

## **Determinación del índice de fiabilidad $\beta$ de hormigones españoles sometidos a las clases de exposición XC y XS**

***Reliability index  $\beta$  determination from spanish concretes submitted to the XC and XS exposure classes***

### **Carmen ANDRADE PERDRIX**

Dr. Químico Industrial  
IETCC-CSIC  
Profesor de Investigación  
[andrade@ietcc.csic.es](mailto:andrade@ietcc.csic.es)

### **Miguel Ángel SANJUÁN BARBUDO**

Doctor en Ciencias Químicas  
IECA  
Jefe del Área de Cementos y Morteros  
[masanjuan@ieca.es](mailto:masanjuan@ieca.es)

### **Rosario MARTÍNEZ LEBRUSANT**

Doctora en Ciencias Químicas  
IECA  
Jefe del Área de Certificación y Hormigones  
[charoml@ieca.es](mailto:charoml@ieca.es)

### **Nuria REBOLLEDO RÁMOS**

Ingeniero Químico e Ingeniero Técnico Industrial  
IETCC-CSIC  
Ayudante de Investigación  
[nuriare@ietcc.csic.es](mailto:nuriare@ietcc.csic.es)

## **RESUMEN**

En el Código Modelo, MC2010, se han incluido recientemente unos modelos para la estimación de la durabilidad y la vida en servicio del hormigón estructural, los cuales se basan en algunas propiedades de transporte como lo es el coeficiente de difusión del agente agresivo. Además de los modelos, el MC2010 contiene un enfoque probabilista para realizar los cálculos relativos a la durabilidad del hormigón que han promovido un cierto interés para llevar a cabo la verificación de las especificaciones tradicionales utilizando modelos. En este artículo se ha realizado dicha verificación empleando unos 60 hormigones fabricados en diferentes lugares de España con los que se han realizado ensayos de carbonatación natural y penetración de iones cloruro por difusión natural, conforme con las normas europeas CEN/TS 12390-10 y CEN/TS 12390-11, respectivamente. El contenido de cemento estaba comprendido entre 275 y 500 kg y la relación agua/cemento entre 0,37 y 0,65. El hormigón se curó durante 28 días en cámara húmeda. Los resultados de carbonatación obtenidos en todos los hormigones se clasificaron y ordenaron de tal forma que cumplieran con las especificaciones de la norma europea de hormigones EN 206 en función de cada ambiente de exposición normalizado. Con relación a la resistencia a compresión, se observó una tendencia que iba desde los valores mínimo al máximo. Este enfoque también se puede adoptar en el caso de la velocidad de carbonatación. Se estudió el índice de fiabilidad ( $\beta$ ) para los valores mínimo y máximo de la velocidad de carbonatación para una vida en servicio nominal de 50 y 100 años. Se ha calculado el índice de fiabilidad  $\beta$ , con relación al frente de penetración del agente agresivo que llega a la armadura del hormigón, con la simulación de Montecarlo mediante la utilización de un modelo simplificado para el proceso de carbonatación y la función de error para modelar la difusión de los cloruros. Los resultados obtenidos muestran que los hormigones que cumplen con las clases de exposición estudiadas pueden presentar un amplio rango de valores del índice de fiabilidad  $\beta$ , lo que invita a seguir un procedimiento similar al que se sigue con la resistencia característica del hormigón para su evaluación. Por otro lado, la probabilidad de fallo por la depasivación del acero de la armadura del hormigón provocada por el

proceso de carbonatación de los hormigones armados puede variar ampliamente en todos aquellos que cumplen las especificaciones de la norma de hormigones (contenido de cemento y relación agua/cemento) para cada clase de exposición. Estos resultados permiten concluir que hacer clases con las velocidades de carbonatación no es una extrapolación directa como la clasificación por prescripciones.

