



Propuesta de modificación de los criterios de durabilidad del hormigón en el Eurocódigo 2

Proposed amendment of concrete durability criteria in Eurocode 2

Carmen Andrade^a, Rosario Martínez^b y Miguel Ángel Sanjuán^b

^aDr. en Ciencias Químicas, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, IETcc, Madrid, España

^bDr. en Ciencias Químicas, Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, IECA, Madrid, España

Recibido el 25 de julio de 2013; aceptado el 3 de diciembre de 2013

Resumen

Los Comités CEN/TC 250/SC2 (Eurocódigo 2) y CEN/TC 104/SC 1 (Hormigón) han creado un “Joint Working Group” JWG TC250/TC104 con el fin de revisar los aspectos relativos a la durabilidad en el Eurocódigo 2 “estructuras de hormigón” y en la norma EN 206-1 “hormigón”. Este JWG ha estudiado la posibilidad de clasificar los hormigones no sólo por resistencia mecánica sino también por durabilidad en función de la clase de exposición. En este JWG se propone realizar esta clasificación en base a un ensayo directo de resistencia a los cloruros y a la carbonatación, lo que obligaría a realizar estos ensayos de una forma más o menos rutinaria en el futuro. Como alternativa, el grupo espejo español ha propuesto que la clasificación se haga primero en base a las dosificaciones como se ha realizado hasta el momento y, con el fin de avanzar en los criterios prestacionales, también mediante ensayos indirectos de durabilidad (indicadores de durabilidad). En el presente artículo se expone la propuesta española en comparación con la propuesta recogida en el JWG. Se discuten las ventajas e inconvenientes de cada una y se presentan las tablas resumen que se han enviado desde el TC140/SC2 de AENOR para la revisión del capítulo 4 del Eurocódigo 2.

Palabras clave: Durabilidad; Hormigón; Dosificación; Modelos; Resistividad

Abstract

The CEN/TC 250/SC2 and TC104/SC1 Committees have established a Joint Working Group, JWG TC250/TC104, in order to review all the durability aspects related to durability in Eurocode 2 “concrete structures” and EN 206-1 “concrete” standard. This JWG has studied the possibility of classifying concrete, not only by mechanical strength, but also by durability. This JWG has proposed that this classification be based on a direct test of carbonation or chloride resistance, which would oblige to make these types of tests routine in the future. As an alternative, the Spanish Mirror group has proposed to make this classification first by concrete mix proportioning as it is currently made and, in order to advance to a performance-based approach, by an indirect test (Durability Indicator). In present paper, the Spanish proposal is described and compared to that presented in the JWG. Advantages and disadvantages of both proposals are discussed and two Tables are presented that summarize what has been submitted by the AENOR CTN-140/SC2 for the revision of Chapter 4 of the Eurocode 2.

Keywords: Durability; Concrete; Batching; Models; Resistance

1. Introducción

La durabilidad del hormigón en la normativa europea se considera en dos normas, la EN 206-1 [1] de especificaciones del hormigón, desde el punto de vista del material, y en la serie de normas EN 1992 [2] de Eurocódigos estructurales del hormigón, desde el punto de vista del diseño del recubrimiento

de la armadura del hormigón armado en función de la clase de exposición a la que van a estar expuestos los elementos estructurales y de la calidad del hormigón con la que han sido fabricados.

La EN 206-1 (anexo F) [1], al igual que la EHE-08 (Capítulo VII - Art. 37.3.2) [3] en España, define unos valores límite de relación agua/cemento y contenido de cemento en función de la clase de exposición. Por otro lado, el Eurocódigo 2 (apartado 4.4.1.2. de la norma EN 1992-1-1) [2] y el capítulo VII - Art. 37.2.4 de la EHE-08 especifican el recubrimiento mínimo en función de la clase de exposición.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: andrade@ietcc.csic.es (C. Andrade).

Uno de los aspectos que se pretende modificar en la revisión del Eurocódigo 2 “Estructuras de hormigón”, EC2 [2], es el capítulo 4, relativo a la durabilidad, ya que en estos últimos años se han producido bastantes avances científico-técnicos y además se detecta una demanda creciente de especificar una vida útil mínima en infraestructuras de relevancia como es el caso, por ejemplo, de la tercera y la cuarta esclusas del canal de Panamá, donde se requiere al hormigón estructural garantizar una vida útil mayor de 100 años. Además se pretende reordenar el contenido de la norma de especificaciones del hormigón EN 206-1 [1] ya que contiene especificaciones que deberían estar en el EC2. La forma inicial en la que, en resumen, se pretenden basar los cambios consistiría en que la EN-206 defina clases de hormigones no sólo con relación a la resistencia a compresión a 28 días, sino que también los clasifique en función de la durabilidad y riesgo de corrosión de la armadura en función de cada ambiente de exposición. El EC2 abordaría los recubrimientos de armadura necesarios para cada clase de hormigón y de exposición.

