

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2020
<https://doi.org/10.33586/hya.2020.2267>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

DURABILIDAD DEL HORMIGON POR ATAQUE ÁCIDO EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES. CASOS PRÁCTICOS DE DIAGNÓSTICO Y EFICACIA DE LAS REPARACIONES

Pedro López Sánchez

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2267>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo, hasta ser incluido en un número, debe ser citado así:

Pedro López Sánchez, (2020) DURABILIDAD DEL HORMIGON POR ATAQUE ÁCIDO EN ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES. CASOS PRÁCTICOS DE DIAGNÓSTICO Y EFICACIA DE LAS REPARACIONES, *Hormigón y Acero*, Avance online, doi: <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2267>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2020 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

Durabilidad del hormigón por ataque ácido en estaciones depuradoras de aguas residuales. Casos prácticos de diagnóstico*

*Durability of the concrete due to acid attack in waste-water treatment plants. Practical cases of diagnosis***

Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma^a, Pedro López Sánchez^b

^aDr. Ing. de Caminos Canales y Puertos. Jefe del Departamento de Patología de INTEMAC

^bDr. en Ciencias Químicas. Director del Laboratorio Central de INTEMAC

RESUMEN

En este artículo se presentan las consideraciones técnicas obtenidas en estudios experimentales para el diagnóstico de los daños detectados en los paramentos de hormigón de diversas estaciones depuradoras de aguas residuales. Los resultados evidencian que generalmente el severo deterioro superficial observado en los paramentos emergidos es debido a la degradación producida por un ataque ácido generado por los procesos de digestión bacteriana del tratamiento biológico de las aguas residuales. También se evalúan los ensayos idóneos para el diagnóstico y la validez de las especificaciones aplicables para el diseño de la durabilidad frente al ataque ácido.

ABSTRACT

This paper presents the conclusions of experimental studies carried out for the diagnosis of the damages detected in concrete elements of various wastewater treatment plants. The results show that generally the severe surface deterioration observed in the concrete upper of the water level is due to the degradation produced by an acid attack generated by the bacterial digestion processes of the biological treatment of wastewater. The suitable tests for diagnosis and the validity of regulatory requirements for the design of durability against acid attack, are also evaluated.

PALABRAS CLAVE: estación depuradora, ataque ácido, reparación, ensayos, durabilidad, hormigón

KEYWORDS: wastewater plant, acid attack, repair, tests, durability, concrete

1. Introducción

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios experimentales en el Laboratorio Central de INTEMAC para el diagnóstico de los daños detectados en los paramentos de hormigón de los distintos elementos por los que circulan y en donde se procesan las aguas residuales en las estaciones depuradoras: pozos y galerías de circulación y

retorno, decantadores, canales de reparto, reactores biológicos, depósitos de fangos, etc. Estos elementos están sometidos a una degradación física (debido a la abrasión ocasionada por los sólidos en suspensión contenidos en el fluido circulante) y química (por los agentes químicos disueltos en el agua que resultan potencialmente agresivos al hormigón).

La agresividad de las aguas y lodos evaluada en las plantas de tratamiento de aguas residuales suele corresponder, según la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, a la de las clases específicas de exposición Qb (ataque medio) debido a los contenidos de sulfatos y Qc (ataque fuerte) por los de ion amonio y CO₂ agresivo. En la Tabla 1 se indican los parámetros correspondientes a estos tipos de agresividad química de acuerdo con el Art. 8.2.3.[1] de la EHE-08, que define los requisitos aplicables para la clasificación de la agresividad química de las aguas que vayan a estar en contacto con el hormigón.

Tabla 1. Agresividad química en aguas residuales.

Parámetro	Grado de agresividad (clase específica de exposición)		
	Débil (Qa)	medio (Qb)	Fuerte (Qc)
NH ₄ ⁺ (mg/l)	15 – 30	30 - 60	> 60
CO ₂ agresivo (mg/l)	15 – 40	40 - 100	> 100
SO ₄ ⁼ (mg/l)	200 – 600	600 – 3.000	> 3.000

En muchos casos el nivel de deterioro de los hormigones inspeccionados y analizados es muy superior al que sería ocasionado por estos agentes agresivos considerando el tiempo de vida en servicio de las estructuras.

