



# Recubrimientos recomendables, por razones de durabilidad, a disponer en estructuras de hormigón sometidas a la clase específica de exposición Qb (ataque químico de intensidad media).

**Manuel Burón Maestro.** *Prof. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (IECA)*

**Jaime Carlos Gálvez Ruiz.** *Catedrático de Universidad. ETS. ICCP (UPM).*

**Jaime Fernández Gómez.** *Catedrático de Universidad. ETS. ICCP (UPM)*

**Pedro López Sánchez.** *Licenciado en Ciencias Químicas (INTEMAC).*

**Renata D'Andrea.** *Doctor Ingeniero Civil (IECA).*

**Miguel Ángel Sanjuán Barbudo.** *Doctor en Ciencias Químicas (IECA)*

## 1. Introducción

Es una realidad cada vez más aceptada que la durabilidad del hormigón es una propiedad igual de importante que la resistencia mecánica o la estabilidad de volumen. No es el objeto del presente trabajo ahondar en las causas de esta evidencia sino en contribuir a hacer del diseño de la durabilidad una materia incorporada al quehacer diario de los técnicos y especialistas. Solo si la durabilidad de una estructura se puede proyectar y verificar, será posible conseguir vidas útiles con una cierta garantía o seguridad en que se alcanzarán los periodos de servicio que se especifiquen.

En el diseño de la durabilidad se ha dedicado mucho tiempo en el pasado a aclarar los mecanismos de ataque (por ejemplo: por sulfatos o por reacción árido-álcali) o como realizar ensayos acelerados en estos casos y también en el caso concreto de la corrosión de la armadura. En el caso de la corrosión, la envergadura de los costes de reparaciones ha estimulado la publicación de modelos y ensayos que, si bien necesitan todavía calibración, al menos suponen una cierta ayuda para el proyectista.

Sin embargo, en el caso del ataque químico en general o del ataque por ácidos, la bibliografía es extensa en presentar muchos resultados de ensayos, pero no se ha planteado en la normativa unos métodos de ensayo que permitan calificar la resistencia del hormigón

a pesar de que tanto nuestra Instrucción EHE-08 como las normas correspondientes del CEN plantean una clasificación muy concreta de agresividad del ambiente.

En el presente trabajo se trata de aportar algunas reflexiones y sugerencias sobre como valorar la resistencia del hormigón que está en contacto con la clase Qb de nuestra Instrucción EHE-08.

La Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 incluye, en su Artículo 8.2.3, las clases específicas de exposición ambiental en relación con otros procesos de degradación distintos de la corrosión de las armaduras, entre los que se encuentra la correspondiente al ataque químico (clase específica Q).

Según la agresividad del ataque químico: débil, medio o fuerte, se establecen las clases específicas de exposición designadas como Qa, Qb y Qc, respectivamente, caracterizadas por los parámetros y valores de las mismas recogidos en la Tabla 8.2.3.b de la citada Instrucción EHE-08.

Desde el punto de vista de las estrategias de durabilidad, el recubrimiento mínimo a disponer en el dimensionado de las estructuras de hormigón sometidas a la clase específica Qa está definido, en función del tipo de cemento o adición utilizado en la fabricación del hormigón correspondiente, como se recoge a continuación (Tabla A), incluyendo la equivalencia de los cementos CEM II/A-V, A-S y A-P recogida en los Comentarios al Artículo 37.2.4.1 de dicha Instrucción EHE-08.

Para el resto de tipos de cemento, la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 indica que serían necesarios recubrimientos excesivos. Así mismo, para las clases específicas de exposición Qb y Qc indica que el

■ **Tabla A.**

Recubrimientos mínimos en (mm)			
Clase específica de exposición	Tipo de cemento	Vida útil de Proyecto (años)	
		50	100
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM II/A-V, A-S y A-P (en estos tres tipos de cementos*) el porcentaje de adición deberá ser superior al 16%), CEM II/B-M (S, P, V) y CEM II/A-M (S, P, V) con un porcentaje de adición superior al 16%, u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.	40	55

Nota: En el caso de los cementos CEM II/A-P y CEM II/A-M (S, P, V) las puzolanas deberán cumplir las condiciones requeridas para el índice de actividad resistente.  
(\*) Ver comentarios del Artículo 37.2.4.1 de dicha Instrucción EHE-08.

