

COMPORTAMIENTO DE LOS TUBOS DE HORMIGÓN ARMADO EN ENTORNOS COMPLEJOS - Noviembre 2016

José Rodríguez Soalleiro; Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Asesor Técnico de Canalizaciones de ANDECE

Miguel Ángel Sanjuán; Jefe del Área de Cementos y Morteros. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)

Resumen

Las características de los tubos de hormigón armado se estudian con relación a su viabilidad para ser montados en condiciones de puesta en obra en zonas situadas bajo el nivel freático; en terrenos con un relleno inadecuado o donde una buena compactación no pueda garantizarse; en huecos con poco espacio para su instalación; en terrenos con variación de cargas a lo largo de la traza; y en terrenos químicamente agresivos.

Se concluye que los tubos de hormigón armado son la solución más adecuada en entornos complejos desde el punto de vista técnico y económico debido a sus características mecánicas, físicas y químicas.

1. Introducción

Las obras de saneamiento y drenaje se ejecutan habitualmente en la fase inicial de los trabajos, en circunstancias adversas y diversas, con presencia de agua en trabajos bajo niveles freáticos, terrenos heterogéneos y agresivos, ausencia de materiales de relleno adecuados, etc.

Todas estas situaciones exigen a los tubos de hormigón unas prestaciones múltiples que den respuesta técnica a cada circunstancia concreta desde la etapa de ejecución y puesta en obra hasta su entrada en servicio y vida útil.

En este artículo analizaremos el comportamiento de los tubos de hormigón armado ante las situaciones más habituales que nos encontramos en las obras.

2 - Montaje bajo el nivel freático

El tubo de hormigón es la solución más adecuada para aquellas situaciones en las que tengamos que hacer una instalación con presencia de nivel freático, debido a su baja flotabilidad. El hecho de ser elementos más pesados que los de otras soluciones alternativas, facilita la consecución de las alineaciones y pendientes requeridas (Figura 1).

Un tubo de hormigón con agua en el interior, bien lleno o solamente hasta la altura del nivel freático nunca flota.



Figura 1: Tubos de hormigón en zonas situadas bajo el nivel freático.

Para un tubo sin agua en su interior, hasta un diámetro de 500 mm y con los espesores habituales de mercado, el peso de los tubos de hormigón es superior al empuje vertical que el nivel freático produce para un tubo completamente sumergido.

Un tubo vacío con un espesor de 1/10 de su diámetro interior, puede mantener un 76 % de su volumen bajo el nivel freático sin riesgo de flotación.

En la Tabla 1 adjunta se recogen los valores de porcentaje del volumen del tubo que puede quedar bajo el nivel freático sin riesgo de flotación para los espesores más habituales.

Tabla 1: Valores de porcentaje del volumen del tubo que puede quedar bajo el nivel freático sin riesgo de flotación para los espesores más habituales.

Diámetro (mm)	Espesor (mm)	% del volumen del tubo que puede quedar bajo el nivel freático sin riesgo de flotación
300	50	100 %
400	65	100 %
500	75	100 %
600	80	94 %
800	95	87 %
1000	110	82 %
1200	125	79 %
1500	150	76 %
1800	180	76 %
2000	200	76 %
2500	250	76 %
3000	300	76 %

En cualquier caso, si los criterios de flotabilidad fueran los condicionantes en la solución a ejecutar, siempre se puede ajustar el espesor del tubo para cumplir con esa condición o situar contrapesos interiores durante el montaje.

3 - Incertidumbre de cargas o de las condiciones de ejecución

En los casos de zanjas donde no se puede disponer de espacio suficiente entre el exterior del tubo y las paredes de la zanja, es necesario utilizar materiales que garanticen el correcto relleno lateral para obtener la condición de apoyo considerada en el cálculo. Si esto no fuera técnicamente posible o económicamente aconsejable, cabe diseñar la instalación como autoresistente y superar así la situación de incertidumbre generada.



Figura 2: Instalación de tubos de hormigón armado autoresistente.

Los tubos de hormigón armado permiten este tipo de soluciones al disponer, para un diámetro interior determinado, de varias clases resistentes e incluso diferentes espesores. Una solución de apoyo pobre o de ejecución incierta, se puede compensar con el uso de un tubo de clase resistente alta y así dar cumplimiento a la inecuación siguiente:

$$\text{Clase resistente} \times \text{Factor de apoyo} \geq \text{Acciones externas} \times \text{Coef. seguridad}$$

La misma solución se puede aplicar para las situaciones de rellenos de características inciertas o condiciones de compactación que no nos ofrezcan las debidas garantías.