Para conseguir estudiar las alternativas y presentar una propuesta, se ha creado un grupo de trabajo conjunto formado por miembros del CEN/TC 250/SC2 (Eurocódigo 2) y del CEN/TC 104/SC 1 (Especificaciones del hormigón) denominado *Durability Joint Working Group (JWG TC 250/TC 104)*. De este grupo depende un “ad hoc group” de expertos. Por otro lado, es necesario mencionar a los diversos grupos espejo nacionales que también han sido preguntados sobre la redacción del capítulo 4 del EC2 sobre durabilidad. La figura 1 muestra para el caso español tanto los grupos como los representantes españoles en cada grupo.

En la revisión normativa actual que está realizando el denominado *Durability Joint Working Group (JWG TC-250/TC-104)* se planteó primero producir el cambio drástico de una consideración de las “clases de hormigón para la durabilidad” basada sólo en la medida de los coeficientes de difusión de los cloruros [4] y el dióxido de carbono [5] sin ninguna trazabilidad con las tablas actuales de proporciones de la mezcla de hormigón. Esta posición inicial se ha forzado a que varíe y en la actualidad plantea integrar el enfoque tradicional denominándolo nivel 1 con un enfoque prestacional como el desarrollado en el fib Model Code 2010 [6] mediante modelado del proceso agresivo,



Figura 1. Estructura de los grupos de trabajo implicados en la revisión del Eurocódigo 2 desde el punto de vista de la durabilidad. Los representantes españoles en cada grupo aparecen en azul.

vo, es decir, a través de indicadores directos del proceso de degradación, denominado en este caso como nivel 2. Finalmente, también se ha enunciado la posibilidad de un nivel 3 consistente en la definición de indicadores indirectos de la resistencia del hormigón frente a los diferentes ambientes agresivos, que englobaría los casos de ataque por sulfatos árido-álcali o la incorporación como indicador de la resistividad del hormigón o la penetración del agua. En el presente trabajo se desarrollan estos niveles y se explican tanto las propuestas que se han realizado por los miembros de otros grupos nacionales y que están siendo discutidas por el (JWG TC250/TC104) como la propuesta realizada por el Grupo Espejo español GEE-EC2.

2. Propuesta de nuevo enfoque del JWG TC-250/TC-104 clasificando el hormigón por su durabilidad

Como punto de partida el diagrama de flujo para el diseño de la vida útil que propone el *JWG TC250/TC 104 - durability* [7] coordinado por Steinar Leivestad en la elaboración de la nueva EN 1992-1-1 es el que se muestra a continuación (tabla 1).

Para clasificar por durabilidad, por el momento, el *JWG TC-250/TC-104 - durability* sólo considera el nivel 2 basado en el ensayo directo de la resistencia a la corrosión como la mejor estrategia para el diseño de un hormigón durable [7] y pretende redactar unos nuevos ensayos de resistencia a la carbonatación y a los cloruros diferentes ligeramente de los ya aprobados [4,5] y sometidos a ensayos ineterlaboratorios a nivel europeo. La tabla 2 muestra cómo la norma EN 206-1 podría presentar las clases de durabilidad y las composiciones determinadas experimentalmente para cumplir con las prestaciones definidas. En la tabla, las definiciones de RC20, RC30 y RC40 se refieren a resistencia a la carbonatación equivalente a una penetración del hormigón carbonatado menor de 20, 30 o 40 mm a los 50 años y lo mismo para los cloruros cuya denominación RSD significa “resistance to sea water and deicing salts” (resistencia al agua de mar y sales de deshielo). Asimismo, el *JWG TC-250/TC-104 - durability* sugiere que estas resistencias se pueden relacionar con distintas composiciones del hormigón que se deberían actualizar periódicamente en función del desarrollo de nuevos materiales, de nuevas tecnologías o del estado del conocimiento.