En la mayor parte de las inspecciones ha resultado evidente que el severo deterioro superficial observado en los paramentos emergidos de algunos de los elementos del hormigón originalmente ejecutados, así como de los morteros de reparación eventualmente aplicados, es compatible con la degradación producida por un ataque ácido de estos materiales fabricados con cemento portland. El agente agresivo causante del deterioro es el ácido generado por procesos metabólicos bacterianos producidos durante el tratamiento biológico de las aguas residuales. En la Figura 1 se presenta el aspecto de una bóveda del digestor de una

estación depuradora de aguas residuales (EDAR) con este tipo de deterioro.



Figura 1. Ataque ácido en bóveda de digestor.

2. Tipos de deterioro

Debido a la diferente intensidad, localización y extensión de la degradación del hormigón en función del tipo de ataque, se han particularizado los tipos de deterioro originados por la agresividad de los fluidos circulantes en las plantas de tratamiento de aguas y los originados por el ácido de origen biogénico.

2.1 Degradación por la composición de las aguas agresivas

Un ataque por ion amonio o CO₂ agresivo disuelto en los fluidos circulantes de las plantas de tratamiento de aguas residuales suele ocasionar un deterioro superficial del hormigón en los paramentos directamente expuestos al agua residual en las zonas permanentemente sumergidas. Esta degradación se limita a espesores reducidos (del orden de 1 o varios milímetros) más allá de los cuales el hormigón aparenta mantener sus propiedades intactas.

Las aguas que habitualmente contengan estos agentes agresivos por encima de determinados umbrales de concentración (Qb o Qc) y se mantengan prolongadamente en contacto directo con el hormigón, son capaces de disolver la portlandita (Ca(OH)₂) [2,3] de la pasta de cemento hidratada, formando sales con

un grado de solubilidad suficiente como para ser eliminadas por lixiviación en presencia de agua.

Este deterioro se produce por reacciones de sustitución y posterior solubilización de los compuestos neoformados, generadas por el ataque del ion amonio y el carácter ácido del CO₂ agresivo a las fases cálcicas del cemento hidratado. La abrasión ocasionada por la circulación de los sólidos en suspensión contenidos en el fluido circulante y los procesos de aireación forzada de algunas etapas de tratamiento de la planta potencian este deterioro superficial.

Por estos motivos la degradación se circunscribe a las zonas permanentemente sumergidas, o a aquellas en las que sistemática o eventualmente se produce rebosamiento del agua (Figura 2).

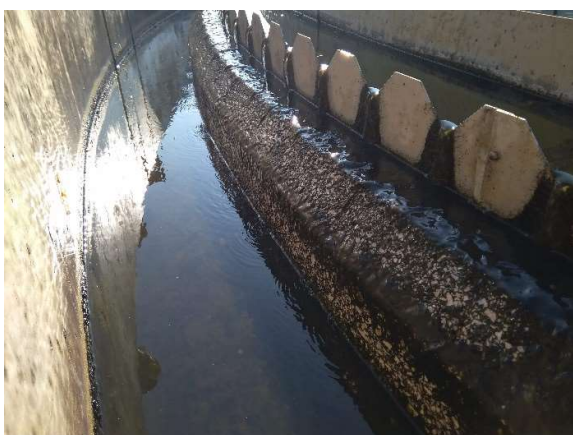


Figura 2. Degradación superficial por agua agresiva.

La pérdida de basicidad por las reacciones de disolución afecta únicamente a la capa superficial. El material remanente se encuentra compacto, sin deterioro en profundidad.

Para este tipo de agresividad en la Instrucción EHE-08 se prescriben los requisitos de dosificación e impermeabilidad aplicables a las clases de exposición Qb o Qc, según corresponda, y se recomienda el empleo de cementos con adiciones, preferiblemente puzolánicas, de forma que cuanto mayor sea su contenido mejor será la durabilidad del hormigón frente a este tipo de agentes agresivos.

Las concentraciones elevadas de sulfatos (niveles de agresividad Qb o Qc) frecuentemente presentes en las aguas residuales pueden reaccionar con los aluminatos cálcicos del cemento cuando el hormigón ya está completamente endurecido, formando compuestos expansivos[4,5] que pueden inducir la formación de fisuras y la degradación de la pasta hidratada de cemento.

Los compuestos expansivos formados como consecuencia de un ataque externo por sulfatos al hormigón son principalmente la ettringita y el yeso secundario.