Instalaciones deficientes, como la presentada en la Figura 3, son más habituales de lo que sería deseable. A pesar de esto, los tubos de hormigón mantienen su funcionalidad.



Figura 3: Tubo de hormigón en cruce con deficiente instalación.

En los casos de variación de cargas a lo largo de la traza, las soluciones con conductos prefabricados de hormigón armado ofrecen una adecuada respuesta resistente a los cambios que se puedan producir en las acciones a lo largo de la traza, manteniendo la geometría interna y, por tanto, la continuidad hidráulica.

Ante las variaciones de las cargas ocasionadas por los pasos bajo viales, las dunas sónicas y las diferencias en las alturas de terraplén, entre otras causas, se puede modificar la clase resistente de los tubos sin cambiar el diámetro interior.



Figura 4: Ensayo de tres aristas en un tubo de hormigón armado.

En conductos tipo marco, se mantienen las dimensiones interiores modificando los espesores y el armado de paredes.

4 - Obras con limitaciones de espacio

Esta es una situación bastante frecuente en las obras de saneamiento, y los conductos de hormigón armado permiten adaptar las soluciones prefabricadas a los casos que presentan dificultades de espacio, tanto en anchura como en altura.

En los casos de escaso gálibo, podemos colocar tubos de sección elíptica en posición apaisada, o bien conductos rectangulares con la altura que el gálibo disponible imponga, y el ancho necesario para evacuar el caudal de proyecto.



Figura 5: Soluciones para obras con altura escasa.

Cuando la limitación se debe al ancho, podemos disponer tubos ovoides o de sección elíptica en posición peraltada, o bien conductos rectangulares con el ancho máximo que permita la instalación, compensándolo con el incremento necesario en la altura.



Figura 6: Tubos de sección ovoide.

5 - Respuesta en ambientes químicamente agresivos

Los tubos de hormigón armado fabricados con una calidad adecuada pueden resistir perfectamente la acción agresiva de los agentes químicos de la mayoría de los suelos agresivos de la península ibérica.

La "mala fama" que tiene el hormigón sobre su comportamiento frente a los ataques químicos le viene dada por el uso de hormigones poco compactos, con dosificaciones bajas de cemento y relaciones agua/cemento elevadas. Sin embargo, en la actualidad, cumpliendo las especificaciones que se establecen en la normativa vigente, estas deficiencias se han superado.

Cuando nos encontremos situaciones de riesgo, podemos actuar de forma proactiva modificando la dosificación del hormigón para hacerle más durable, aplicar protecciones internas y externas de forma sencilla y eficaz, utilizar cementos resistentes a los sulfatos (SR de la norma europea UNE-EN 197-1:2011 o SRC de la norma española UNE 80303-1:2013) ó con adiciones puzolánicas, etc.

Las situaciones de riesgo habituales, se deben a la presencia de sales solubles, sulfatos y ácidos, entre otros agentes agresivos; o a los procesos de carbonatación, reacción árido-álcali y corrosión de la armadura embebida en el hormigón.

La Instrucción del Hormigón Estructural, EHE-08, y las normas de producto, proponen acciones complementarias, en función de las clases de exposición, para mejorar el comportamiento durable de los tubos de hormigón.

A continuación, se repasan las acciones que pueden actuar sobre las tuberías de hormigón de las redes de saneamiento y drenaje (1), sus efectos y las medidas preventivas que se pueden aplicar en cada caso.

5.1 Acción de las sales solubles

Cuando las sales solubles se difunden a través de la red capilar de los poros del hormigón y, por efecto de la evaporación, precipitan en la superficie externa de la tubería en contacto con el aire se acumulan y producen un desconchamiento superficial. Sin embargo, *en un hormigón poco permeable y compacto, es muy poco probable que se produzca esta acción.*

5.2 Acción de los sulfatos

Los sulfatos pueden tener un origen biológico o industrial, o simplemente, encontrarse en la naturaleza, como por ejemplo en el agua de mar y en los suelos selenitosos.

La acción de los iones sulfato en el hormigón es una de las acciones químicas más agresivas y se debe, principalmente, a la reacción expansiva de éstos con el aluminato tricálcico que hay en el cemento Portland y, en menor medida, a la formación de yeso secundario, entre otros factores menores. La acción de los sulfatos se inicia con un hinchamiento seguido de la formación de compuestos expansivos como el yeso y la ettringita secundaria que producen tensiones mecánicas internas y la fisuración del hormigón. Los mecanismos fisicoquímicos de actuación dependen de la concentración y del catión presente en el sulfato, se produce expansión y pérdida de las propiedades conglomerantes.