Tabla 1
Procedimiento para la verificación de la durabilidad propuesto en el *JWG TC250/TC 104 - durability*

<i>Estructura, se considera el ambiente de exposición para varios elementos</i>
Bajo tierra
Externo
Interno, etc.
<i>Clase de exposición para varios elementos</i>
EC2 define las bases para la selección
<i>Clases de resistencia según el ambiente para varios elementos</i>
EN206 define las clases y especifica su composición
EC2 da las bases para la selección entre las clases
<i>Recubrimiento del hormigón</i>
EC2 da los requisitos
<i>Especificaciones de ejecución, planos</i>
EC2/EN13670

Tabla 2
Propuesta a través del JWG TC250/TC 104 - durability [7]

Clases	Clase de resistencia a la carbonatación			Clase de resistencia a los cloruros		
	RC40	RC30	RC20	RSD75	RSD60	RSD45
Definición de la clase con la penetración a los 50 años	RCL XC3 < 40 mm	RCM XC3 < 30 mm	RCH XC3 < 20 mm	RSDL XS2 < 75 mm	RSDM XS2 < 60 mm	RSDH XS2 < 45 mm
Ensayo acelerado interpretación/uso	EN XXX1	EN XXX1	EN XXX1	EN YYY2	EN YYY2	EN YYY2
Especificaciones de mezcla						
<i>CEM I</i>						
Ceniza volante	Relación a/c =	Relación wa/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =
Humo de sílice	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =
<i>CEM II</i>						
Ceniza volante	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =
Humo de sílice	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =
<i>CEM III</i>						
Ceniza volante	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =	Relación a/c =
Humo de sílice	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =	Relación a/(c+kp) =
Especificaciones de adiciones						

La relación a/(c+kp) es la relación agua/cemento en cementos con adiciones de tal forma que c = clinker, k = factor de eficacia de la adición y p = contenido en adición.

Adicionalmente, el *JWG TC-250/TC-104 - durability* propone los valores mostrados en la siguiente tabla 3 en la que se especifica que el contenido mínimo de cemento sea fijo (280 kg/m³) en todos los casos.

Son varios los inconvenientes y deficiencias de esta propuesta que han sido puestos de manifiesto reiteradamente ante el *JWG TC-250/TC-104 - durability* por los representantes españoles en los distintos grupos de trabajo (fig. 1). De forma resumida se pueden enunciar:

1. Considerar sólo un nivel de cumplimiento que implique un ensayo específico de durabilidad supone una ruptura drástica, que no es recomendable en ninguna normativa nueva, con el actual contenido del EC2 y de la EN 206-1, ya que supone pasar a una nueva forma de caracterizar los hormi-
2. Es necesario respetar una trazabilidad con lo anterior manteniendo la posibilidad de demostrar el cumplimiento de la durabilidad mediante una adecuada formulación del hormigón en base a sus materias primas (método por especificaciones *nivel 1*).

gones de la que no hay experiencia y que puede dar lugar a graves perturbaciones tecnológicas y económicas.

- Adicionalmente hay que resaltar que ni los ensayos de durabilidad ni los modelos están calibrados a 50 o 100 años y se desconoce la vida útil que tendrán los hormigones reales que alcancen el cumplimiento. Cualquier predicción es aproximada ya que no se tienen registros de ensayos similares en hormigones antiguos cuando se fabricaron.

Tabla 3
Propuesta del JWG - durability "Exposure resistance classes, definitions, classification standards and deemed to satisfy values for various binder compositions"

Valores preliminares	Clase de resistencia a la carbonatación				Clase de resistencia a los cloruros			Clase de resistencia al hielo	
	RC				RSD			RF	
	RC20	RC30	RC40	RCX01	RSD45	RSD60	RSD75	RF2	RF10
Definición de la clase con la penetración a los 50 años (mm)	20	30	40	-	45	60	75		
Norma de clasificación	EN xxx	EN xxx	EN xxx	EN xxx	EN yyy	EN yyy	EN yyy	EN zzz	EN zzz
Especificaciones de la mezcla	Máxima relación a/b b es la suma del cemento y las adiciones en el hormigón, dentro de los límites indicados en la EN 197-2								
CEM I	0,45	0,50	0,55	0,90	NA	NA	0,452		
CEM II-A	0,45	0,50	0,55	0,90	0,40	0,50	0,60		
CEM II-B	NA	0,45	0,50	0,75	0,40	0,50	0,60		
CEM III-A	NA	0,45	0,50	0,75	?	?	?		
CEM III-B	NA	NA	0,45	0,65	0,38	0,45	0,55		
Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	280	280	280	280	280	280	280		

1 Clase RCX0 sólo se permitirá en la clase de exposición X0.

2 CEM I sólo se usará con 4% de humo de sílice mínimo.

NA significa que no se dan especificaciones para esa combinación.