## **ABSTRACT**

Models to estimate durability and service life of structural concrete, based in transport properties as the diffusion coefficient have been recently introduced in the fib Model Code 2010. Additionally to the models, MC2010 contains a probabilistic approach for durability estimations which have opened the interest to calibrate the traditional deemed-to-satisfy rules with respect to the modelling. In present communication that calibration is made in a set of about 60 different concretes prepared in different locations of Spain which have been tested to obtain their carbonation rate and chloride diffusion coefficient. For carbonation and chloride diffusion were applied the European standards: CEN/TS 12390-10 and CEN/TS 12390-11, respectively. The cement content used was between 275 kg and 500 kg and the w/c ratio was ranged between 0.37 and 0.65. They were cured 28 days in standardized conditions. Then they were submitted to different test methods. Carbonation rate values were calculated for all the concrete mixes and they were ranked by classifying the concretes fulfilling the EN 206 exposure classes. With regard to the compressive strength, there was found a trend from a minimum to a maximum value which could be classified taking into account the 95% statistical significance. This approach could be also considered for the carbonation rate. The reliability index  $\beta$  for the minimum and maximum values of the carbonation rate for nominal service life of 50 and 100 years was calculated. Using a simplified model for carbonation and the "error function" one for chloride ingress and through Montecarlo simulations, the reliability index (beta) with respect to the aggressive front reaching the bar position, has been calculated. The results enable to deduce that concretes complying with exposure classes may present a wide range of reliability indexes which call for a treatment similar to that of the characteristic 28-days compression strength. On the other hand, the failure to the steel depassivation promoted by carbonation of standard concretes may vary widely within those fulfilling the prescriptive rules of the mix proportioning for the studied exposure classes. These deductions allow us to conclude that the carbonation rates cannot be classified straight ahead as is the case of the prescriptive rules.

**PALABRAS CLAVE:** durabilidad, hormigón, modelos, fiabilidad, vida en servicio.

**KEYWORDS:** durability, concrete, models, corrosion, reliability, service-life.

## **1. Introducción**

Los deterioros prematuros que se han ido produciendo en las estructuras de hormigón en las dos últimas décadas ha promovido el interés por el uso de métodos predictivos de la vida útil. Así la EHE-08 (1) contiene un Anejo 9 que incorpora este tipo de modelos y el Código modelo MC2010 (2) también los ha incorporado con la novedad de permitir el tratamiento probabilista de los

parámetros contenidos en estos modelos. Sin embargo, estos modelos adolecen de falta de experiencia y por ello no están calibrados para plazos largos ya que se han empezado a utilizar desde hace tan solo unos 20-30 años, cuando, sin embargo, se pretenden usar para predicciones de 100 años en muchos casos.

Con el motivo de la revisión reciente del Eurocódigo 2 de hormigón (3) varios Comités del CEN y la Comisión 8 “Durabilidad” del fib han acometido diversos ejercicios comparativos con el fin de conocer mejor los parámetros controlantes en estos modelos y tratar de hacer evolucionar los conocimientos en la materia con la urgencia de tratar de introducir en la próxima revisión del Eurocódigo alguno de estos modelos. Uno de los ejercicios acometidos ha consistido (4) en calcular los índices de fiabilidad que resultan de aplicar estos modelos de avance del frente agresivo con respecto a los recubrimientos especificados en la actualidad para cada clase de exposición. Para ello se han supuesto los coeficientes de difusión de cloruros y las velocidades de carbonatación de las mezclas límite de hormigones especificadas en la EN 206 (5) para cada clase de exposición y se han establecido las funciones de estado límite con respecto a los espesores de recubrimiento, calculándose así las probabilidades de fallo resultantes y, con ello, sus índices de fiabilidad.

Aunque teóricamente es interesante, el ejercicio que se ha realizado en la Comisión 8 del fib carece sin embargo, de un interés práctico, pues los valores del coeficiente de difusión y de la velocidad de carbonatación se han supuesto y no se han obtenido con hormigones reales mas que en una serie muy limitada realizada con hormigones alemanes. Es decir, se ha atribuido un único valor del coeficiente o de la velocidad de carbonatación para un solo hormigón en cada clase de exposición. Es decir, los índices de fiabilidad así calculados son teóricos para ese valor supuesto por lo que no reflejan la variedad de hormigones posibles para unas relaciones a/c y contenidos de cemento que pueden variar dentro de cada clase de exposición.