Los cementos recomendados para evitar este ataque son los resistentes a los sulfatos de la norma europea UNE-EN 197-1:2011 (SR) o de la norma española UNE 80303-1:2013 (SRC), los cementos con adiciones de puzolanas naturales, cenizas volantes silíceas o escorias de horno alto (2, 3). La utilización de cemento con adición de materiales puzolánicos es beneficiosa ya que fija la cal y reduce la cantidad de sulfato cálcico dihidratado (yeso) formado.

La resistencia a los sulfatos de un cemento Portland depende, principalmente, de su contenido en aluminato tricálcico. Por tanto, se pretende minimizar la formación de ettringita secundaria. En España, se consideran cementos resistentes a los sulfatos, aquellos cementos de las normas UNE 80303-1:2013 y UNE-EN 197-1:2011 que, por la composición de su clínker, cumplan las especificaciones que se refieren a límites porcentuales de C_3A y C_3A+C_4AF . Los contenidos de C_3A y C_4AF , se determinan por medio de las fórmulas de Bogue (UNE 80304:2009). Se puede destacar que no se especifica ningún límite en el caso de los cementos de los tipos CEM III/B ni CEM III/C, los cuales, en razón de sus elevados contenidos de escoria de horno alto son siempre resistentes a los sulfatos (4).

Se puede concluir que con la utilización de los cementos resistentes a los sulfatos (SR o SRC), no hay daño en el hormigón.

5.3 Acción de la carbonatación

La atmósfera contiene en torno a un 0,03% de dióxido de carbono el cual puede difundirse a través de los poros del hormigón hacia su interior y reaccionar con el hidróxido cálcico (Reacción 1). Este proceso no es importante en tubos enterrados y en las zonas que están en contacto con el aire se puede producir ocasionalmente esta reacción química del dióxido de carbono con el hidróxido cálcico en superficie.



La carbonatación empieza en la superficie y penetra hacia el interior del hormigón con una velocidad que es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo en la mayoría de los casos. El fenómeno de la carbonatación del hormigón es máximo con un 60 % de humedad relativa y prácticamente nulo en ambientes secos o saturados debido a que la difusión del CO_2 está impedida en poros totalmente saturados de agua y no reacciona si el poro está muy seco (5, 6, 7).

La importancia de esta acción se debe a que el Ca(OH)_2 junto con los compuestos alcalinos que se encuentran en la fase acuosa del hormigón mantienen un elevado pH en el hormigón en torno a 12 y a veces mucho más elevado. La carbonatación del hormigón produce que el pH descienda por debajo de 9 y despasive la armadura del tubo de hormigón armado con lo que se inicia la corrosión.

Con un recubrimiento de 25 mm, una resistencia del hormigón de 40 MPa y un diámetro del acero de 10 mm, en condiciones normales, el Anejo 9 de la EHE-08 da valores de vida útil (periodos de iniciación más propagación) superiores a 100 años. Los valores antes considerados son habituales en la fabricación de elementos prefabricados para conducciones de hormigón.

5.4 Acción de los ácidos

Los compuestos ácidos del entorno o del interior del tubo de hormigón pueden reaccionar con los compuestos alcalinos de la fase acuosa del hormigón formando sales solubles que provocan la disolución de la pasta de cemento. De esta forma se deja sin unión a los áridos, lo que provoca la disgregación del hormigón.

El ataque ácido a las tuberías de hormigón puede ser externo o interno.

El ataque externo se puede producir cuando la tubería está enterrada en suelos ácidos o en contacto con aguas subterráneas ácidas. Estas situaciones son muy raras en la naturaleza y sólo son posibles en zonas industriales con vertidos accidentales de ácidos minerales.

En el interior de los tubos puede originarse la formación de ácido sulfhídrico (8) y ácido sulfúrico (9) en el agua residual de las conducciones sanitarias, o estar presente en el líquido que se transporta. Este último caso, no es normal ya que la Directiva 91/271/CEE sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas, obliga a la depuración de los vertidos antes de su evacuación a los sistemas de colectores e instalaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (Artículo 11, letra C del Anexo I).

La formación de ácido sulfhídrico, H_2S , se produce por digestión anaerobia en el interior del efluente y las condiciones que facilitan su desarrollo son:

- Temperaturas altas.
- Velocidades del fluido bajas o nulas provocando el aumento del tiempo de retención o incluso situaciones de estancamiento.
- Falta de aireación en las conducciones.