- A este respecto debería quedar para los Anejos nacionales la especificación de los contenidos mínimos de cemento y de máxima relación a/c. Las cifras que aparecen en la tabla 4 del *JWG TC-250/TC-104 - durability* llevan a absurdos, ya que la cantidad mínima de cemento debería depender del ambiente y no ser fija y algunas de las máximas relaciones a/c son excesivas.
3. Además, el *JWG TC-250/TC-104 - durability*, fuera de su ámbito de competencia, intenta proponer unos nuevos métodos todavía no normalizados de determinación de la resistencia al ingreso de cloruros y de carbonatación del hormigón de forma acelerada, cuando el método normalizado [4,5] sólo considera que la resistencia a la carbonatación del hormigón se determine de forma natural. También, esta tabla sugiere la posibilidad de emplear cementos de horno alto (CEM III) y cementos CEM II (CEM II/A y CEM II/B) para mezclar con adiciones cuando en la norma europea EN 206-1 sólo se permite la adición directa de adiciones a los cementos CEM I y CEM II/A; por lo tanto, nuevamente se sale de su ámbito de competencia.
 4. Finalmente, excepto en el caso de la corrosión de armaduras donde se han desarrollado modelos de cálculo de la vida útil que, si bien no están calibrados, están empezando a usarse en determinadas obras, en el caso del resto de ataques físico-químicos se usan sobre todo ensayos por prestaciones, que califican el hormigón como sensible o no a un ataque, pero no cuantifican la vida útil al no tener la variable tiempo incorporada en los cálculos. Son los llamados indicadores de durabilidad (resistencia a sulfatos, a la lixiviación, etc.). Igualmente estos indicadores sin la variable tiempo se están aplicando en los desarrollos actuales sobre corrosión, como es el caso de la resistividad del hormigón o sería el papel del ensayo de penetración al agua que tiene la actual EHE-08 [3]. Por ello es necesario contar con un tercer nivel de cumplimiento de la durabilidad basado en estos ensayos “de prestaciones”.

3. Bases de la propuesta del Grupo Espejo Español (GEE-EC2) al JWG

La propuesta del GEE-EC2 se basa en considerar el cumplimiento de la durabilidad mediante cualquiera de los tres niveles antes mencionados y que ya están incorporados en el informe UNE 83994-1 [8] que contiene la figura 2, que muestra un diagrama de flujo para el diseño de la vida útil que está inspirado en el diagrama de flujo del boletín 34 del CEB [9]. En la literatura se encuentran otros modelos que podrían ser aplicados una vez validados siempre en coherencia con el nivel 1 [10,11].

3.1. Definición de niveles

Además de la estrategia de diseño para una durabilidad, para abordar la clasificación de los hormigones por su durabilidad es necesario primero contemplar todos los principales mecanismos de deterioro:

- Corrosión de la armadura:
 - Carbonatación: clases RC bajo, RC medio, RC alto (en lugar de poner una cifra que no está bien definida con un límite de tolerancia)
 - Cloruros: clases RSD bajo, RSD medio, RSD alto
- Deterioro del hormigón:
 - la acción hielo/deshielo: clases RF
 - la agresividad química: clases RA
 - la reacción árido-álcali

El método de verificación consistiría en la selección de materiales para un recubrimiento determinado en el caso de la corrosión de la armadura o unos materiales para resistir un determinado grado de agresividad. El método puede ser prescriptivo si los materiales y dosificaciones se definen en el proyecto o puede ser por prestaciones si lo que se define es el cumplimiento de un determinado ensayo indirecto de la durabilidad con su valor límite y correspondiente tolerancia (nivel 3) o bien mediante un ensayo directo cuyo resultado se introduce en una fórmula que tiene explícito el tiempo y permite por lo tanto calcular la vida útil.

3.2. Nivel 1 por dosificación del hormigón

El nivel 1 propuesto por el GEE-EC2 está basado en el cumplimiento de una dosificación del hormigón en base a la experiencia existente en nuestro país reflejada en la EHE-08 [3] y se resume en la tabla 4 a título de documento base. Este nivel debe ser considerado como punto de referencia y de calibración de los demás niveles debido a que es el único del que se tiene amplia experiencia.

Habría que recoger, tanto para hormigón armado como pretensado, todos los posibles niveles según las distintas clases de exposición; por ejemplo, del nivel 1.1 al 1.7 se encuentran las relaciones máximas agua/cemento y contenido mínimo de cemento especificados en la EHE-08 para los ambientes IIIa, IIIb y IIIc (cloruros de origen marino) así como para los ambientes IV, Qa, Qb, Qc, H, F y E, mientras que del nivel 1.8 al 1.11 se encuentran las relaciones máximas agua/cemento y contenido mínimo de cemento especificados en la EHE-08 para los ambientes IIa y IIb, relativos a la carbonatación, así como para el I correspondiente al ambiente libre de agresión. El nivel 1.12 corresponde únicamente al tipo I para un hormigón en masa.