La ettringita es una sal doble de trisulfoaluminato-cálcico hidratado ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{-}32\text{H}_2\text{O}$), que se forma principalmente en presencia de agua por la reacción entre los aluminatos cálcicos, procedentes del cemento y los sulfatos; si bien también se puede formar a partir de la reacción del monosulfoaluminato-cálcico hidratado por combinación con iones sulfato[6].

El yeso secundario se forma como consecuencia de la reacción de iones sulfato con iones calcio en presencia de agua, para formar yeso que cristaliza en el material endurecido, con un aumento de volumen asociado, aunque muy inferior al que ocasiona la formación de ettringita.

Para este tipo de agresividad la Instrucción EHE-08 prescribe el empleo de cementos con la característica adicional SR o SRC, y el cumplimiento de los requisitos de dosificación e impermeabilidad aplicables a las clases de exposición Qb o Qc, según corresponda.

En estos casos de ataque externo por sulfatos el deterioro se produce en las áreas directamente en contacto con el fluido y especialmente en la superficie del paramento inmediatamente superior al nivel del agua donde, debido al efecto de los ciclos de humedad y secado en esa zona, la concentración efectiva de sulfatos es más elevada.

Generalmente este tipo de degradación no suele producirse en los elementos de hormigón

de las estaciones de tratamiento de aguas residuales porque en este tipo de estructuras está muy extendido el empleo de cementos sulfo-resistentes. Sin embargo, la presencia de altas concentraciones de sulfatos en las aguas residuales es el principal condicionante para que pueda producirse la formación de ácido sulfhídrico o de ácido sulfúrico durante el proceso biológico, con un efecto que puede resultar mucho más nocivo para el hormigón.

2.2 Degradación por ácido sulfúrico de origen biogénico

En este caso el deterioro no se encuentra situado en la zona de hormigón que queda sumergida permanentemente, sino en los paramentos de hormigón por encima del nivel habitual de agua, especialmente en zonas confinadas o con reducida ventilación.

Respecto al espesor de hormigón afectado, la degradación por la acción del ácido sulfúrico ocasiona una acusada pérdida de material en la capa más superficial del hormigón, llegando en muchos casos a degradar por completo el espesor de recubrimiento íntegro y producir una acusada corrosión de las armaduras, con importantes pérdidas de sección del acero (Figura 3).



Figura 3. Degradación severa por ataque ácido con intensa corrosión de armaduras.

Los daños de esta magnitud son ocasionados por ácido sulfúrico de origen biogénico[7,8], derivado del proceso de

reoxidación del ácido sulfhídrico por vía bacteriana.

El proceso consta de varias fases[9,10]. En la primera, los sulfatos presentes en el medio acuoso o en los lodos sedimentados son reducidos por la acción de los organismos anaerobios, produciendo sulfuro de hidrógeno (SH_2) gaseoso. Seguidamente, este SH_2 se libera del fluido al medio aéreo existente por encima del nivel de agua, donde alcanza una mayor o menor concentración parcial en función del nivel de renovación de aire que se produzca en cada recinto. Parte de estos gases sulfurosos son fijados en las superficies de los paramentos situados por encima del nivel del agua que se encuentran húmedas, por difusión o por condensación. Seguidamente en estas superficies húmedas no sumergidas, la acción metabólica de bacterias aerobias *Thiobacillus*[11,12] sobre los sulfuros da origen a la formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) como producto de su metabolismo.

El fuerte deterioro que produce este agente se debe a la reacción del ácido en contacto con la superficie básica del hormigón, que ocasiona procesos de disolución de todas las fases cálcicas de la pasta de cemento hidratado (Figura 4).



Figura 4. Degradación por ataque ácido tras reparación y protección superficial.

3. Inspecciones y ensayos para el diagnóstico

Previamente a la elaboración del plan de ensayos, ha de efectuarse una inspección detallada de las estructuras accesibles por un equipo especializado en este tipo de deterioro con objeto de identificar las anomalías existentes en la estructura original y zonas reparadas, en su caso. Esta actuación permitirá definir las localizaciones de toma de muestras y los ensayos aplicables para el diagnóstico.

3.1 Criterios de inspección

Los resultados de la inspección no solo han de determinar la extensión e intensidad de las superficies con síntomas de deterioro, sino también las localizaciones de muestreo y apertura de calas, que permitan verificar la adecuación de las escuadrías, esquemas de armado, y especialmente determinar el espesor del hormigón del recubrimiento, la pérdida de sección resistente de las armaduras, y la profundidad en la que se ha producido la pérdida de la reserva alcalina del hormigón, ya sea por la carbonatación de la pasta de cemento o por ataque ácido.

