pretensado	CEM II/A-D o bien con adición de microsílíce superior al 6%.	50	30	35	40	40
			100	35	45	45	45
Resto de cementos utilizables.		50	65	45	*	*	
		100	*	*	*	*	

*Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos, no aconsejables desde el punto de vista de la ejecución del elemento. En estos casos, se recomienda comprobar el Estado Límite de Durabilidad a partir de las características del concreto prescrito en el Pliego de prescripciones técnicas del proyecto.

generales III y IV, que se corresponderán con los indicados en este documento para la clase general IIIb., siempre que se puedan aplicar las medidas necesarias para garantizar la eficacia de dichas medidas especiales durante la totalidad de la vida útil de la estructura prevista en el proyecto.

Otras especificaciones en cuanto a recubrimientos de acero de refuerzo y presfuerzo, son:

a). En el caso de refuerzos principales el recubrimiento deberá de ser \geq al diámetro de la barra o diámetro equivalente en el caso de grupos de barras y \geq a 0.80 veces la medida máxima del agregado grueso en general o \geq 1.25 veces el tamaño máximo del agregado para casos en que la disposición del refuerzo respecto a los paramentos dificulte el paso del concreto.

b). Para cualquier tipo de refuerzo, incluidos estribos, los recubrimientos no serán inferiores a los indicados en las tablas en ningún punto.

c). En el caso de elementos (viguetas o placas) prefabricados en instalación industrial fija, para colados unidireccionales de concreto reforzado o pretensado, se podrá contar con el grueso de los revestimientos de colado que sean compactos e impermeables y tengan carácter de definitivos y permanentes. En estos casos el recubrimiento real de concreto no podrá ser nunca inferior a 15 mm.

Tabla 11. Recubrimientos mínimos (mm) para las clases específicas de exposición.

Clase de exposición	Tipo de cemento	Resistencia característica del concreto (N/mm^2).	Vida útil del proyecto (tg), (años).	
			50	100
H	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	25
	Otro tipo de cemento.	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	35
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
F	CEM I I/A-D	$25 \leq f_{ck} < 40$	25	50
		$f_{ck} \geq 40$	15	35
	CEM III	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	75
		$f_{ck} \geq 40$	20	40
	Otros tipos de cementos o en el caso de empleo de adiciones al concreto.	$25 \leq f_{ck} < 40$	20	40
		$f_{ck} \geq 40$	10	20
E ⁽¹⁾	Cualquiera	$25 \leq f_{ck} < 40$	40	80
		$f_{ck} \geq 40$	20	35
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D o concreto con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.	-	40	55
	Resto de cementos utilizables.	-	-	-
Qb, Qc	Cualquiera	-	(2)	(2)

(*) Estas situaciones obligarían a unos recubrimientos excesivos.

(1) Estos valores corresponden a condiciones moderadamente duras de abrasión. En el caso de que se prevea una fuerte abrasión, será necesario realizar un estudio detallado.

(2) El Responsable del proyecto deberá fijar estos valores de recubrimiento mínimo y, en su caso, medidas adicionales, con el objeto de que se garantice adecuadamente la protección del concreto y del refuerzo frente a la agresión química concreta de que se trate.

d) El recubrimiento de las barras dobladas no será inferior a 2 diámetros, medido en dirección perpendicular al plano de la curva.

e) En superficies de límite de colado que en situación definitiva queden embebidas en la masa del concreto, el recubrimiento no será inferior al diámetro de la barra o al diámetro equivalente del grupo de barras, ni que 0.8 veces el tamaño máximo del agregado.

f) Cuando por exigencias de durabilidad, protección contra incendios, grupos de barras, etc., el recubrimiento tenga que ser > 50 mm, se considerará la conveniencia de colocar una malla de reparto en medio del espesor de recubrimiento de la zona en tensión, con una cuantía del 5% del área del recubrimiento para barras o grupos de barras de diámetro o diámetro equivalente ≤ 32 mm, y del 10 % para diámetros o diámetros equivalentes > 32 mm.