■ **Tabla B.**

Parámetro de dosificación	Tipo de Hormigón	Clase de exposición
		Qb
Máxima relación a/c	Masa	0,50
	Armado	0,50
	Pretensado	0,45
Mínimo contenido de cemento c (kg/m <sup>3</sup> )	Masa	300
	Armado	350
	Pretensado	350

Autor del proyecto deberá fijar estos valores de recubrimientos mínimos y, en su caso, medidas adicionales, al objeto de que se garantice adecuadamente la protección del hormigón y de las armaduras frente a la agresión química concreta que se considere.

El hormigón para hacer frente a la clase específica Qb debe ser fabricado con una dosificación tal que, en ella, la cantidad de cemento sea igual o superior a la cantidad (c) indicada en la Tabla B, que también indica el valor máximo de la relación agua/cemento (a/c) que puede utilizarse en dicha dosificación. Ambos valores de acuerdo con la Tabla 37.3.2.a de la Instrucción EHE-08.

## 2. La clase de exposición específica Qb

La clase de exposición específica Qb está caracterizada en la Instrucción EHE-08 como se recoge a continuación (Tabla C).

Se observa que la Tabla C considera que el ataque químico que puede degradar el hormigón se debe a la acción de diferentes agentes agresivos que se pueden agrupar en dos: la acción de aguas que producen disolución (pH o el CO<sub>2</sub> agresivo) o intercambio, y, por otro lado, el ataque por sulfatos presentes en las aguas o en el suelo.

En cuanto a la advertencia contenida en los comentarios del Artículo 8.2.3 de la Instrucción EHE-08, en relación con el contenido de cloruros, no debe entenderse como una agresión de clase

específica Q. El ataque por cloruros no forma parte de esta clase específica, ya que como tal ión no produce reacciones que dañen al hormigón, y está tratado por las clases generales de exposición III o IV y por el Artículo 37.3.6 de dicha Instrucción. Por ello, el mencionado ataque por cloruros no se aborda en este trabajo.

La resistencia del hormigón frente al ataque por sulfatos, tanto procedentes de las aguas como del suelo, que caracteriza la clase de exposición Qb, exige el empleo de cementos que deberán tener la característica adicional de resistencia a los sulfatos (SR). En estos casos el recubrimiento mínimo a disponer es el que corresponda a la clase general de exposición que sea aplicable o a otras clases específicas de exposición, distintas de la clase específica de exposición Qb, que sean de aplicación al caso concreto.

La única exigencia requerida por la clase específica de exposición Qb caracterizada únicamente por la presencia de sulfatos en las aguas o en el suelo, es, además de los parámetros de dosificación indicados en el apartado 1 de este documento, el empleo de cementos con características adicionales de resistencia a los sulfatos (SR).

La clase específica Qb está definida en la Instrucción EHE-08 del mismo modo que en la Norma EN-206 y en el Eurocódigo 2 lo está la clase XA2. Es una clase específica de ataque de agentes agresivos propios de suelos naturales y aguas subterráneas con baja velocidad, es decir, aguas 'cuasi-estáticas', y temperaturas comprendidas entre 5 °C y 25 °C.

■ **Tabla C.**

Tipo de medio agresivo	Parámetros	Tipo de exposición
		Qb
		Ataque medio
Agua	Valor pH, según UNE 83.952	5,5-4,5
	CO <sub>2</sub> agresivo (mg CO <sub>2</sub> /l), según UNE-EN 13.577	40-100
	Ión amonio (mg NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /l), según UNE 83.954	30-60
	Ión magnesio (mg Mg <sup>2+</sup> /l), según UNE 83.955	1.000-3.000
	Ión sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /l), según UNE 83.956	600-3.000
	Residuo seco (mg/l), según UNE 83.957	50-75
Suelo	Grado de acidez Baumann-Gully (ml/kg), según UNE 83.962	No se da en la práctica
	Ión sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /kg de suelo seco), según UNE 83.963	3.000-12.000

### 3. Características de los ataques químicos producidos por los diferentes agentes agresivos que caracterizan la clase específica de exposición Qb, a excepción del ataque por sulfatos

Como la resistencia al ataque por sulfatos ha sido tratada ya en el apartado anterior, se dedica este apartado a considerar la acción del resto de agentes agresivos incluidos en la clase específica Qb sobre el hormigón, al objeto de proponer las recomendaciones oportunas para hacer frente a sus consecuencias.