En la inspección de los elementos es prioritario evaluar el tipo de deterioro que se ha manifestado en el hormigón en cada una de las diferentes etapas del proceso: pretratamiento (donde se recibe el agua residual bruta para el proceso de desbaste y eliminación de gruesos), tanques de desarenado-desengrasado, balsas y almenas de decantación primaria, reactor biológico (donde se lleva a cabo el tratamiento primario para reducir la carga orgánica del agua residual), canales de reparto, decantadores secundarios y espesadores (donde tiene lugar la formación y sedimentación de los flóculos de materia orgánica biodegradada, concentrándose en los fangos residuales), depósito de fangos y pozos y galerías de trasvase y recirculación o retorno.

Para un correcto diagnóstico preliminar es necesario determinar si las localizaciones en las que se manifiesta el deterioro corresponden a zonas que permanentemente quedan sumergidas, o si se trata de paramentos de hormigón por encima del nivel habitual de agua, o inmediatamente adyacentes a éste, y si son zonas confinadas o con reducida ventilación.

También hay que determinar el espesor afectado. Una posibilidad es que la capa degradada quede limitada a espesores muy reducidos (del orden de 1 o varios milímetros), dejando el aspecto exterior correspondiente a una pérdida de lechada muy superficial, con parte de árido visto, de modo que a mayor profundidad el hormigón mantiene sus propiedades aparentemente intactas. Otro caso es que el espesor del hormigón afectado sea superior al cm, evidenciando una pérdida de material acusada en la capa más superficial, llegando incluso a la degradación íntegra del espesor de recubrimiento, y observándose armaduras con importantes daños por corrosión.

Aunque ambas situaciones son las más habituales y pueden coexistir en distintas localizaciones de la planta, también pueden observarse otras situaciones intermedias, sobre todo en las fases iniciales del ataque ácido.

3.2 Ensayos para diagnóstico

Generalmente el diagnóstico de las causas del deterioro es complejo porque los productos de reacción de los diferentes mecanismos de ataque que se producen en estas instalaciones son solubles, por lo que el análisis del hormigón residual no suele ser concluyente[9,13-15]. El plan de actuación para el análisis de las condiciones de durabilidad del hormigón y para la definición de los ensayos de diagnóstico debe ser lo bastante amplio como para disponer de muestras correspondientes para cubrir todas las situaciones detectadas (diferente tipo y extensión de degradación superficial del sustrato en contacto o no con el medio agresivo).

3.2.1. Agresividad de las aguas

Para determinar el grado de agresividad química del agua residual habrán de tomarse muestras a distintas horas en diferentes registros de la planta, para que las aguas analizadas sean representativas de la agresividad del medio antes y después de haber sido aplicados los diferentes procesos físicos, químicos y biológicos durante las sucesivas etapas de tratamiento de las aguas residuales.

Los ensayos a realizar para evaluar el grado de agresividad potencial del agua al hormigón son los siguientes:

- Determinación del pH, según UNE 83952:2008
- Determinación del contenido de ión amonio, según UNE 83954:2008
- Determinación del contenido de CO₂ agresivo, según UNE-EN 13577:2008
- Determinación del contenido de ión magnesio, según UNE 83955:2008
- Determinación del contenido en ión sulfato, según UNE 83956:2008
- Determinación del contenido de cloruros, según UNE 7178:1960

Habitualmente resulta suficiente la determinación del contenido de ión amonio, CO₂ agresivo y sulfatos, al ser los parámetros que en mayor grado condicionan el nivel de agresividad química de las aguas residuales[3].

Con estos parámetros ha de evaluarse cuál es la clase específica de exposición por agresividad química (Q) a la que están sometidos los elementos en contacto con las aguas de la planta de tratamiento y la existencia de sulfatos en suficiente concentración como para poder ocasionar la formación de ácido sulfúrico biogénico, si las condiciones del proceso metabólico son las idóneas.

3.2.2. Caracterización del hormigón

Seguidamente ha de comprobarse si las prestaciones y la composición de los hormigones empleados para la ejecución de los elementos con síntomas de deterioro satisfacen los

requisitos establecidos en la Instrucción EHE-08 (Tabla 2) para las clases específicas de exposición correspondientes a la agresividad de las aguas analizadas y también respecto a los requisitos especificados en proyecto.