En conductos trabajando a sección llena, el ácido sulfhídrico gaseoso, H_2S , se mantiene disuelto en el líquido efluente hasta alcanzar algún punto de descarga o vertido, que es donde se libera, y es, por tanto, el lugar donde se concentran los malos olores y los problemas de corrosión. Por otro lado, en conductos que no trabajan a sección llena, cualquier turbulencia en el régimen hidráulico, hace que el ácido sulfhídrico pase del líquido efluente al aire en la propia conducción.

En la pared no sumergida de los conductos de saneamiento y en presencia de humedad crece el Thiobacillus, que es una bacteria aeróbica que realiza la transformación del ácido sulfhídrico, H_2S , en ácido sulfúrico, H_2SO_4 (Figura 7).

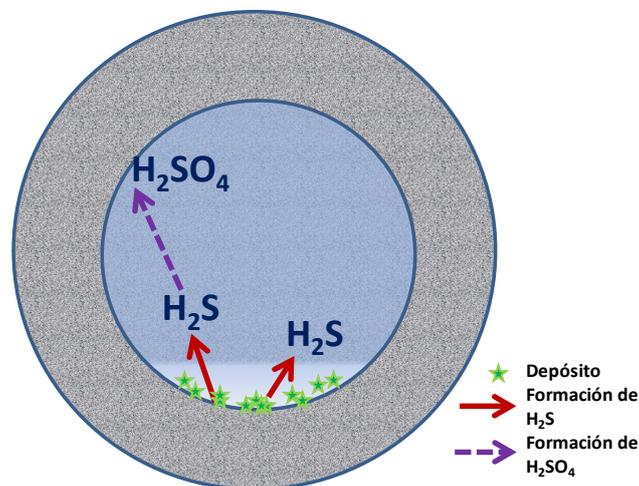


Figura 7: Formación de ácido sulfhídrico y ácido sulfúrico en colectores de aguas sanitarias.

Las estrategias para evitar la formación ácida en el interior de los tubos de hormigón son las siguientes:

- Evitar la formación de ácido sulfhídrico, actuando sobre el diseño.
- Evitar su transformación en ácido sulfúrico.
- Hacer el producto más resistente al ataque de ácidos.
- Dotar a los conductos de un espesor de sacrificio.

- Emplear material de relleno de naturaleza caliza cuando el ataque sea externo.
- Utilizar áridos calizos que ayuden a neutralizar la acción de los ácidos.

El espesor de sacrificio se puede evaluar con la fórmula de Richard D. Pomeroy (10) para un tiempo de vida útil establecido.

Normalmente, estas precauciones son suficientes para evitar los problemas derivados de la acción de los ácidos.

5.5 Acción de las aguas puras

La acción de las aguas puras se produce cuando el agua pura de montaña, la del deshielo o cualquier otra agua con un reducido residuo seco, se canaliza en tubos de hormigón originando el deslavado de la pasta de cemento del hormigón por disolución de los constituyentes más débiles y dejando sin unión a los áridos del hormigón de la zona interna de la tubería que la contiene. La portlandita o hidróxido de calcio precipitado, Ca(OH)_2 , tiene una solubilidad en agua destilada de 1700 mg/litro a 20°C, a medida que aumenta la cantidad de iones en el agua, esta solubilidad disminuye. Por otro lado, los silicatos de calcio hidratados, o gel C-S-H, presentan una solubilidad mucho menor (50 mg/l, expresada como CaO). En consecuencia, cuanto menos portlandita tenga la pasta de cemento hidratada, mayor durabilidad presentará el hormigón frente a las aguas puras.

Este tipo de ataque es superficial, a menos de que existan fisuras de gran anchura que puedan facilitar un ataque más profundo.

En estas condiciones se recomienda la utilización de cementos de adición puzolánica (cenizas volantes silíceas, puzolanas naturales o humo de sílice) o escorias granuladas de horno alto. En cuanto a los áridos, son recomendables los silíceos por su carácter ácido.

Conviene evitar velocidades de flujo elevadas y, en caso necesario, se puede recurrir a la protección de la superficie del hormigón en la zona mojada de manera continua.

Teniendo en cuenta las precauciones mencionadas, no hay daño en el hormigón expuesto a las aguas puras.

6 - Comportamiento ante porosidad capilar y fisuras

6.1 Caso de emisarios submarinos

Los emisarios submarinos son obras en las que debemos considerar la presencia permanente de presiones.