El resto de los ataques químicos a considerar deterioran el hormigón con independencia de que también, y simultáneamente, puedan difundirse los agresivos hacia el interior del hormigón, pudiendo llegar, si hubiera lugar a ello, a motivar la corrosión de las armaduras.

Los deterioros directos del hormigón se resumen en efectos de pérdida de masa, motivados por la disolución de las fases de la pasta de cemento. Como consecuencia de ella, una determinada profundidad de hormigón se disgrega por pérdida de la cohesión imprescindible entre sus componentes (áridos y pasta de cemento). Este tipo de deterioro se produce desde el exterior hacia el interior y es mucho más rápido que la difusión hacia el interior, a través de la masa del hormigón, de los agentes agresivos. De entre los agentes agresivos destacan, por el deterioro que producen en el hormigón, las disoluciones con un valor de pH, según UNE 83.952, comprendido entre 5,5 y 4,5. Este parámetro agresivo, de marcado carácter ácido, es generalmente más dañino que los demás considerados en la clase Qb.

Las disoluciones ácidas atacan al hormigón de modo diferente según su concentración, lo que se relaciona con el valor del pH, pero además resulta importante el anión acompañante del protón. Es decir el tipo de ácido. Los ácidos de tipo mineral, como el sulfúrico, producen además de la disolución de la pasta de cemento la precipitación de sulfatos y sulfoaluminatos de modo que si atacan al hormigón producen, además, otros deterioros en él. Salvo en zonas pantanosas localizadas, o en aguas en las que se desarrollan bacterias sulforreductoras no es frecuente que se encuentre el ácido sulfúrico en suelos naturales y/o aguas subterráneas.

En los suelos naturales y en las aguas subterráneas se suelen encontrar, diluidos, ácidos orgánicos. La afección que este tipo de ácidos produce sobre el hormigón suele ser menor que la correspondiente a los ácidos minerales ya que los compuestos resultantes del ataque suelen dar precipitados de sales cálcicas.

Los ácidos más agresivos serán aquellos que al disolver la pasta produzcan compuestos solubles que no precipiten, pues ello llevará a la completa disolución del material.

Como ya se ha dicho, la acción de las disoluciones ácidas producen deterioros del hormigón, por pérdida de masa, más significativos, de modo que la acción de disoluciones ácidas de pH comprendido entre 5,5 y 4,5 es la agresión que dimensiona el recubrimiento mínimo a disponer.

La consideración de esta circunstancia permite establecer el recubrimiento mínimo ( $r$ ) para la clase específica Qb como aquél que resulta necesario disponer para que el deterioro por pérdida de masa del hormigón no alcance, a lo largo de la vida útil de proyecto, la armadura dispuesta en la sección resistente.

### 4. Documentos de referencia. Comprobaciones y calibraciones. Determinaciones

Como documentos de referencia, empleados en este trabajo, se consideran los siguientes:

- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Ministerio de Fomento. España.
- "Model Code 2010". Fib (Federación Internacional del Hormigón).
- "Effect to concrete composition on resistance of concrete to acid attack". Robin E. Beddoe and Karl Schmidt. Technische Universität München. Alemania.

El Model Code 2010 determina la degradación por ácidos a partir de la variable `profundidad de ataque  $d$  (mm)'. El valor de `d' es la pérdida, expresada como profundidad de la sección de hormigón respecto a la superficie original, que ocasionan los agentes agresivos y se considera estimable a partir de la observación del resultado de los ataques siguientes:

- Ácidos minerales.
- Otros ácidos tales como: orgánicos, carbónico, amónico.

El modelo de deterioro empleado por el Model Code de 2010 relaciona el valor de `d' con la raíz cuadrada de la concentración del ácido `c (mol/l)' y toma la expresión:

$$d = k\sqrt{t \cdot c}$$

donde `t' es el tiempo y `k' es constante para un mismo tipo de hormigón.