g). En piezas coladas contra el terreno el recubrimiento mínimo será de 70 mm, pero no será necesaria la colocación de malla intermedia. Si se dispone de plantilla de concreto, el recubrimiento será el correspondiente al ambiente.

h). En muros colados contra el terreno y en el caso de pantallas y pilotes, la propia técnica constructiva conlleva unos sobredimensionados que hace que, únicamente en estos casos, no sea necesaria la especificación adicional de 70 mm.

i). Si el proyecto establece la adopción de medidas especiales de protección frente a la corrosión del refuerzo se podrán disponer unos recubrimientos mínimos reducidos para las clases generales III y IV, que se corresponderán con los indicados para la clase general IIb, siempre que se pueda garantizar la eficacia de estas medidas especiales durante la totalidad de la vida útil prevista para la estructura.

Las normas mexicanas NTC y NMX antes señaladas dan recomendaciones menos detalladas de las aquí expresadas, aunque los criterios empleados para establecer los recubrimientos mínimos para cada caso particular son similares.

2.7 Valores máximos de la abertura de fisura

La durabilidad es, junto a consideraciones funcionales y de aspecto, uno de los criterios en los que se basa la necesidad de limitar la abertura de fisura. Los valores máximos a considerar, en función de la clase de exposición ambiental, serán los indicados en la siguiente tabla.

Tabla 12. Valores máximos de abertura de fisuras en función de la clase de exposición ambiental.

Clase de exposición	$W_{m\acute{a}x}$ (mm)	
	Concreto reforzado (para la combinación cuasi permanente de acciones).	Concreto pretensado (para la combinación frecuente de acciones).
I	0.4	0.2
IIa, IIb, H	0.3	0.2 ⁽¹⁾
IIIa, IIIb, IV, F, Qa ⁽²⁾	0.2	Descompresión
IIIc, Qb ⁽²⁾ , Qc ⁽²⁾	0.1	

(1) Adicionalmente deberá comprobarse que el acero de presfuerzo se encuentre en la zona comprimida de la sección, bajo la combinación cuasi permanente de acciones.

(2) La limitación relativa a la clase Q, sólo será de aplicación en el caso de que el ataque químico pueda afectar al refuerzo. En otros casos, se aplicará la limitación correspondiente a la clase general correspondiente.

Las NTC dan recomendaciones similares para concreto reforzado pero no establecen valores máximos para el concreto pretensado.

2.8 Medidas especiales de protección

En casos de agresividad especial, cuando las medidas normales de protección no se consideren suficientes, se podrá recurrir a la disposición de sistemas especiales de protección, como los siguientes:

- Aplicación de revestimientos superficiales con productos específicos para la protección del concreto (pinturas o revestimientos), conformes con las normas de la serie UNE-EN 1504 que les sean de aplicación.
- Protección del refuerzo mediante revestimientos (por ejemplo, refuerzo galvanizado).
- Protección catódica del refuerzo, mediante ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según UNE-EN 12696.
- Refuerzo de acero inoxidable, según UNE 36067.
- Aditivos inhibidores de la corrosión.

Las protecciones adicionales pueden ser susceptibles de tener una vida útil incluso más pequeña que la del propio elemento estructural. En estos casos, el proyecto deberá contemplar la planificación de un mantenimiento adecuado del sistema de protección.

3. CONSIDERACIONES ADICIONALES SOBRE DURABILIDAD

3.1. Cálculo del Estado Límite de Durabilidad

$$tL \geq td$$

$$td = Yt \cdot tg$$

Donde:

tL: Tiempos necesario para que el agente agresivo produzca un ataque o degradación significativa.

td : Valor de cálculo de la vida útil.

Yt : Coeficiente de seguridad de la vida útil, $Yt = 1.1$

tg : Vida útil de proyecto.