La solución que primero se plantea es aquella en la que los tubos, para evitar el paso del agua, puedan disponer de una barrera física tipo camisa de chapa, forro interior de plástico o similar.

En instalaciones en las que la presión de trabajo sea inferior a 5 bares se han aplicado con éxito soluciones de hormigón armado, con espesores no menores de 30 cm y con limitaciones muy estrictas de absorción capilar, relación agua/cemento, recubrimientos y contenido de cemento.

Y como complemento, sencillo y eficaz, se propone la sobredosificación de finos calizos, que facilitan el sellado de los microporos internos del hormigón al colmatarse por la reacción de estos finos calizos con las sales libres del cemento.

6.2 Respuesta frente a las fisuras de trabajo

En los elementos de hormigón armado trabajan juntos el hormigón y la armadura. El hormigón soporta muy bien los esfuerzos de compresión y mal los esfuerzos de tracción, por lo que la armadura se coloca donde se producen éstos últimos.

Pero, para que la armadura trabaje en valores próximos a su límite elástico se necesita una deformación superior a la que el hormigón presenta antes de fisurarse, por lo que las fisuras en las piezas de hormigón armado son consustanciales con el producto.

La armadura se diseña para que las fisuras no superen una apertura determinada en superficie, valor que viene determinado por el tipo de exposición ambiental. El hidróxido cálcico del cemento, Ca(OH)_2 , al reaccionar con el CO_2 ambiental forma carbonato cálcico, CO_3Ca , dando lugar al autosellado de esas fisuras (Figura 8).



Figura 8: Autosellado de las fisuras en el hormigón.

7 - Facilidad de reparación

En las obras de saneamiento es habitual que se presenten situaciones no previstas, como por ejemplo, las meteorológicas, la interferencia con canalizaciones ocultas, los sobrecargos de zanjas y la presencia de rellenos no previstos en proyecto como dunas sónicas, estribos de puentes o pasarelas.

También se pueden cometer errores en la valoración de las acciones por desconocimiento de las variables geotécnicas del suelo o de los rellenos, e incluso existir incertidumbres en las soluciones que se puedan ejecutar tras la apertura de zanjas.

Todo esto puede ser causa de dimensionamientos escasos y aparición de patologías en los elementos de las canalizaciones.

Los conductos de hormigón armado tienen la facilidad de permitir su reparación de forma sencilla y duradera.

Las patologías que se suelen presentar por estas causas son:

- **Fisuración:** Hay dos tipos de fisuras, las debidas al trabajo normal de la armadura y las estructurales originadas por infravaloraciones de las cargas o por fallos del factor de apoyo. Las primeras tienen una apertura inferior a 0,3 mm y se cierran solas (Figura 8). Cuando hay un fallo estructural en un tubo se van produciendo fisuras que actúan como rótulas plásticas, convirtiendo el tubo en una serie de dovelas que, si el relleno lateral responde adecuadamente, estabilizan la fisuración. Si la estabilización se produce sin desplazamiento entre los labios de la fisura, es suficiente con sellarlas empleando una masilla elástica. En caso de que haya desplazamiento, es conveniente abrir en V la zona fisurada y tratarla con un producto en base cemento.
- **Pérdidas en las uniones:** Aquí los métodos de reparación más eficaces son el sellado con masilla elástica o la inyección de productos del tipo de poliuretanos.
- **Fallos de impermeabilidad en la pared del conducto:** En el mercado existen tratamientos superficiales que impermeabilizan la superficie del hormigón tanto en presión positiva (hasta 5 bar), como negativa (hasta 3 bares).

8 - Obras de hinca

Aquí la casuística y las incertidumbres son más acusadas que en las obras ejecutadas a cielo abierto, ya que habitualmente se hacen con información limitada y muchas veces basada en la experiencia de otras obras anteriores (Figura 9).



Figura 9: Obra de hinca.

Para hacer frente a estos casos, clarificar situaciones de controversia y facilitar el trabajo a los hincadores, la industria de los tubos de hormigón armado:

- Ha normalizado un método de cálculo.
- Puede ofrecer hormigones de resistencia superior a los 50 MPa.
- Las armaduras de los tubos incorporan estribos en sus extremos.
- Los tubos de inyección de bentonita pueden ser plásticos ó metálicos, con diámetros de $\frac{3}{4}$ ó 1 pulgada, llevan aros para evitar la entrada de agua por su contorno y pueden llevar válvulas anti retorno alojadas en su interior.
- Las virolas pueden ir galvanizadas y con anclajes estancos. Además de la junta de estanquidad pueden llevar una tipo taco en el borde exterior del macho y una tipo glip en el interior.