En el año 2009, Beddoe y Schmidt publican en Alemania el resultado de sus estudios experimentales en los que, empleando un modelo de predicción  $d = k\sqrt{t \cdot c}$ , llegan a obtener los siguientes resultados:

- Tipo de hormigón ensayado:  
Cantidad de cemento = 350 kg/m<sup>3</sup>.  
Relación agua/cemento = 0,5.  
Tipo de cemento = CEM I.  
Tipo de árido = cuarcitas.
- Ataque con ácido acético por lixiviación estática:  
pH = 5,5.  
c = 0,033 mol/l.  
Deterioro d = 10 mm en 25 años por lixiviación estática.
- Ataque con ácido acético por lixiviación estática:  
pH = 4,5.  
c = 0,139 mol/l.  
Deterioro d = 10 mm en 5 años por lixiviación estática.

- Informan de la existencia de ataque con ácido sulfúrico por lixiviación dinámica con las características y el deterioro producido que se indican:

$$\text{pH} = 4.$$

La concentración 'c' en los ácidos minerales viene dada por  $\sqrt{10^{-\text{pH}}}$ .

Deterioro d = 5 mm en 1 año.

Los documentos b) y c) indican que en el caso de deterioro por pérdida de masa el modelo establecido como  $d=kt^p$  es representativo, con  $p = 0,5$ , si la parte de hormigón deteriorada se mantiene y que, si ésta desaparece por otra acción de tipo mecánico (por ejemplo: abrasión), el modelo de deterioro representativo puede llegar a establecer que  $p = 1$ , es decir el exponente 'p' que afecta a t puede variar entre 0,5 y 1 en función de que permanezca o se desprenda la capa del hormigón afectado.

La afección de pérdida de masa es un proceso de daño que los ácidos efectúan sobre la matriz del hormigón (pasta de cemento) alterando su capacidad para aglomerar los áridos debidamente y formar un único conjunto (hormigón). Si la parte deteriorada se ataca dinámicamente puede llegar a desprenderse de la parte de hormigón que aún no ha sido afectada, facilitando la futura agresión sobre ella.

En las condiciones de la clase específica Qb, correspondientes a suelos naturales y aguas subterráneas con baja velocidad y temperaturas comprendidas entre 5 °C y 25 °C, es válido el modelo con  $t^{0.5}$ .

Con dicho modelo y utilizando los resultados de los ensayos citados cuyo ataque se produce con ácido acético, se pueden comparar, a modo de calibración, dichos resultados con los recubrimientos mínimos indicados en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08.

El ensayo realizado con una disolución con  $\text{pH} = 5,5$  es comparable con la clase específica Qa y el ensayo realizado con una disolución con  $\text{pH} = 4,5$  es comparable con la clase específica Qb.

De la primera comparación se deduce que los valores de recubrimiento indicados en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08

$$\begin{aligned} r &= 40 \text{ mm para } 50 \text{ años,} \\ r &= 55 \text{ mm para } 100 \text{ años,} \end{aligned}$$

ofrecen ambos, un margen de recubrimiento sobre el valor estricto de los ensayos.

Hay que hacer notar que los ensayos están realizados sobre un hormigón con cemento tipo CEM I y la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 considera otros tipos de cementos cuyo comportamiento frente a la acción agresiva de ácidos es más resistente que la proporcionada por el cemento tipo CEM I, lo que deja claramente del lado de la seguridad la comparación realizada.

La comprobación-calibración, realizada en el caso comparable con la clase específica Qa, ha sido la siguiente:

$$\begin{aligned} d &= 10 \text{ mm en } 25, \\ \text{para } 50 \text{ años } d &= 10\sqrt{2} = 14,1 \text{ mm,} \\ \text{para } 100 \text{ años } d &= 10\sqrt{4} = 20,0 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Los valores requeridos como recubrimiento mínimo para la clase específica Qa en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 son:

$$\text{para } 50 \text{ años } r = 40 \text{ mm.}$$

Lo que establece un margen en la Instrucción EHE-08, sobre el valor del ensayo, del orden de 25 mm,

$$\text{para } 100 \text{ años } r = 55 \text{ mm.}$$

Lo que establece un margen en la Instrucción EHE-08, sobre el valor del ensayo, del orden de 35 mm.