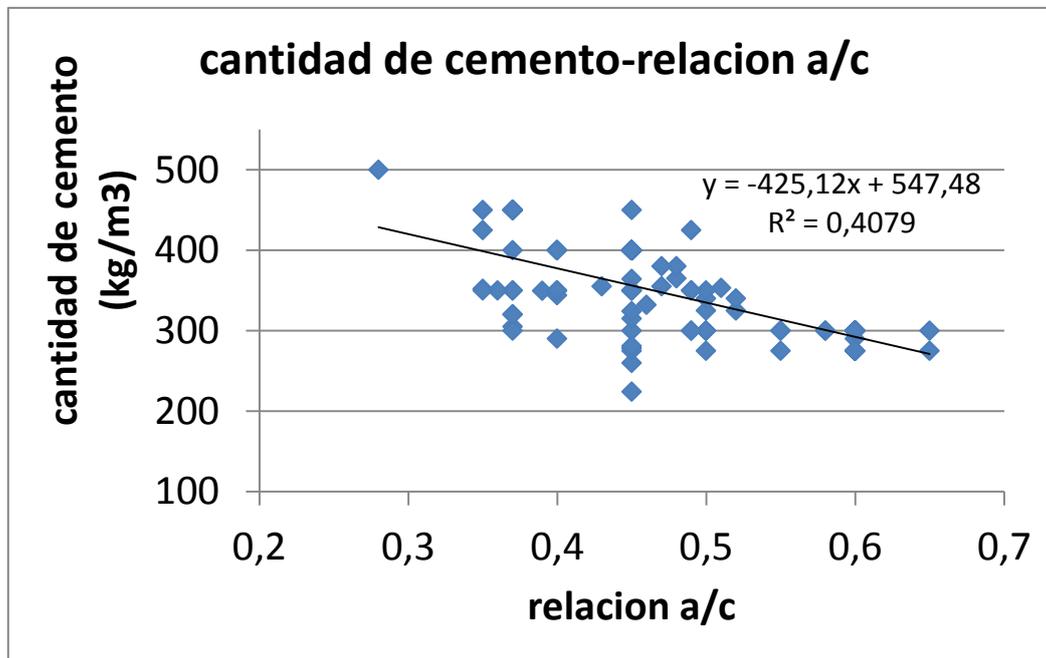
En el presente trabajo, se aportan resultados de unas 60-90 mezclas de hormigones fabricados en diversas regiones españolas que fueron ensayados usando las normas europeas para obtener los valores del coeficiente de difusión de cloruros y de carbonatación natural. Estos valores se han introducido en el modelo de la raíz cuadrada del tiempo para la carbonatación y de la ecuación de la función de error en el caso de los cloruros y los resultados estimados para 100 años se han comparado como función límite con los recubrimientos prescritos. De los resultados de las probabilidades de fallo se deduce que, al igual que con la resistencia mecánica, los hormigones que cumplen las especificaciones de una determinada clase de exposición pueden hacerlo con diversos márgenes de exceso y que la cuestión clave es adaptar los hormigones a los recubrimientos. Es decir, que en el caso de usar modelos, no es necesario hacer clases de exposición, sino fijar unas probabilidades de fallo y dejar variable el recubrimiento para poder cumplirlas.

## **2. Parte Experimental**

### **2.1. Hormigones ensayados**

Las mezclas de hormigón se prepararon por diversos fabricantes y laboratorios de 10 regiones españolas que cubrían toda la geografía del país. El contenido en cemento (Figura 1) se varió entre 224 kg/m<sup>3</sup> y 500 kg/m<sup>3</sup> y la relación a/c entre 0,37 y 0,65. Las mezclas se pueden considerar representativas de todos los tipos de hormigones fabricados en España incluidas algunas dosificaciones de elementos prefabricados. Las mezclas fueron curadas 28 días en las

condiciones de humedad y temperatura normalizadas y después fueron inmediatamente enviadas al IETcc para ser sometidas a los ensayos de Resistencia a compresión, carbonatación y de difusión natural de cloruros. Como se aprecia en la figura 1 hay una tendencia lógica a emplear una mayor relación a/c con cantidades decrecientes de cemento.



**Figura 1. Relación entre el contenido en cemento y al relación a/c de los hormigones ensayados**

Los ensayos se realizaron según las normas europeas CEN/TS 12390-11: 2009: "Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete. Unidirectional diffusion" (6) y CEN/TS 12390-10: "Testing hardened concrete – Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of the concrete" (7). El ensayo de carbonatación natural consistió en someter las probetas durante un año a la atmosfera exterior en una instalación protegida de la lluvia. Al cabo del año las probetas se analizan para ver la profundidad alcanzada por el frente carbonatado. La ecuación que se aplica es:

$$x_c(t) = v_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

El ensayo de difusión natural de cloruros dura 90 días a partir del cual, se lija de mm en mm la cara de la probeta que ha estado en contacto con la solución de cloruros y se traza el perfil a partir del cual se determina el coeficiente de difusión ajustando la ecuación 2.

$$C(x, t) = C_s \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \quad (2)$$

Adicionalmente, se determinó la resistividad eléctrica según la norma española UNE 83988-1 y -2 por el método de las 4 puntas (8) en las probetas de resistencia a compresión inmediatamente antes de realizar este ensayo por lo que las probetas estaban saturadas de agua.