3.3. Nivel 2 basado en el ensayo directo de la resistencia a la corrosión

La propuesta del JWG presenta al nivel 2 como la mejor estrategia para el diseño de un hormigón durable. Aún siendo en principio correcta esta suposición, como ya se ha mencionado no existe ningún método de ensayo directo de carbonatación y de resistencia al ingreso de los cloruros que sea rápido, sencillo y barato y que por ello permita que este enfoque se pueda utilizar en todos los proyectos de cálculo de estructuras de

Tabla 4
Propuesta para el nivel 1 de clasificación de la durabilidad del hormigón por dosificación del hormigón

Nivel	Criterio	Categorías	Relación agua/cemento máxima	Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)	Tipo de cemento
1	Dosificación del hormigón	1.1	< 0,45	300	El tipo de cemento se debe definir en cada país en función de las características climatológicas de éste
		1.2	< 0,45	325	
		1.3	< 0,45	350	
		1.4	< 0,50	275	
		1.5	< 0,50	300	
		1.6	< 0,50	325	
		1.7	< 0,50	350	
		1.8	< 0,55	300	
		1.9	< 0,60	300	
		1.10	< 0,60	275	
		1.11	< 0,65	250	
		1.12	< 0,65	200	

hormigón. Los ensayos son costosos en tiempo y necesitan de experiencia previa. En cuanto a los modelos son similares a los que ya se contemplan en el Anejo 9 de la EHE-08 [3]. Por tanto, el GEE-EC2 lo considera una alternativa para ganar mas experiencia y ser aplicado en el presente en infraestructuras muy singulares.

En cuanto a los ensayos contemplados (que la EHE-08 no define), es importante mencionar que ya existen a nivel europeo elaborados por el CEN/TC 104 [4,5] y han sido objeto reciente de un ensayo interlaboratorios entre 11 laboratorios europeos. El único añadido que los métodos actuales necesitan (y que debería especificarse en la EN 206) es la definición del número

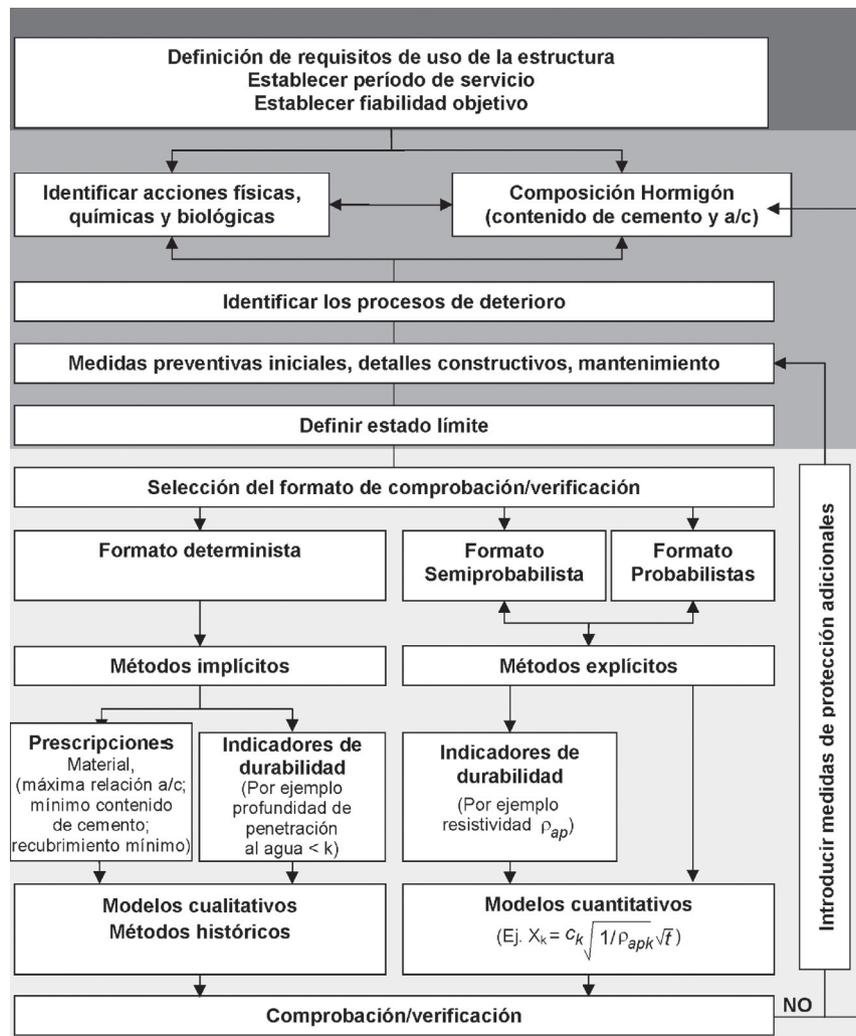


Figura 2. Esquema general de comprobación de la durabilidad propuesto por la UNE 83994-1 [8].

de ensayos a realizar, los valores límite y sus tolerancias para cada recubrimiento/tipo de ambiente y en el caso de la norma de difusión de cloruros, las edades a las que repetir el ensayo para tener “el factor de edad” del hormigón necesario para la predicción a largo plazo.