El ensayo realizado con ácido acético en disolución con  $\text{pH} = 4,5$  permite determinar el recubrimiento mínimo para la clase específica Qb,

$$\begin{aligned} d &= 10 \text{ mm en } 5 \text{ años,} \\ \text{para } 50 \text{ años } d &= 10\sqrt{10} = 31,6 \text{ mm,} \\ \text{para } 100 \text{ años } d &= 10\sqrt{20} = 44,7 \text{ mm.} \end{aligned}$$

Valores con los que, añadiendo el margen suplementario análogo al que tienen los valores correspondientes a la clase específica Qa en la Tabla 32.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 obtenidos con la comprobación-calibración anterior, se llega a:

$$\begin{aligned} \text{recubrimiento mínimo } r &\text{ para } 50 \text{ años } r = 55 \text{ mm,} \\ \text{recubrimiento mínimo } r &\text{ para } 100 \text{ años } r = 80 \text{ mm.} \end{aligned}$$

En relación con la información aportada referente al ataque con ácido sulfúrico y considerando, dada la agresividad contrastada de este tipo de ataque, que se puede haber empleado un modelo de representación más conservador con  $t^{0.75}$ , es posible realizar la siguiente comprobación-calibración de los valores de recubrimientos mínimos indicados en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 para la clase específica Qa:

$$\begin{aligned} d &= 5 \text{ mm en } 1 \text{ año, para } \text{pH} = 4. \\ \text{Para } \text{pH} &= 5,5 \text{ (clase específica Qa)} \end{aligned}$$

$$d = 5 \left( \frac{10^{-5.5}}{10^{-4}} \right)^{1/2} = 0,89 \text{ mm en } 1 \text{ año para } \text{pH} = 5,5.$$

$$\text{Para } \text{pH} = 5,5 \text{ (clase específica Qa)}$$

$$d = 0,89 \text{ mm en } 1 \text{ año,}$$

$$\text{para } 50 \text{ años } = 0,89 (50)^{0.75} = 16,7 \text{ mm,}$$

lo que establece un margen en la Instrucción EHE-08, sobre el valor de la información aportada, del orden de 25 mm.

$$\text{Para } 100 \text{ años } = 0,89 (100)^{0.75} = 28,1 \text{ mm,}$$

lo que establece un margen de la Instrucción EHE-08, sobre el valor de la información aportada, del orden de 25 mm también.

En todos los casos comprobados-calibrados, el denominado margen de la Instrucción EHE-08 es un espesor muy adecuado

para mantener los mecanismos de adherencia-rozamiento que son básicos para el adecuado comportamiento mecánico de la armadura.

Después de la comprobación-calibración realizada en la clase específica Qa, se puede, empleando un procedimiento análogo, aplicar la información aportada para deducir el recubrimiento mínimo para la clase específica Qb, cuando el agente agresivo es el ácido sulfúrico con pH = 4,5,

$$d = 5 \left( \frac{10^{-4.5}}{10^{-4}} \right)^{1/2} = 2,81 \text{ mm en 1 año para pH} = 4,5.$$

Para pH=4,5 (clase específica Qb)  
 d = 2,81 mm en 1 año,  
 para 50 años = 2,81 (50)<sup>0,75</sup> = 52,8 mm,  
 para 100 años = 2,81(100)<sup>0,75</sup> = 88,8 mm.

Valores con los que, añadiendo el margen suplementario análogo al que tienen los valores correspondientes a la clase específica Qa en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 obtenidos con la comprobación-calibración anterior, se llega a:

recubrimiento mínimo `r` para 50 años r = 80 mm,  
 recubrimiento mínimo `r` para 100 años r > 80 mm y, por tanto, se considera excesivo con el mismo criterio empleado por la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08.