3.1.1 Método general de cálculo

- a. Elección del la vida útil de proyecto.
- b. Elección del coeficiente de seguridad de vida útil.
- c. Identificación de las clases de exposición e identificación, por cada una, del proceso de degradación predominante.
- d. Selección del modelo de durabilidad de cada proceso de degradación. En este documento hay dos modelos aplicables para los procesos de corrosión del refuerzo (por carbonatación y cloruros). No hay modelos de degradación química del concreto ni por erosión porque todavía no están suficientemente desarrollados.
- e. Aplicación del modelo y estimación de tL .
- f. Comprobación del Estado Límite de Servicio de Durabilidad para cada uno de los procesos de degradación relevantes.

3.1.2 Modelos de durabilidad para los procesos de corrosión

En los dos modelos, tanto por el de carbonatación como por el de cloruros, el tiempo total tL necesario para que el ataque sea significativo es:

$$tL = ti + tp$$

Donde:

ti: periodo inicial, o sea el tiempo que tarda el agente agresivo en llegar al refuerzo y provocar la corrosión.

tp: periodo de propagación, tiempo de propagación de la corrosión hasta llegar a una degradación significativa.

$$ti = (d / K)^2$$

Donde:

d: espesor del recubrimiento en mm.

K: en el caso del proceso de carbonatación es Kc , coeficiente de carbonatación, que es función de la resistencia y % de aire incluido en el concreto, del ambiente en que está expuesto y del tipo de cemento.

t : Tiempo en años.

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

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

Donde:

f_{cm} Resistencia media del concreto a compresión, en N/mm², que puede estimarse a partir de la resistencia característica específica (f_{ck}).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (en N/mm}^2\text{)}$$

Donde:

c_{env} Coeficiente de ambiente.

c_{air} Coeficiente de aire incluido.

a, b Parámetros función del tipo de conglomerante.

En el caso del proceso por cloruros es KCl, coeficiente de penetración de cloruros, que es función del tipo y cantidad de cemento, de la relación agua/cemento y de la clase de exposición.

Tabla 13. Parámetros para el cálculo del coeficiente de carbonatación.

Coeficiente C_{env}		Coeficiente C_{air}	
Ambiente	C_{env}	Aire incluido (%)	C_{air}
Protegido de la lluvia	1	< 4.5%	1
Expuesto a la lluvia	0,5	≥ 4.5%	0,7

Coeficientes a y b

Conglomerante	Cementos de la Instrucción RC 03	a	b
Cemento Portland	CEM I CEM II-A CEM II-B-S CEM II-B-L CEM II-B-LL CEM II-B-M CEM/V	1800	-1,7
Cemento Portland+28% cenizas volantes.	CEM II-B-P CEM II-B-V CEM IV/A CEM IV/B	360	-1,2
Cemento Portland+9% microsilíce.	CEM II-A-O	400	-1,2
Cemento Portland+65% escorias.	CEM II/A CEM II/B	360	-1,2

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

Donde:

d Recubrimiento en mm.

t Tiempo en años.

El coeficiente de penetración de cloruros K_{cl} tiene la siguiente expresión:

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

Donde:

α Factor de conversión de unidades que vale 56157.

$D(t)$ Coeficiente de difusión efectiva de cloruros, para la edad t , expresado en cm^2/s

C_{th} Concentración crítica de cloruros, expresada en % del peso de cemento.

C_s Concentración de cloruros en la superficie del concreto, expresada en % del peso de cemento. Dado que esta concentración de cloruros suele obtenerse en % del peso de concreto, su equivalente en peso de cemento se puede calcular a partir del contenido de cemento del concreto (en kg/m^3) como:

$$C_s \text{ (% peso de cemento)} = C_s \text{ (% peso del concreto)} * (2300/\text{contenido de cemento}).$$

C_b Contenido de cloruros aportado por las materias primas (agregados, cemento, agua, etc.), en el momento de fabricación del concreto.

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

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

Donde:

$D(t_0)$ es el coeficiente de difusión de cloruros a la edad t_0 ,

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

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

Tabla 14. Coeficientes $D(t_0)(\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s})$.