Por su parte, los modelos considerados para el caso de la carbonatación y la penetración de cloruros en el hormigón son los ya contemplados en el Anejo 9 de la EHE-08. En ambos casos se podría aplicar la siguiente solución de la segunda ley de Fick de difusión:

$$X = K * t^{0.5} \quad (1)$$

- X* Profundidad de carbonatación o de penetración de cloruros [mm].
K Coeficiente de carbonatación o de penetración de cloruros.

La propuesta española para este nivel es la de establecer distintas categorías en función de los coeficientes de carbonatación y de penetración de cloruros como se dan a título meramente de ejemplo en la tabla 5, de tal manera que permanezca como parámetro nacional el especificar los cementos más adecuados, ya que hay que tener en cuenta las diferencias climatológicas existentes entre los diferentes países y la experiencia con los cementos fabricados por cada país. Los valores de la tabla indicados para las distintas categorías son un ejemplo que necesita calibración.

3.4. Nivel 3 basado en el ensayo de un indicador indirecto de la corrosión

En el nivel 3, existe en España experiencia del ensayo de la penetración al agua del hormigón, si bien tiene un carácter sólo aplicable a los medios con cloruros. Actualmente, el único indicador indirecto de la corrosión del que se tiene experiencia probada de su relación con una determinada durabilidad es la resistividad del hormigón (tabla 6). Podría ser un método sencillo al ser de carácter no destructivo la medida, que como en el caso del nivel 2, requiere de personal con experiencia para poder emplearlo adecuadamente. Actualmente, este nivel se está empleando en la fabricación del hormigón para las nuevas esclusas del canal de Panamá [12] entre otras obras. El método de medida está normalizado por AENOR [13,14]. Los métodos de ensayo serán los especificados en las normas europeas elaboradas por el CEN/TC 104 que seguramente serán similares a las que ac-

tualmente hay en España y en algunas metodologías propuestas por la RILEM [15]. España ha comenzado a calibrar [16] este método con las dosificaciones establecidas en la EHE-08.

4. Propuestas del TC140/SC2 de AENOR en la revisión del Eurocódigo 2

Con motivo de la presente revisión del EC2, el GEE-EC2 ha presentado al subcomité de AENOR TC140/SC2 que proponga a través de su representante Alejandro Pérez (fig. 1) unas modificaciones al capítulo 4 sobre durabilidad, que ya integre la propuesta que debería simultáneamente hacerse a la EN 206 en los aspectos de durabilidad y que, debidamente respaldadas por el CTN-140/SC2, se resumen a continuación.

4.1. Tabla de clases de hormigón propuesta para la EN 206-1

La tabla 7 se ha presentado en los comentarios enviados oficialmente al CEN TC-250 que, respetando los principios descritos en las tablas anteriores 3 y 4 del *JWG TC-250/TC-104 - durability*, se han adaptado a la propuesta española de tres niveles de clasificación de los hormigones por durabilidad. Su contenido debe ser calibrado y adecuado pero sirve de ejemplo de lo que se propone.

4.2. Propuesta al EC2 sobre definición de vida en servicio y de recubrimientos

La definición de vida en servicio y recubrimiento se contempla en la norma EN 1992-1-1 y por ello la propuesta debería reflejarse en el nuevo contenido del capítulo 4.

Tabla 6
Propuesta para el nivel 3 basado en el cálculo de un indicador indirecto de la corrosión (caso de la resistividad eléctrica)

Nivel	Criterio	Categorías	Resistividad (Ω m) (1)
3	Indicador indirecto de la corrosión	3,1	>400
		3,2	200-400
		3,3	100-200
		3,4	50-100
		3,5	<50

(1) Valores que necesitan ser validados mediante ensayo y teniendo en cuenta el espesor de recubrimiento y la clase de exposición. Los valores de la tabla son un ejemplo que necesita su calibración [16].

Tabla 5
Propuesta para el nivel 2 basado en el cálculo de un indicador directo de la corrosión

Nivel	Criterio	Categorías	Coeficiente de carbonatación natural (mm/año ^{0.5}) (2)	Coeficiente de penetración de cloruros (mm/año ^{0.5}) (2)	Tipo de cemento
2	Indicador directo de la corrosión	2,1	< 1,4	< 6,0	(1)
		2,2	< 2,1	< 6,5	
		2,3	< 2,5	< 7,0	
		2,4	< 3,0	< 7,5	
		2,5	< 3,5	< 8,0	
		2,6	< 4,0	< 8,5	

(1) Parámetro nacional.