Por otra parte, la influencia del tipo de cemento en el recubrimiento mínimo necesario para las clases específicas Qa y Qb es mucho menor que la que corresponde al valor del pH de la disolución ácida agresiva y considerando, además, que los ensayos anteriormente empleados han sido realizados con hormigones fabricados con cementos tipo CEM I, es suficientemente conservador aplicar los resultados obtenidos a los hormigones fabricados con los tipos de cemento indicados en la Tabla 37.2.4.1.c de la Instrucción EHE-08 y en el punto 1 de este artículo, es decir, tipos CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM II/A-V, A-S y A-P (con un porcentaje de adición superior al 16%), CEM II/B-M (S, P, V) y CEM II/A-M (S, P, V) (con un porcentaje de adición superior al 16%).

No obstante, al actuar de esta manera, también es posible ampliar dicha tabla indicando que para el resto de cementos es posible establecer, también de manera muy conservadora, valores de recubrimiento mínimo. Para ello es suficiente interpolar entre los valores anteriormente calculados, bien manteniendo las relaciones entre los resultados a las edades de 50 años y 100 años, para el mismo valor de pH, bien considerando el incremento, para una misma edad (50 años ó 100 años), entre el caso correspondiente al valor de pH = 5,5 y pH = 4,5.

De esta manera se puede completar la tabla citada (Tabla 37.2.4.1.c) en los casos correspondientes a las clases específicas Qa y Qb, tal y como se propone en el punto siguiente (5) de este artículo.

■ **Tabla D.**

Recubrimientos mínimos en (mm)			
Clase específica de exposición	Tipo de cemento	Vida útil de Proyecto (años)	
		50	100
Qa	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM II/A-V, A-S Y A-P (con porcentaje de adición superior al 16% en los tres últimos), CEM II/B-M (S, P, V) y CEM II/A-M (S, P, V) (con porcentaje superior al 16%), u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.	40	55
	Otros tipos de cemento	45	65 salvo si el agente agresivo es un ácido mineral, en cuyo caso:75
Qb	CEM III, CEM IV, CEM II/B-S, B-P, B-V, A-D, CEM II/A-V, A-S Y A-P (con porcentaje de adición superior al 16% en los tres últimos), CEM II/B-M (S, P, V) y CEM II/A-M (S, P, V) (con porcentaje superior al 16%), u hormigón con adición de microsílíce superior al 6% o de cenizas volantes superior al 20%.	55 salvo si el agente agresivo es un ácido mineral en cuyo caso: 80	80 salvo si el agente agresivo es un ácido mineral, en cuyo caso: (*)
	Otros tipos de cemento	65 salvo si el agente agresivo es un ácido mineral, en cuyo caso: (*)	(*)

-(\*) Significa que el recubrimiento mínimo resulta excesivo, entendiéndose como tal, superior a 80 mm.  
 -En el caso de los cementos CEM II/A-P y CEM II/A-M (S, P, V) las puzolanas deberán cumplir las condiciones requeridas para el índice de actividad resistente.

## 5. Propuesta de Tabla 37.2.4.1.c. AMPLIADA

La propuesta se recoge en la Tabla D.

Por las razones expuestas anteriormente, esta tabla resulta conservadora si se aplica a hormigones diseñados específicamente para esta clase de exposición por ataque químico, pudiendo optimizarse el recubrimiento del hormigón siempre que se diseñe el mismo adecuadamente, aportando prestaciones favorables para el objetivo a conseguir y se compruebe, mediante ensayos de pérdida de masa, que su comportamiento es satisfactorio y que permite la reducción del espesor del recubrimiento mínimo empleando modelos de representación como el indicado anteriormente.