Las mezclas límite consideradas han sido para este ejercicio las de la EN 206 (5) cuyos valores, incluidos los recubrimientos se dan en la tabla 1.

CLASE DE EXPOSICIÓN	CARBONATACIÓN					CLORUROS				
	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3
Máxima relación a/c	0,65	0,60	0,55	0,50	0,5	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45
Mínimo contenido de cemento	260	280	280	300	300	320	340	300	320	340
Espesor recubrimiento (para S4)	15	25	25	30	35	40	45	35	40	45
Resistencia a compresión	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45

**Tabla 1 Requisitos de la En 206 según las clases de exposición**

## 2.2. Cálculos de fiabilidad

La función de estado límite de despasivación empleada para el caso de la carbonatación y de la penetración de los cloruros supone que el espesor carbonatado o la profundidad de la concentración crítica de cloruros en el tiempo de la vida útil son menores que el espesor de recubrimiento:

$$c - x_{CO_2,ct} \geq 0 \quad (1)$$

Los cálculos de la probabilidad de despasivación y del correspondiente índice de fiabilidad “ $\beta$ ” se han realizado mediante simulación de Montecarlo sobre una hoja Excel de la que en la Figura 2 se muestra el caso de la carbonatación.

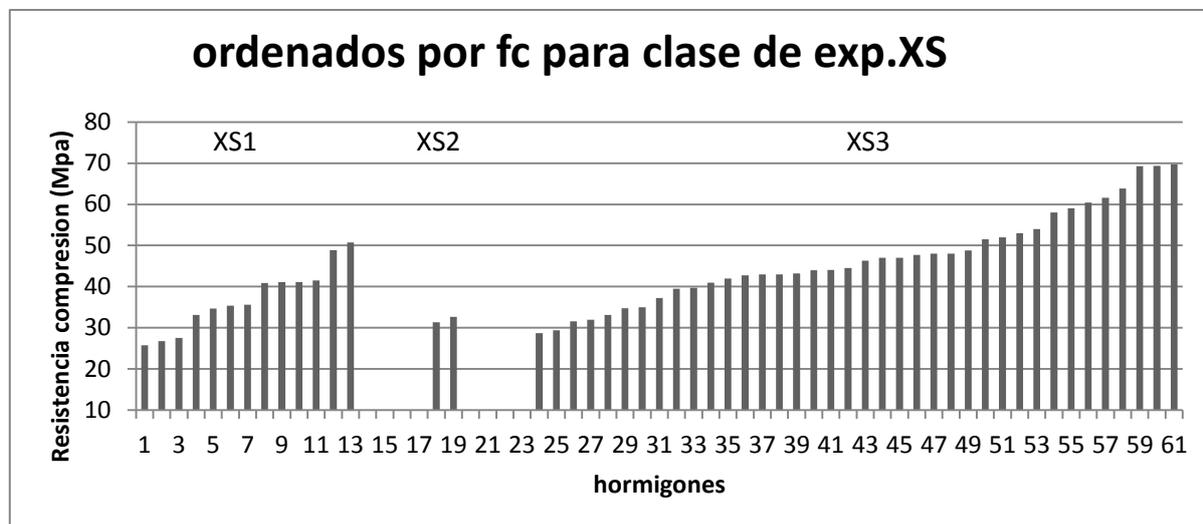
MODELO DE CARBONATACIÓN $v_t$						
$x(t) = v_{carb} \cdot \sqrt{t}$						
PARÁMETROS DE ENTRADA						
Parámetro	$\mu$	$\sigma$	COV	Unidad	Tipo de variable	Descripción
$v_{carb}$	10,51	3,153	0,30	mm/año	Normal	Velocidad de carbonatación
c	25	3,75	0,15	mm	Lognormal	Recubrimiento
t	50	-	-	años	Constante	Vida útil de diseño
RESULTADOS OBTENIDOS						
Número de simulaciones MC: 10.000						
Función profundidad de carbonatación						
<b>Pf</b>		<b>98,7%</b>		74,06	PROMEDIO	
				22,24	DES. ESTÁNDAR	
				0,30	COV	
				-2,18	ÍNDICE FIABILIDAD	

**Figura 2. Hoja Excel con al simulación de Montecarlo para el cálculo de la probabilidad de despasivación en el caso del ataque por carbonatación**