Parámetro	Requisitos EHE-08 para clases específica de exposición (Q)		
	Débil (Qa)	Medio (Qb)	Fuerte (Qc)
Contenido de cemento (kg/m ³)	≥ 325	≥ 350	≥ 350
Relación agua/cemento	< 0,50	< 0,50	< 0,45
Profundidad de penetración de agua			
- media (mm)	30	30	20
- máxima (mm)	50	50	30

Tabla 2. Requisitos para hormigón armado en ambientes de agresividad química.

Los ensayos a realizar para evaluar las prestaciones y la dosificación del hormigón sobre testigos extraídos de los elementos afectados son los siguientes:

- Determinación de porosidad accesible al agua, densidad y absorción de agua (compacidad del hormigón) tanto de la porción correspondiente a la masa interior del hormigón, no expuesta al medio agresivo, como de la porción más exterior, siguiendo el procedimiento operatorio descrito en la norma UNE 83980:2014
- Determinación del contenido de cemento con cálculo de la composición ponderal y volumétrica del hormigón, según el método operatorio descrito en el procedimiento interno de INTEMAC M.2.04.01. Este método está basado en obtener una fracción representativa del hormigón enriquecida en conglomerante (en proporción conocida respecto a la muestra total) que es tratada con una disolución de ácido salicílico en metanol. El residuo está formado por el árido fino, los fundentes del clinker, el yeso empleado como regulador, y las adiciones del cemento, caso de que las hubiera. Como la fracción soluble sólo corresponde a los silicatos cálcicos del cemento, a partir de este valor se

puede calcular el contenido de cemento portland del hormigón analizado[13,16].

- Determinación de la profundidad de penetración de agua a presión tanto de la porción del testigo correspondiente a la masa interior del hormigón, no expuesta al medio agresivo, como de la porción más exterior, siguiendo el procedimiento operatorio descrito en la norma UNE-EN 12390-8:2009

3.2.3. Evaluación del deterioro

Para determinar los procesos de degradación química que han ocasionado el deterioro del hormigón o de las armaduras, por la acción de los iones cloruro o sulfato aportados por los efluentes, o por la acidez del medio derivada de la acción de sulfobacterias, o por el deslavado de la portlandita generado por el ion amonio o el CO₂ agresivo, sería de aplicación la realización de los ensayos descritos seguidamente:

- Determinación del contenido de cloruros y sulfatos (perfil de concentración a distintas profundidades), según UNE 112010:2011 y UNE-EN 196-2:2014

- Determinación de la profundidad de carbonatación del hormigón, según UNE 112011:2011

- Evaluación del pH en el espesor afectado por una pérdida significativa de la reserva alcalina del hormigón. Para ello se preparan extractos acuosos en proporción 1:4 (material granular molido:agua), tras molidura y secado a 40°C del material superficial, suspensión en agua a 20°C, agitación de la suspensión durante 2 horas y posterior filtrado. Sobre el líquido obtenido inmediatamente después de la filtración se determina el pH, según UNE 83952:2008

- Estudio macroscópico, mediante estereomicroscopía (hasta 70 aumentos) de las superficies exteriores con síntomas de degradación.

- Estudio mediante microscopía electrónica de barrido con energías dispersivas de rayos X (SEM-EDX)

3.2.4. Limitaciones de los ensayos de diagnóstico

Generalmente si los resultados del perfil de sulfatos ponen de manifiesto contenidos muy elevados (> 5% referido a peso de cemento) en la porción más exterior del hormigón, y el contenido es decreciente a medida que las determinaciones son efectuadas a mayor profundidad, hasta alcanzar los niveles habituales del contenido de sulfatos aportado por el cemento (2,0 % – 4,0 %), se puede concluir que se ha producido un ataque externo por sulfatos.

Si, adicionalmente a estas evidencias, el pH en el espesor de recubrimiento con pérdida de la reserva alcalina es inferior a 6 se ha de considerar que la degradación ha sido generada por un ataque ácido (sulfhídrico o sulfúrico de origen biogénico) que además de generar el gradiente observado en la concentración de sulfatos habrá producido la descomposición de los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados y de la portlandita de las zonas más superficiales del hormigón en contacto con el agresivo, pudiendo caracterizarse el espesor afectado mediante el estudio macroscópico. Este espesor también queda caracterizado mediante los ensayos de penetración de agua a presión y porosidad accesible al agua, que al haber sido llevados a cabo en la capa exterior degradada y en capas más interiores, aportan información de la profundidad de la superficie alterada, y de las prestaciones de esta capa respecto a las de ese mismo hormigón a una profundidad en la que ya no exista deterioro.