## 6. Optimización del recubrimiento mínimo y prestaciones del hormigón que lo hacen posible

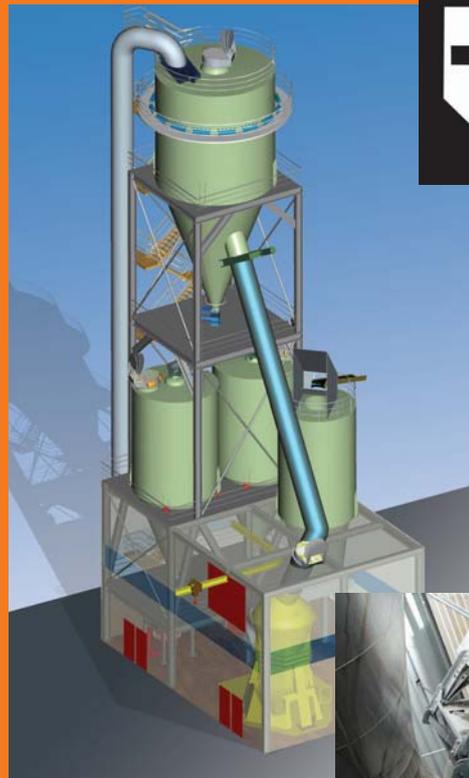
Además del empleo de los tipos de cemento recomendados, la compacidad del hormigón reduce el resultado del ataque de los agentes agresivos considerados en las clases específicas Qa y Qb.

La utilización de hormigones de altas prestaciones con sílice activa (microsílice) permite obtener una estructura interna del hormigón extraordinariamente compacta y cerrada, además de proporcionar una pasta de cemento menos sensible a los ataques considerados, al igual que ocurre cuando se emplean adiciones (S, P, V, D) en la composición de los cementos. Según Breit (2002), se recomienda un  $r'$  mínimo, en estos casos, en el rango de 20 a 30 mm.

En todos los casos la reducción de la relación agua/cemento mediante el uso de superplastificantes es muy eficaz para aumentar la compacidad del hormigón de modo muy relevante. El incremento de la cantidad de cemento por  $m^3$  de hormigón, especialmente de los tipos de cemento indicados como adecuados, también favorece, como es sabido, un mejor comportamiento del hormigón, ya que el incremento del volumen de pasta en el material favorece la colmatación de los poros de la microestructura y cierra las vías de acceso de los agresivos en su interior. También puede ser interesante comprobar, mediante ensayos de pérdida de masa, que el empleo de áridos calizos más sensibles a este tipo de ataques favorece un deterioro del hormigón más uniforme en la totalidad de las secciones afectadas, pero menos profundo al actuar los áridos calizos como material de neutralización de los ácidos atacantes.

Cuando los áridos no son sensibles al ataque ácido, el efecto de éste se concentra en la pasta de cemento, pudiendo ser el deterioro menos repartido en las secciones atacadas pero más concentrado en la pasta de cemento que rodea a los áridos, resultando un deterioro de dicha pasta más profundo que puede despegar los áridos y, en consecuencia, terminar produciendo un deterioro más intenso, que afecta a un mayor espesor de la sección y, por tanto, más grave. Este efecto favorable del empleo de los áridos calizos puede darse, de manera

# THORWESTEN VENT



## Seguridad en plantas de Molienda de Carbón

**Ofrecemos protección contra explosiones en las industrias, que típicamente usan polvo de carbón, polvo de lignito y coque de petróleo**

Desarrollamos conceptos completos de soluciones para la protección contra explosiones en la industria cementera, como por ej. la combinación compacta de separación y almacenaje de carbon pulverizado. Las compuertas de explosión Thorwesten Vent con cojín neumático, de la segunda generación y en sus diferentes ejecuciones brindan seguridad.

También suministramos paquetes de ingeniería y suministro de hardware para silos de combustible sólido incluyendo instrumentación de proceso y seguridad, filtro de silo, compuertas de explosión, sistemas de ayuda de descarga etc.

*Cuidamos su seguridad*

**THORWESTEN**  
VENT

THORWESTEN VENT GmbH

Daimlerring 39 • 59269 Beckum / Germany • Tel. +49 (0) 2521/9391-0  
thorwesten.vent@thorwesten.com • www.thorwesten.com

- ES IBERTEC, S.A. • Tel. +34(93) 241 1731 • m.dalbert@ibertecsa.com
- CO Ferrotec Industrial Ltda. • Tel. +57(1) 612 4588 • sales@ferrotec.com.co
- MX SERVIMEX • Tel. +52(55) 5393 2071 • gilberto.rodriguez@servimex.net
- PE Rubros e.l.r.l. • Tel. +51(1) 3 72 67 75 • rubros@infonegocio.net.pe
- AR ExCon-Explosion Controlada • Tel. +54(11) 4116 4797 • diego.k@explosioncontrolada.com
- NI MSIS - Morris Sallick Industrial Supplies, Inc. • Tel. +505 2266 2011 • rodrigo@msis.org

relevante, en situaciones en las que el agente ácido no se re-nueva con frecuencia y la alcalinidad del conjunto de la masa del hormigón interviene en las reacciones de neutralización. En otros casos, el efecto positivo de los áridos calizos también se considera, por ejemplo en el procedimiento de diseño basado en los trabajos de R.D. Pomeroy ("Design Manual Sulfide and corrosion prediction and control") que se utiliza para el dimensionado de tuberías de hormigón frente a la existencia de bacterias sulforreductoras.