## 3. Resultados

Los valores de resistencia a compresión a 28 días, resistividad, carbonatación y coeficiente de difusión de cloruros se ordenaron según las relaciones a/c y los contenidos de cemento que cumplían las especificaciones de la tabla 1, resumen de los requisitos de la EN-206. Esta ordenación se hace mediante la identificación de la relación a/c y contenido en cemento de tal

forma que se cumplan los límites de la tabla 1. Así, todos los hormigones que tengan una relación  $a/c < 0,45$  serán clase XS2 y XS· y serán XS2 los que tengan más de 320 kg de cemento y XS3 los que tengan  $> 340$  kg. Cada hormigón se clasifica en una sola clase, la más demandante. Hay mezclas de hormigón que no cumplen los requisitos de ninguna clase y se llamaran como “no cumplen”.



**Figura 3. Hormigones ordenados según las clases de exposición de la norma En 206**

No se presentan todas las figuras por razones de espacio pero sí las que son más representativas. Así, en la Figura 3 se muestran los valores de resistencia mecánica ordenados según las clases de exposición XS. Los valores varían de unos valores mínimos (que deberían cumplir los especificados en la tabla 1, sin embargo algunos hormigones no llegan al valor mínimo de C30) hasta valores muy elevados. Es decir, no hay un único valor para los hormigones que cumplen los requisitos sino que muchos de ellos superan el límite mínimo. Esto es debido a que no se limitan los valores máximos de resistencia y lo que importa es que estadísticamente, se cumpla que la resistencia tenga una probabilidad del 95% de cumplir con los valores límite.

De estos resultados se desprende que, como es conocido, no hay una buena relación entre los requisitos de mezcla y las propiedades (en este caso resistencia a compresión) como se confirma en las Figuras 4 y 5. Así, aunque hay una tendencia lógica entre la resistencia y la relación  $a/c$  o el contenido en cemento, el coeficiente de regresión es muy bajo y, por ejemplo, para una relación  $a/c$  de 0,45 o un contenido de cemento de  $350 \text{ kg/m}^3$  las resistencias presentan una amplia variación. Ello es debido a que la resistencia a compresión depende también de otros factores como puede ser la clase de resistencia del cemento. Por ello, no se puede solicitar un hormigón fijando los tres aspectos: resistencia, relación  $a/c$  y contenido en cemento. Unos son composición de la mezcla y el otro es una propiedad resultante (prestación).

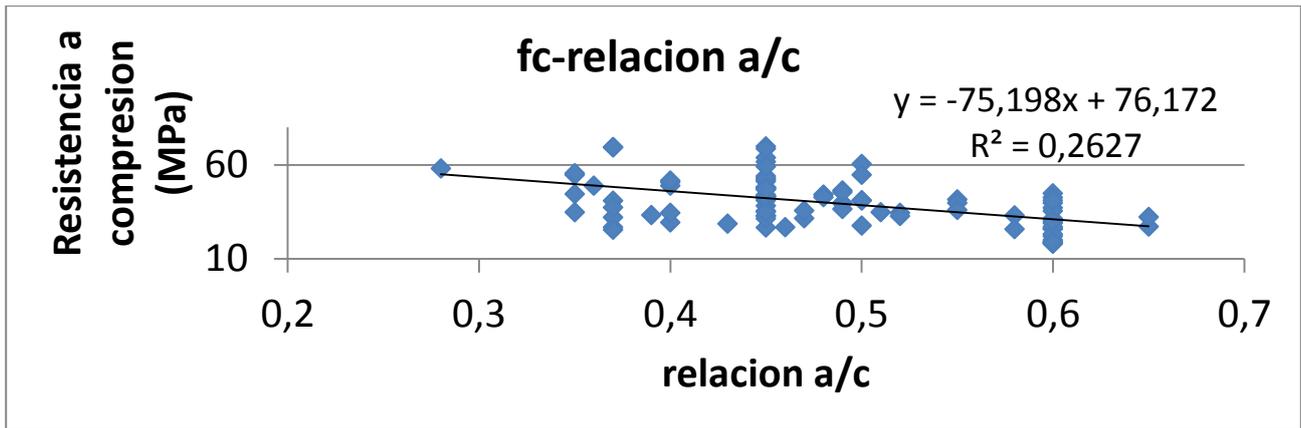


Figura 4. Relación entre la Resistencia a compresión y la relación a/c.