Si el pH del espesor de recubrimiento con pérdida de la reserva alcalina es superior a 7, se puede descartar el ataque ácido. Los resultados de microscopía electrónica serán determinantes para corroborar la existencia de un ataque externo por sulfatos.

En los casos en los que se obtiene un perfil de sulfatos con contenido elevado en la capa exterior y gradiente de concentración decreciente en las capas sucesivas a mayor profundidad, al analizar la capa exterior por

microscopía electrónica de barrido con energías dispersivas de rayos X (SEM-EDX) se suele detectar una mayor concentración de azufre y calcio, que se asocia con cristalizaciones de sulfato cálcico, que se observan tanto en la pasta cementante superficial como en fisuras y en interfases árido-pasta. La formación de estas cristalizaciones de yeso, aunque lleva asociado un cierto comportamiento expansivo, no es lo suficientemente relevante como para causar un nivel de deterioro significativo. Sí habría existido si estos cristales de yeso hubieran reaccionado con los aluminatos cálcicos del cemento para ocasionar la formación de compuestos (ettringita secundaria) con un comportamiento expansivo mucho más acusado, en cuyo caso habrían desaparecido las cristalizaciones de sulfato cálcico.

Es decir, si no se ha detectado la presencia de ettringita en los huecos de la pasta de cemento, ni se aprecia la formación de fisuras o deterioro imputable a estas formaciones cristalinas, se puede descartar que la causa principal del deterioro observado sea imputable a un ataque externo por sulfatos.

Por último, en los casos en los que se confirma la agresividad química de las aguas, en las muestras de hormigón analizadas se observa un leve o moderado ataque superficial con pérdida parcial de la pasta cementante sólo en las zonas sumergidas y en los estudios por microscopía electrónica se descarta la posibilidad del ataque por sulfatos, el deterioro es imputable a procesos de disolución, compatible por un ataque por aguas conteniendo CO_2 agresivo, o con altos contenidos de iones amonio. Esta degradación se ve potenciada por la abrasión ocasionada por la circulación de los sólidos en suspensión contenidos en el fluido circulante y los procesos de aireación forzada existentes en algunas etapas de tratamiento de la planta. En estos casos el material remanente se encuentra compacto, sin deterioro en profundidad.

4. Estudios experimentales

Seguidamente se indican los resultados de inspección y diagnóstico de algunos de los estudios recientemente desarrollados en INTEMAC, representativos de los tipos de degradación más habituales observados en estaciones depuradoras.

4.1 Planta de tratamiento puesta en servicio en los años 90.

Los daños son muy severos en los paramentos de algunas galerías así como en el pozo de compensación y retorno, principalmente en las bóvedas y en las zonas por encima del nivel habitual del agua (Figura 5).



Figura 5. Degradación por ataque ácido en pozo.

Las aguas analizadas presentan un grado de agresividad Q_b por sulfatos. Los hormigones ensayados son de buena calidad: presentan una resistencia a compresión comprendida entre 40 y 60 MPa, porosidad reducida a moderada (11 a 15 %) y moderada absorción de agua $< 7 \%$. Los resultados de profundidad de penetración media de agua a presión son muy reducidos ($< 17 \text{ mm}$), característicos de hormigones impermeables. La dosificación de cemento es bastante heterogénea, con contenidos medios del orden de 300 kg/m^3 . Los contenidos de sulfatos en los primeros 15 mm se sitúan en el rango del 5 al 10% referido a peso de cemento. A una profundidad entre 15 y 25 mm el contenido de sulfatos ya se encuentra en el orden del 3,0 %, compatible con la aportación habitual de un cemento portland. En los análisis por microscopía electrónica no se ha detectado la presencia de ettringita en los huecos de la pasta

de cemento superficial, ni se aprecia la formación de fisuras o deterioro imputable a estas formaciones cristalinas, por lo que se puede descartar que el deterioro observado sea imputable a un ataque externo por sulfatos. Los contenidos de cloruros en la porción más exterior son reducidos, inferiores al 0,25 % (referido a peso de cemento). El pH de los extractos acuosos del material superficial de las zonas degradadas está comprendido entre 4,8 y 5,2.