(2) Valores que necesitan ser validados mediante ensayo y que dependen de la concentración superficial de cloruros y del factor de edad.

Tabla 7
Propuesta española del CTN-140/SC2 al EC2 para implementarlo en la EN 206

Valores preliminares	Clase de resistencia a la carbonatación			Clase de resistencia a los cloruros			Clase de resistencia al hielo RF	
	RC			RSD				
	RC40 RC BAJA	RC30 RC MEDIA	RC20 RC ALTA	RSD75 RSD BAJA	RSD60 RSD MEDIA	RSD45 RSD ALTA	RF2 RF ALTA	RF10 RF BAJA
Clasificación por ensayos directos	CEN/TS 12390-10:2007: Testing hardened concrete, Determination of the relative carbonation resistance of concrete			CEN/TS 12390-11:2010: Testing hardened concrete, unidirectional diffusion concrete			CEN/TS 12390-XX	
CEM I (fck>40 MPa)	<0,60 >250 kg/m ³	<0,60 >275 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM I (fck<40 MPa)	<0,60 >275 kg/m ³	<0,60 >300 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,45 >300 kg/m ³	<0,45 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM II/A (-V, -P, -S) (fck>40 MPa)	<0,60 >250 kg/m ³	<0,60 >275 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,45 >300 kg/m ³	<0,45 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM II/A (-V, -P, -S) (fck<40 MPa)	<0,60 >275 kg/m ³	<0,60 >300 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,45 >325 kg/m ³	<0,45 >350 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM II/B (-V, -P, -S) & CEM II/A (-L, -LL)	<0,65 >250 kg/m ³	<0,60 >275 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,45 >300 kg/m ³	<0,45 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM III/A	<0,60 >250 kg/m ³	<0,60 >275 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM III/B	<0,60 >275 kg/m ³	<0,60 >300 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >350 kg/m ³		
CEM III/C	<0,60 >300 kg/m ³	<0,60 >320 kg/m ³	<0,55 >320 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >350 kg/m ³		
CEM IV/A	<0,65 >250 kg/m ³	<0,60 >275 kg/m ³	<0,55 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >325 kg/m ³	<0,50 >375 kg/m ³		
CEM IV/B	<0,60 >300 kg/m ³	<0,60 >320 kg/m ³	<0,55 >320 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >350 kg/m ³		
CEM V/A & CEM V/B	<0,60 >300 kg/m ³	<0,60 >320 kg/m ³	<0,55 >320 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >300 kg/m ³	<0,50 >350 kg/m ³		

4.3. Vida en servicio

Al igual que en la EHE-08 la vida en servicio se debe establecer en el proyecto con el fin de poder calcular el recubrimiento necesario en función de la calidad de hormigón requerida para un ambiente de exposición dado. Habitualmente, se emplean como datos de referencia 50 y 100 años.

4.4. Recubrimiento mínimo

El recubrimiento mínimo definido en el proyecto debe ser función de la vida en servicio elegida en el proyecto y de la clase de hormigón seleccionada para un tipo de exposición determinado (apartado 4.4.1.2. de la norma EN 1992-1-1).

La EHE-08, en el capítulo VII - Art. 37.2.4, da una tabla con dichos recubrimientos mínimos para cada ambiente de exposición en función de la vida en servicio de 50 ó 100 años, de que se trate de cementos CEM I u otros, de que las resistencias características del hormigón sean inferiores a 25 N/mm², estén en el intervalo de 25 < f_{ck} < 40, o sean superiores a 40 N/mm².

La propuesta española acepta el formato de tabla que ha propuesto el *JWG TC-250/TC-104 - durability* en cuanto a la definición de los recubrimientos mínimos en función de la vida en servicio y tipo de hormigón que debería incorporarse en la norma EN 1992-1-1 del Eurocódigo 2 y que se muestra en la tabla 8. Las discrepancias con esta tabla de la postura española son dos: 1) la denominación debería ser de “resistencia alta, moderada y baja” y no con cifras y 2) adicionalmente los valores mostrados en esta tabla deberían ser parámetros nacionales que tengan en

Tabla 8

Ilustración de las posibles clases mínimas de hormigón recomendadas y los recubrimientos mínimos

Clase de Exposición	Clase de resistencia al ambiente (mínimo) NDP	Recubrimiento Mínimo c _{min,dur} (mm)	
		50 años de vida útil de proyecto	100 años de vida útil de proyecto
X0	RC40	cmin,b	cmin,b
XC1	RC30	15	25
XC2, XC3, XC4	RC20	25	35
XD1, XS1	RSD75	40	50
XD2, XD3, XS2	RSD60	40	50
XS3	RSD45	50	60

cuenta simultáneamente otras variables como la resistencia y el tipo de cemento utilizado tal y como recoge la EHE-08.