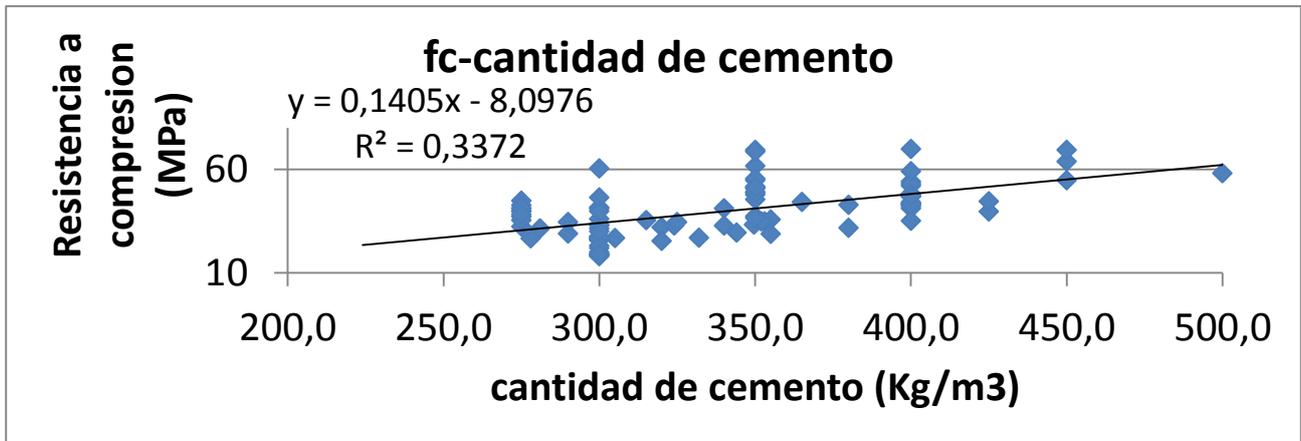


Figura 5. Relación entre la resistencia a compresión y el contenido en cemento

Lo mismo ocurre con el resto de propiedades medidas como son la resistividad, y las velocidades de carbonatación y coeficiente de difusión de cloruros que se muestran en las Figuras de la 5 a la 8 (no se representan todas por razones de espacio). La principal diferencia es que, en el caso de estas propiedades, no hay fijado un límite que permita el cálculo estadístico de cumplimiento o no. Es decir no están acordados los límites que permitirían aceptar un hormigón con una determinada probabilidad que de estos hormigones cumplen los requisitos de vida útil.

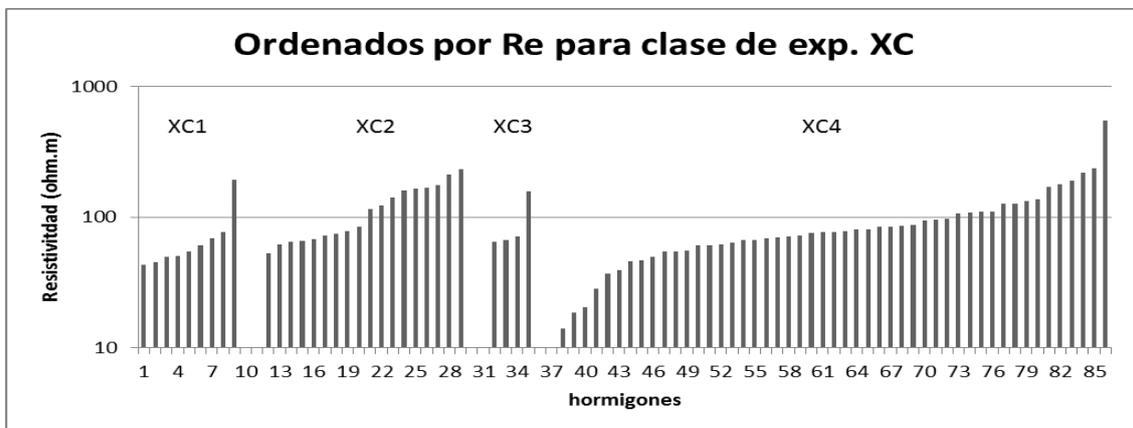


Figura 6. Hormigones ordenados por resistividad eléctrica para las clases de exposición de la EN 206 para la clase de exposición de carbonatación.