Como resumen de los resultados obtenidos se puede concluir que la degradación ha estado ocasionada por reacciones de disolución de las fases cálcicas del conglomerante hidratado por acción del ácido sulfúrico de origen biogénico.

Para garantizar las condiciones de durabilidad de los elementos, tras sanear los paramentos afectados retirando todo el hormigón alterado, habría que limpiar y proteger las armaduras, restituir el espesor eliminado con morteros de reparación estructural de los indicados en la norma UNE-EN 1504-3:2006 y compatibles con las prestaciones del hormigón original. Seguidamente sería necesaria la aplicación de una protección superficial en todos los paramentos emergidos que fuera capaz de resistir el ataque ácido. Esta protección puede ser un mortero de revestimiento a base de cemento de aluminato de calcio, o un sistema de reparación diseñado específicamente para garantizar la resistencia frente al ataque ácido[17,18], con imprimación, membrana y tratamiento de juntas.

4.2 Planta de tratamiento tras 5 años en servicio

Las aguas analizadas presentan un grado de agresividad Qb por ión amonio (48 mg/l) y Qc por CO₂ agresivo (164 mg/l). La concentración de sulfatos es muy reducida (60 mg/l), no agresiva. En las inspecciones realizadas se ha comprobado la existencia de pérdidas de la lechada superficial del hormigón en los

paramentos en contacto con el agua residual. (Figura 6).

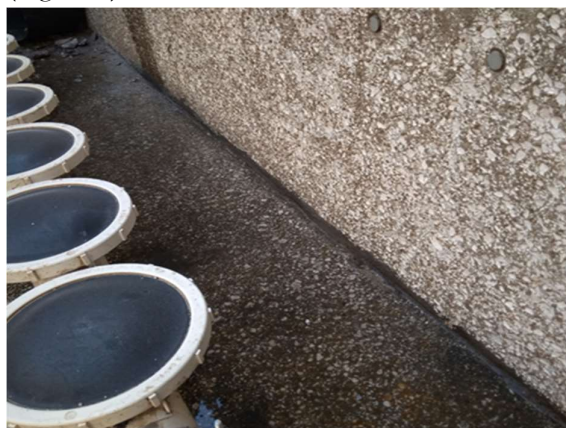


Figura 6. Pérdida de lechada superficial.

Este deterioro se ha observado en la práctica totalidad de los elementos de hormigón expuestos al agua residual, manifestándose en todos ellos únicamente en la parte sumergida. Aunque la degradación es desigual según el elemento del que se trate, se limita en todos los casos a espesores reducidos.

El hecho de que el mayor nivel de deterioro se encuentre situado en las zonas permanentemente sumergidas, junto con los elevados contenidos de los agentes agresivos disueltos en el agua (ión amonio y CO₂ agresivo), justifican que la causa de la pérdida de material producida en la capa de hormigón más superficial haya sido la disolución y lixiviación ocasionada por estos agresivos, junto con el efecto de la abrasión producida por la circulación de los sólidos en suspensión.

Para hacer frente a este tipo de ataque habría sido necesario recurrir a una adecuada protección superficial del hormigón que, aparentemente, no incorporaban los elementos afectados. En ausencia de dicha protección, el empleo de hormigones con cemento CEM I no ha favorecido su durabilidad. En este sentido, ha resultado más adecuada la utilización del tipo CEM II/A-V empleado en algunos elementos. Cuanto mayor hubiera sido el contenido de adiciones puzolánicas (cenizas volantes, puzolanas o microsílíce) en el cemento utilizado

mejor hubiera sido su comportamiento durable frente a este tipo de agresividad química.

5. Conclusiones

Para efectuar un correcto diagnóstico del deterioro producido en los elementos de hormigón de una EDAR, es prioritario que en la inspección sea evaluado el estado superficial de las zonas habitualmente sumergidas y el de las emergidas, especialmente si están situadas en recintos confinados o poco ventilados.

En los casos en los que la degradación se manifiesta principalmente como pérdidas de lechada superficial en los paramentos sumergidos, el deterioro es imputable a la agresividad del agua residual el contacto con el hormigón. Los agentes que suelen producir esta alteración son el ion amonio y el CO₂ agresivo disueltos en las aguas residuales. Los ensayos de agresividad del agua son los más relevantes para el diagnóstico.