5. Conclusiones

Las conclusiones a modo de resumen son:

- El Grupo Espejo Español (GEE-EC2) en materia de durabilidad respaldado por el Subcomité 2 del CTN-140 de AENOR considera que el cambio en el capítulo 4 sobre Durabilidad del hormigón no puede ser drástico y debe tener relación con lo que existe hasta ahora (definición del hormigón por dosificación) a la vez que debe indicar otras formas de clasificación de los hormigones por durabilidad como se contempla en el Anejo 9 de la EHE-08.

- En cuanto a las clases de durabilidad del hormigón en base a niveles:
 - El nivel 1 debe contemplar la *especificación de la dosificación* del hormigón y debe ser considerado como el punto de referencia y de calibración de los demás niveles, debido a que es el único que se ha empleado hasta ahora y del que existe experiencia.
 - El nivel 2 debe considerar el *ensayo directo* y el *modelado de cada proceso de degradación del hormigón* en particular. Este nivel representa el enfoque prestacional avanzado y la consideración explícita del tiempo. Por ello, su utilización es recomendable en obras singulares y en aquéllas en las que se requieren vidas en servicio superiores a 100 años. Hay que destacar que es necesario personal muy especializado para poder aplicar este nivel, que hasta el momento carece de calibración superior a 20-25 años.
 - El nivel 3 de *indicadores indirectos* tiene la ventaja de ofrecer unas medidas rápidas y sencillas; sin embargo, es necesario que, tanto el personal que tome las medidas como el que las interprete, tenga una formación adecuada y experiencia. Asimismo, hay que mencionar la falta de calibración actual como en el caso de ensayos directos de durabilidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a los representantes mencionados en la figura 1 su trabajo para asegurar la coherencia de la postura española y a todos los miembros del subcomité 2 del CTN-140 de AENOR sus contribuciones y comentarios.

Bibliografía

- [1] EN 206-1. Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity.
- [2] EN 1992-1-1. Eurocode 2; Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings. 2010.
- [3] EHE-08. Instrucción Española del Hormigón Estructural. Ministerio de Fomento, España. 2008.
- [4] CEN/TS 12390-11:2010. Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete, unidirectional diffusion.
- [5] CEN/TS 12390-10:2007. Testing hardened concrete. Determination of the relative carbonation resistance of concrete.
- [6] Model Code 2010. *fib*. 2012.
- [7] Leivestad S. MEMO-JWG 250/104 N19E. Durability Exposure Resistance Classes, a new system to specify durability in EN 206 and EN 1992. 2011-04-29.
- [8] UNE 83994-1. Durabilidad del hormigón. Estrategia de comprobación de la durabilidad en niveles. Parte 1: Métodos de comprobación.
- [9] *fib* Bulletin 34, Model Code for Service Life Design. Federation Internationale du Béton, 2006.
- [10] Sanjuán MA, Andrade C, Cheyrezy M. Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*. 2003;4:171-80.
- [11] Andrade C, Tavares F, Fulla J, Izquierdo D. Probabilistic treatment of rebar depassivation and its influence in the calculation of structural limit states. VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8 Toledo Spain March 2013.
- [12] Andrade C, Rebolledo N, Castillo A, Tavares F, Pérez R, Baz M. Evaluación de mezclas de hormigón para el nuevo canal de Panamá mediante la medida de la resistividad y de la resistencia a la difusión de cloruros. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia. 2013.
- [13] PrUNE 83980. Ensayo de durabilidad del hormigón. Durabilidad del hormigón. Determinación de la absorción de agua, peso específico y porosidad accesible al agua del hormigón. Febrero 2013.
- [14] UNE 83988. Durabilidad del hormigón. Determinación de la resistividad eléctrica.
- [15] Polder R, Andrade C, Elsener B, Vennesland O, Gulikers J, Weidert R, et al. Test methods for on-site measurement of resistivity of concrete, RILEM TC 154-EMC: Electrochemical techniques for measuring metallic corrosion. *Materials and Structure*. 2000;33:603-11.
- [16] Andrade C, D'Andrea R. Electrical resistivity as microstructural parameter for the modeling of service life of reinforced concrete structures, 2nd Int. Symposium on Service Life Design for Infrastructures, Delft, Netherlands, 4-6 October 2010.