- Las estaciones intermedias pueden llevar los escudos metálicos anclados al hormigón (Figura 10).

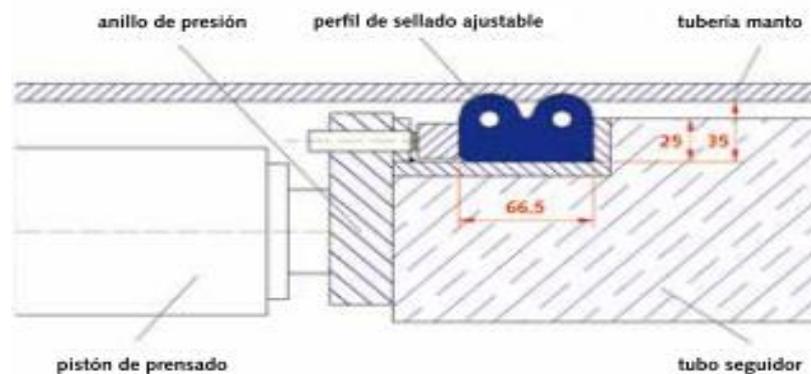


Figura 10: Estación intermedia.

- También se pueden poner las llamadas “juntas activas” que permiten su reapriete durante el hincado.
- Se dispone de sufrideras (Figura 11) de diversos materiales y espesores (aglomerado, pino sin nudos, OSB,...).



Figura 11: Sufrideras en un tubo de hormigón armado.

- Se pueden montar tubos cortos para alineaciones con radios reducidos, etc.

9. Conclusión

La durabilidad y la resistencia mecánica son los aspectos esenciales de las tuberías de hormigón.

Los tubos de hormigón, fabricadas con las especificaciones que recoge la normativa europea y sus complementos nacionales actuales, tienen un comportamiento adecuado para la inmensa mayoría de sus aplicaciones.

La utilización de conducciones de saneamiento y drenaje con tubos de hormigón armado es la solución más económica y fiable debido a sus características mecánicas, físicas y químicas.

Referencias

- 1) T. Haktanir, K. Ari, F. Altun, O. Karahan. "A comparative experimental investigation of concrete, reinforced-concrete and steel-fibre concrete pipes under three-edge-bearing test". *Construction and Building Materials*, 21(7), pp. 1702–1708 (2007).
- 2) TS Interim Amendment Nº 23 Implementation of BS 8500-1:2006 - Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1. TRANSPORT SCOTLAND (Agency of the Scottish Government). Object ID:A2264320. Rev 2, February, 2012. 13pp.
- 3) F. Massazza. "Additions and durability of concrete", *World Cem.*, 21(1), pp. 19–44 (1999).
- 4) M. A. Sanjuán, C. Argiz. "La nueva norma europea de especificaciones de cementos comunes UNE-EN 197-1:2011". *Mater. Construcc.*, Vol. 62, 307, 425-430, julio-septiembre 2012. ISSN: 0465-2746. doi: 10.3989/mc.2012.07711.
- 5) M.A. Sanjuán, Carmen Andrade, M. Cheyrezy. "Ensayos de carbonatación natural y acelerada de conglomerantes hidráulicos fabricados con cemento portland". *Cemento y Hormigón*, nº 884. Enero 2006.
- 6) M.A. Sanjuán, César del Olmo. "Carbonation Resistance of Industrial Mortars used as concrete coatings". *Building and Environment* 36 (2001) 949-953.
- 7) P. Castro, M.A. Sanjuán, J. Genescá. "Carbonation of concretes in the Mexican Gulf". *Building and Environment* 35 (2)(2000) 145-149.
- 8) A. Attal. "Biological mechanisms of H₂S formation in sewer pipes", *Water Science and Technology*, 26, p. 907 (1992).
- 9) V. Rostami, Y. Shao, A.J. Boyd. "Durability of concrete pipes subjected to combined steam and carbonation curing". *Construction and Building Materials*. 25 (2) 3345–3355 (2011).
- 10) Pomeroy, 1959. "Generation and Control of Sulfide in Filled Pipes". *Sewage and Industrial Wastes*, Vol. 31, 1082-1095.
- 11) Anexo D de la Norma UNE 127010:1995.

Referencias: www.andece.org

www.atha.es

Contacto: tubos@andece.org