La puesta en valor de las prestaciones favorables de hormigones diseñados adecuadamente y comprobados mediante ensayos de pérdida de masa, pueden reducir notablemente los valores de recubrimiento mínimo indicados en la tabla propuesta que resulta conservadora.

## 7. Conclusiones

El dimensionado del espesor del recubrimiento mínimo necesario para hacer frente a las clases específicas de exposición Qa y Qb puede abordarse como sigue:

- a) Cuando las clases específicas Qa o Qb estén caracterizadas únicamente por la presencia de sulfatos es necesario: cumplir con el contenido de cemento y la relación agua/cemento de la Tabla 37.3.2.a de la Instrucción EHE-08, fabricar el hormigón empleando cemento resistente a los sulfatos (SR), en el caso de la clase Qb, y disponer el recubrimiento mínimo que corresponda a la clase general de exposición, o a otra específica, que sea aplicable y no el indicado en la Tabla 37.2.4.1.c.
- b) En el resto de los casos que caracterizan las clases específicas Qa y Qb es necesario: cumplir con el contenido de cemento y la relación agua/cemento de la Tabla 37.3.2.a de la Instrucción EHE-08 y disponer el recubrimiento mínimo indicado en el punto 5 de este artículo, dentro de la Tabla 37.2.4.1.c AMPLIADA que se propone en el mismo.

Los valores de esta tabla se pueden reducir si el hormigón está fabricado y comprobado mediante ensayos de pérdida de masa (con carácter de ensayos de tipo), de manera que ofrezca prestaciones tales como:

- Mayor compacidad obtenida empleando una relación agua/cemento más baja que la obligatoria indicada en la Tabla 37.3.2.a de la Instrucción EHE-08, con el auxilio del empleo de aditivos superplastificantes.

- Mucha mayor compacidad si, además, se emplea sílice activa (microsílice, humo de sílice, nanosílice) como adición para obtener hormigones de altas prestaciones. En estos casos los recubrimientos mínimos para la clase específica Qb están en el rango de 20 mm a 30 mm, lo que representa recubrimientos del orden, o ligeramente superiores, a los recubrimientos mínimos requeridos por razones mecánicas.
- Un elevado grado de alcalinidad aportado por los áridos calizos, en la medida en que se constate, mediante ensayos, la eficacia del contenido de carbonato cálcico equivalente ( $\text{CaCO}_3$ ) del conjunto de la masa del hormigón frente a las condiciones del ataque ácido correspondiente.

El estudio de optimización de soluciones adecuadas al dimensionar el hormigón estructural para hacer frente a la clase Qb es de especial interés ya que pueden existir diversas soluciones, todas ellas adecuadas en función de los materiales y las dosificaciones con las que se fabrica el hormigón, el recubrimiento a disponer y las diferentes combinaciones a que dan lugar.

## Bibliografía

- Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. Ministerio de Fomento. España (2008).
- "Model Code 2010". Fib. (Federación Internacional del Hormigón). (2010).
- Robin E. Beddoe and Karl Schmidt. "Effect to concrete composition on resistance of concrete to acid attack". Technische Universität München. Alemania. (2009).
- Wolfgang Breit. "Acid resistance of concrete. Research Institute of the Cement Industry. Düsseldorf". Alemania. (2002).
- Cembureau Recommendation. "Use of concrete in aggressive environments" (1978).
- F. R. McLaren, Environmental Engineering. Inc.. "Design Manual Sulfide and corrosion prediction and control". American Concrete Pipe Association. USA (1984).
- Biczok. La corrosión del hormigón y su protección. (1981).

# *TUDELA*