Tipo de cemento	a/c=0,40	a/c=0,45	a/c=0,50	a/c=0,55	a/c=0,60
CEM I	8,9	10,0	15,8	19,7	25,0
CEM II/A-V	5,6	6,9	9,0	10,9	14,9
CEM III	1,4	1,9	2,8	3,0	3,4

La concentración crítica de cloruros (C_{th}) deberá ser establecida por el responsable del proyecto de acuerdo con las consideraciones específicas de la estructura. En condiciones normales, puede adoptarse un valor del 0,6% del peso de cemento para la comprobación del Estado Límite en relación con la corrosión del refuerzo normal (pasivo). En el caso de refuerzo pretensado (activo), puede adoptarse un valor límite de C_{th} de 0,3% del peso de cemento.

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

Tabla 15. Concentración de cloruros en la superficie del concreto.					
Clase general de exposición.	IIIa		IIIb	IIIc	IV
Distancia respecto a la costa.	Hasta 500 m	500 m – 5000 m	Cualquiera		-
C_s (% peso de concreto).	0.14	0.07	0.72	0.50	0.50

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

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

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

Donde:

- t_p Tiempo de propagación, en años.
- d Espesor de recubrimiento en mm.
- ϕ Diámetro del refuerzo, en mm.
- V_{corr} , Velocidad de corrosión, en $\mu\text{m}/\text{año}$.

A falta de datos experimentales específicos para el concreto y las condiciones ambientales concretas de la obra, la velocidad de corrosión podrá obtenerse de la siguiente tabla.

Tabla 16. Velocidad de corrosión V_{corr} según la clase general de exposición.			
Clase general de exposición		V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{año}$)	
Normal	Humedad alta.	IIa	3
	Humedad media.	IIb	2
Marina	Aérea	IIIa	20
	Sumergida	IIIb	4
	En zona de mareas.	IIIc	50
Con cloruros de origen diferente del medio marino.		IV	20

3.1.3 Estimación de la vida útil debida a la corrosión del refuerzo

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

$$t_L = t_i + t_p = \left(\frac{d}{K_c}\right)^2 + \frac{80 d}{\phi V_{corr}}$$

En el caso de la corrosión por cloruros será:

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

3.2 Contribución de los morteros de revestimiento al recubrimiento del refuerzo

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

Tabla 17. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambientes IIa y IIb.

Velocidad de penetración de cloruros, (mm/1.5 días)(*)	λ
≤ 2.0	0.5
≤ 1.0	1.0
≤ 0.7	1.5
≤ 0.5	2.0

Tabla 18. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambientes IIIa.

Velocidad de penetración de cloruros, (mm/1.5 días)(*)	λ
≤ 3.4	0.5
≤ 1.7	1.0
≤ 1.1	1.5
≤ 0.9	2.0

(*) Para la determinación de la velocidad de penetración de cloruros, y a falta de una normativa específica, se recomienda seguir las condiciones de ensayo descritas en el capítulo 3 de la norma AASTHO T259-80, manteniendo las mismas hasta edades no inferiores a 90 días y determinando la velocidad de penetración de cloruros mediante algún procedimiento adecuado (como por ejemplo, mediante la determinación colorimétrica del frente de penetración de cloruros con AgNO_3 a diferentes edades intermedias).

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

Tabla 19. Factor de equivalencia de recubrimiento para morteros en ambientes IIIa.

Capilaridad (kg(m ² 0.5h). Según recomendación RILEM CPC 11.2	λ
≤ 0.40	0.5
≤ 0.20	1.0
≤ 0.15	1.5
≤ 0.10	2.0

Para que un mortero pueda ser empleado de acuerdo con lo indicado en este documento, sus componentes (cemento, agregados, aditivos, adiciones, etc.) deberán cumplir, en su caso, lo especificado para cada uno de ellos en la correspondiente normativa. Además, independientemente del valor de su factor de equivalencia, deberá cumplir también las especificaciones de la siguiente tabla.