Figura 7. Hormigones ordenados por velocidad de carbonatación según las clases de la EN 206

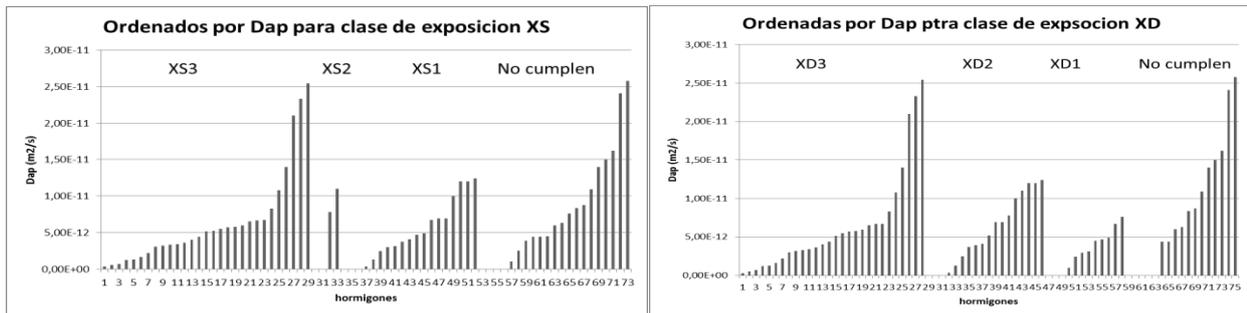


Figura 8. Hormigones ordenados por coeficiente de difusión de cloruros para las clases de exposición en agua de mar

#### 4. Discusión

Para poder analizar cuáles serían los valores límite, se toma como ejemplo el caso del ambiente de cloruros en agua de mar (clase XS) y se procede a calcular la probabilidad de que el contenido crítico de cloruros llegue al nivel de la armadura a los 50 ó 100 años para dos factores de edad (*aging*). Así, en la Figura 9 se representan los valores del índice  $\beta$  tomando los valores mínimo y máximo del coeficiente de difusión y los factores de edad de 0,01 y 0,5 de los hormigones que se habían ordenado en cada clase de exposición.

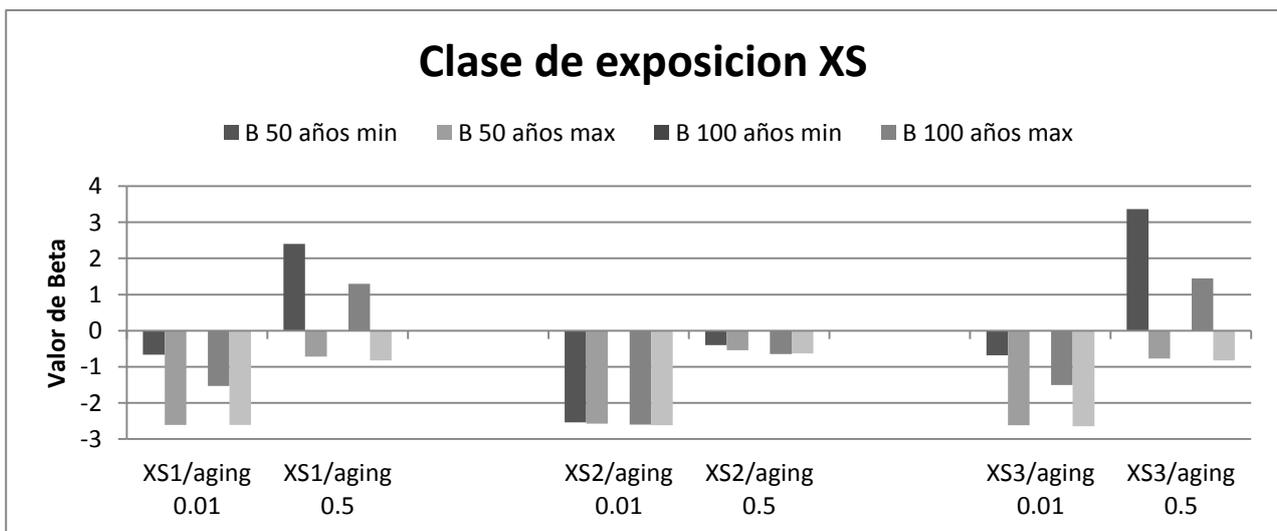


Figura 9. Valores del coeficiente de seguridad  $\beta$  para los valores mínimo y máximo y los coeficientes de edad (*aging*) para vidas útiles de 50 y 100 años

Puede comprobarse que la probabilidad de fallo es muy alta para los valores máximos de coeficiente y muy baja para los valores mínimos. Por tanto, no existe un factor de fiabilidad único que pueda caracterizar a toda la clase de exposición y que un mismo hormigón cumpliría si se cambia el espesor de recubrimiento. Por ello, el nivel de fiabilidad se puede fijar con el espesor de recubrimiento y tratar de caracterizar las especificaciones prescriptivas con un valor único del factor de seguridad  $\beta$  resulta ficticio. Ello es debido a que estas especificaciones nacieron en su día para asegurar unos valores mínimos de Resistencia mecánica pero no tienen una relación biunívoca con ella como se deduce de las Figuras 4 y 5. Además, se han modificado cuando se ha introducido la necesidad de asegurar una vida útil determinada lo que lleva en algunas clases de exposición a obtener resistencias a compresión mayores, de las que están especificadas como mínimas.