Además del empleo de hormigones con las dosificaciones especificadas para estos tipos de ambientes de agresividad química (Q), la utilización de cementos con elevados contenidos de adiciones puzolánicas prolonga sustancialmente la vida en servicio del hormigón.

En los casos en los que la degradación se manifiesta con pérdidas acusadas de material, llegando incluso a la degradación íntegra del recubrimiento, el deterioro es imputable a la acción del ácido sulfúrico biogénico. Los ensayos más definitorios para confirmar la causa de deterioro son la determinación de la concentración de sulfatos en las aguas residuales y del pH en el hormigón superficial remanente.

Para la protección respecto a este tipo de ataque han de emplearse morteros de revestimiento a base de cemento de aluminato de calcio, o sistemas de reparación diseñados específicamente para garantizar la resistencia frente al ataque ácido.

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008
- [2] Gérard, B.; Le Bellego, C. and Bernard, O. Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments. (2002) *Materials and Structures*, 3. 633-640
- [3] Voegel, C., Bertron, A. and Erable, B. Mechanisms of cementitious material deterioration in biogas digester. (2016) *Science of the Total Environment*, 571. 892-901
- [4] Taylor, H.F.W. *Cement Chemistry*. (1997) Thomas Telford Services Ltd, London
- [5] Lawrence, C. Sulphate attack on concrete. (1990) *Magazine of Concrete Research*, 42. 249-264
- [6] López, P. Estudio sobre la durabilidad de los nuevos tipos de cemento para la evaluación del comportamiento de morteros y hormigones frente a la agresión química de los sulfatos y del agua de mar. (2015) Tesis doctoral; U.PM
- [7] Yuan, H. Degradation modelling of concrete submitted to biogenic acid attack. (2013) Doctoral thesis; Université Paris-Est
- [8] Li, X; Kappler, U., Jiang, G. and Bond, P.L. The ecology of acidophilic microorganisms in the corroding concrete sewer environment. (2017) *Frontiers in Microbiology*, 8; 683
- [9] Cortés, M., Vera, E. and Rojas, O. Evaluation of corrosion caused by biogenic sulfuric acid (BSA) on the concrete structures of sewerage systems (chemical tests). (2014) *Int. Journal of Civil and Environmental Engineering*, 8; 11
- [10] Estokovaa, A., Harbulskovsb, V.O., Luptakovac, A., Stevulovaa, N. Study of the deterioration of concrete influenced by biogenic sulphate attack. (2012) *Procedia Engineering*, 42. 1731-1738
- [11] Beddoe, R.E. and Dorner, H.W. Modelling acid attack on concrete: Part I. The essential mechanism. (2015) *Cement Concrete Research* 35. 2333-2339
- [12] O'Connell, M., McNally, C. and Richardson, M.G. Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. (2010) *Cement and Concrete Composites*, 32. 479-485
- [13] Magniont, C., Coutand, M., Bertron, A., Cameleyre, X., Lafforgue, C., Beaufort, S. and Escadeillas, G. A new test method to assess the bacterial deterioration of cementitious materials. (2011) *Cement and Concrete Research*, 41. 429-438
- [14] De Belie, N., Monteny, J., Beeldens, A., Vincke, E., Van Gemert, D., and Verstraete, W. Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulfuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes. (2004) *Cement and Concrete Research*, 34. 2223-2236
- [15] Davis, J.L., Nica, D., Shields, K. and Roberts, D.J. Analysis of concrete from corroded sewer pipe. (1998) *International Biodeterioration and Biodegradation*, 42. 75-84
- [16] Gutiérrez-Padilla, M.G.D., Bielefeldt, A., Ovtchinnikov, S., Hernandez, M. and Silverstein, J. Biogenic sulfuric acid attack on different types of commercially produced concrete sewer pipes. (2010) *Cement and Concrete Research*, 40. 293-301
- [17] De Muynck, W., De Belie, N. and Verstraete, W. Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. (2009) *Cement and Concrete Composites*, 31. 163-170
- [18] Kaempfer, W. and Berndt, M. Polymer modified mortar with high resistance to acid to corrosion by biogenic sulfuric acid. (1998) *Proceedings of the IXth ICPIC Congress, Bologna, Italy, 14th-18th Sep.* 681-687