Tabla 20. Características del mortero en revestimientos, para poder ser considerado a los efectos de este documento..

Características	Requisitos
Resistencia a flexotensión, según UNE-EN 1015-11.	≥ 2 N/mm ²
Módulo de elasticidad, según ASTM C469.	≤ 25000 N/mm ²
Contracción por secado a los 28 días, según ASTM C 157.	$\leq 0.04\%$
Resistencia de adherencia, según UNE-EN 1542.	≥ 0.8 N/mm ²
Coefficiente de dilatación térmica, según UNE-EN 1770.	$\leq 11.7 \times 10^{-6}$ °C ⁻¹

En el caso de empleo de otros revestimientos, o en ambientes distintos de los anteriores, el proyectista debe justificar documentalmente que la protección al refuerzo en el elemento prefabricado es similar a la que proporcionaría el espesor de concreto sustituido. Para ello el fabricante de productos de revestimientos distinto de los anteriores deberá garantizar documentalmente sus propias bases y entre ellas, al menos el factor de equivalencia del revestimiento.

Otros criterios, como por ejemplo, los estéticos o los de protección contra el fuego, pueden requerir mayores espesores de recubrimiento o la aplicación de otras protecciones específicas. En el caso de ambientes fuertemente agresivos, el valor de los recubrimientos y las demás disposiciones de proyecto deberán establecerse, previa consulta de la literatura técnica especializada, en función de la naturaleza del ambiente, del tipo de elemento estructural de que se trate, etc.

Ninguna de las normas mexicanas señaladas (NTCC, RCDF y NMX-C-403-ONNCCE) hace referencia al Cálculo del estado límite de durabilidad, ni a la contribución del mortero de revestimiento al recubrimiento del refuerzo, como lo señalado en este artículo para la normativa española.

4. COMENTARIO FINAL

Las normas mexicana y española especifican requisitos similares para garantizar la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado y presforzado, sin embargo, la norma española analiza con mayor detalle las causas del deterioro, la forma de contrarrestarlo y da expresiones que permiten calcular la vida útil de las estructuras ante

diferentes agentes agresivos. Los coeficientes y parámetros propuestos por la normativa española pueden requerir de ajustes para su adecuación a las condiciones mexicanas, sin embargo, a falta de información más precisa se puede emplear esa información para la estimación de la durabilidad de las estructuras. Los autores estiman que las aportaciones que se presentan en este artículo contribuirán a mejorar la práctica mexicana y obtener con ello estructuras más durables.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM C469-Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poissons Ratio of Concrete in Compression.
2. ASTM C 157 – 08-Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete.
3. GEHO, "Durabilidad de estructuras de concreto: Guía de diseño del CEB", 2a ed., GEHO-CEB, 1996.
4. *Real decreto 1247/2008*, del 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de concreto estructural (ehe-08). Instrucción de concreto estructural (ehe-08).
5. *Real decreto 956/2008*, del 6 de junio, por el que se aprueba la instrucción para la recepción de cementos (RC-08).
6. UNE-EN 13,577:2008-Ataque químico al hormigón. Determinación del contenido de dióxido de carbono agresivo al agua.
7. UNE 83,954:2008-Durabilidad del hormigón. Aguas agresivas. Determinación del contenido de ión amonio.
8. UNE 83.956/08-Determinación del residuo seco.
9. UNE 83.957-Toma de muestras para la determinación del residuo seco.
10. UNE 83.962:2008-Determinación del contenido de ión sulfato.
11. UNE-EN 12390-8:2001-Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.
12. UNE-EN 12350-7:2001-Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.
13. UNE-EN 1504-Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de Hormigón
14. UNE-EN 12696:2001-Protección catódica del acero en el hormigón.
15. UNE 36067:1994-Alambres corrugados de acero inoxidable austenítico para armaduras de hormigón armado.
16. UNE-EN 1015-11:2000-Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero.
17. UNE-EN 1542:2000-Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la adhesión por tracción directa.
18. UNE-EN 1770:1999-Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del coeficiente de dilatación térmica.