Por ello, no parece que sea necesario “calibrar” estos requisitos como se ha hecho en el documento del fib, sino que, para cada clase de exposición habría que fijar unos valores mínimos o máximos de esas propiedades como se hace en el caso de la resistencia a compresión, con una significación estadística. Pero, fijar esos valores límite no es tan sencillo por las siguientes razones:

- Los modelos para hacerlo no están calibrados a largo plazo. Las predicciones superiores a 30 años tienen un elevado grado de incertidumbre.
- En la actualidad el MC2010 indica una probabilidad de despasivación de aproximadamente el 10% a los 50 años (valor de  $\beta$  alrededor de 1,3), que a la luz de lo obtenido en los hormigones ensayados resulta muy estricto ya que lo cumplirían muy pocos hormigones, aptos sin embargo desde el punto de vista mecánico. Esta circunstancia indica la necesidad de revisar el estado límite tal y como se ha definido hasta ahora y, tal vez, dejar que sea un valor flexible en función de la importancia de la obra y las consecuencias del fallo. Mientras tanto, parece un valor más razonable el de una probabilidad de despasivación del 50% ( $\beta=0$ ) excepto cuando las consecuencias del fallo sean elevadas.

Finalmente comentar que cada vez es más frecuente la demanda de estimar la vida útil potencial de un hormigón y, por tanto, será más frecuente que se solicite el ensayo frente a la carbonatación y los cloruros que resultan ser ensayos costosos y largos. Es por ello por lo que un ensayo como la resistividad eléctrica, puede resultar muy recomendable dado que es de carácter no destructivo, de fácil realización y relativo bajo costo. La resistividad, al estar relacionada con el transporte de sustancias a través de la red de poros del hormigón, es un indicador indirecto muy prometedor de los ensayos directos de carbonatación y cloruros. El fijar unos valores mínimos con una significación estadística de forma similar a la resistencia mecánica, serviría de parámetro muy accesible indicativo de la futura vida útil del hormigón.

## 5. Conclusiones

1. Al ordenar los hormigones ensayados por cumplimiento de los requisitos de dosificación de mezcla resulta que, para cada clase de exposición, se produce una gama de valores. Esta gama es similar para la propiedades medidas de resistencias a compresión, resistividad, velocidad de carbonatación y coeficiente de difusión de cloruros que se solapan entre las distintas clases de exposición.

2. El cálculo de la probabilidad de despasivación frente a los espesores de recubrimiento también especificados aporta valores muy altos y bajos del factor de seguridad  $\beta$ . No existe un valor único del  $\beta$  para cada clase de exposición.
3. Habría que definir unos valores límite, al igual que se hace con la resistencia a compresión, para los requisitos de durabilidad.
4. Estos valores límite deberían cumplirse en el 95% de los hormigones para cada clase de exposición pero no deberían ser únicos, sino tener en cuenta la importancia de la estructura y las consecuencias del fallo (la corrosión de la armadura).

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen a los participantes en el proyecto CALIDUR financiado por el Código Técnico de la Edificación y en particular a Renata D'Andrea, parte de los datos usados en este trabajo.

### **Referencias**

- [1] EHE-08: Instrucción de hormigón estructural- Ministerio de Fomento, España (2008).
- [2] Model Code 2010 fib
- [3] EN 1992-1-1 (2010): Eurocode 2; Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings.
- [4] Commission 8 fib TG 8.3: "Operational document to support Service Life Design"
- [5] EN 206: Concrete — Part 1: Specification, performance, production and conformity.
- [6] CEN/TS 12390-11: 2009: Testing hardened concrete. Determination of the chloride resistance of concrete. Unidirectional diffusion.
- [7] CEN/TS 12390-10: Testing hardened concrete – Part 10: Determination of the relative carbonation resistance of the concrete.
- [8] UNE 83988-1 y -2: Durabilidad del hormigón. Determinación de la resistividad eléctrica.