



<http://www.merus.es/in-general/iron-pipes>

Métodos para Mitigar la Corrosión por Ácido Sulfúrico Biogenico en los Sistemas de Alcantarillado

Cortes Z. Melquisedec
Avella P. Marian
Rojas C. Oscar

Métodos para Mitigar la Corrosión por Ácido Sulfúrico Biogenico en los Sistemas de Alcantarillado

CORTES Z. Melquisedec
Universidad Santo Tomas – Tunja
Melquisedec.cortes@usantoto.edu.co

ROJAS C. Oscar
Universidad Santo Tomas – Tunja
Oskrin_100@hotmail.com

AVELLA P. Marian
Universidad Santo Tomas – Tunja
Marian.avella@usantoto.edu.co

Resumen: La corrosión es un proceso inminente en la naturaleza que afecta a materiales de todo tipo. En los sistemas de alcantarillado se ha venido estudiando el proceso de corrosión inducida por microorganismos, también conocida como el ataque del ácido sulfúrico biogénico, que afecta la integridad estructural de los colectores de concreto y las plantas de tratamiento de aguas residuales. En este contexto, se han investigado tres métodos para controlar y mitigar este proceso: a) el control del sulfuro de hidrógeno, b) la implementación de aditivos y recubrimientos en el concreto y c) los métodos antimicrobianos. Este artículo resume una revisión de las investigaciones que se han enfocado a estudiar cómo reducir la producción del sulfuro de hidrógeno y mejorar la resistencia del concreto por medio de aditivos y de la implementación de técnicas antimicrobianas para disminuir el crecimiento de las bacterias.

Palabras clave: ácido sulfúrico biogénico, bactericidas, corrosión, concreto, nanomateriales, zeolitas, sulfuro de hidrogeno.

Abstract : The corrosion is on imminent process in nature which affects the materials of all kinds, sewer system has been studied the corrosion process produced by microorganisms also this pathology is known as the biogenic sulfuric acid attack which affects the integrity of the concrete and change its physical, chemical properties. We have investigated three methods for to control and mitigate this process, this paper summarize the researches has focused on studying how to reduce the hydrogen sulfide production and improve concrete strength whit additives and antimicrobial techniques for to reduce the bacterial growth

Keywords: biogenic sulfuric acid, bactericidal, corrosion, concrete, nano materials, hydrogen sulfide, zeolite.

1. Introducción

Los sistemas de alcantarillado y las plantas de tratamiento de aguas residuales son componentes esenciales del control de la salubridad en los centros urbanos. Muchos de los elementos que componen estas estructuras son fabricados o construidos en concreto; sin embargo, este tipo de ambiente agresivo, que involucra el ciclo del azufre y la actividad microbiológica, genera una corrosión en la superficie del elemento de concreto, lo cual disminuye la durabilidad de estas estructuras.

En varios países se ha evidenciado el ataque por ácido sulfúrico biogénico en los sistemas de recolección de aguas residuales, como es el caso de México (Espinoza, Revah y Le Borgne, 2010), Estados Unidos (Hernández *et al.*, 2002; Nica *et al.*, 2000), Japón (Yamanaka *et al.*, 2002), Bélgica (Monteny *et al.*, 2001) y China (Liu, Lan y Cheng, 2004). Además, los costos de rehabilitación de los elementos de concreto afectados por la corrosión microbiológica alcanzan una inversión significativa en varios países y ciudades, como en Alemania, donde se emplea el 40% de 100 billones de dólares; Flandes (Bélgica), que alcanza el 10% del total de los gastos de tratamiento de aguas residuales (De Muynck, De Belie y Verstraete, 2009); y Los Ángeles (Estados Unidos), que invierte alrededor de €400 millones (Vincke, 2002). También se estima que Estados Unidos invierte anualmente alrededor de 25 billones de dólares en el mantenimiento de sistemas de alcantarillado (O'Connell, McNally y Richardson, 2010).

2. Métodos de control de corrosión

El objetivo de muchas de las investigaciones que han estudiado la corrosión por ácido sulfúrico biogénico es la búsqueda de una solución o posible mitigación de esta patología. Para ello se han buscado controlar los eslabones que intervienen en el proceso, mediante el desarrollo de técnicas que aumentan la resistencia del concreto, previenen la formación de sulfuro de hidrógeno o actúan como bactericidas. Estos métodos se pueden clasificar en tres tipos o grupos, como se muestra a continuación.

Tipo I: control del sulfuro de hidrógeno (H₂S): La emisión y producción del sulfuro de hidrógeno en los sistemas de alcantarillado es uno de

los principales eslabones en el proceso de corrosión por ácido sulfúrico. Además, se relaciona con los problemas de olores y toxicidad del ambiente dentro del sistema. Los problemas severos de corrosión han sido reportados en sistemas que presentan una concentración mayor e igual a 2,0 mgL⁻¹ (Hvitved-Jacobsen, Vollertsen y Matos, 2002; Zhang *et al.*, 2008). Los métodos que se han investigado para controlar las emisiones de H₂S son químicos y bioquímicos (Vincke, 2002; Zhang *et al.*, 2008) y aplican una gran variedad de tecnologías.

Las tecnologías investigadas y aplicadas se pueden clasificar según su naturaleza, la reacción que generan y lo que buscan controlar directamente, como se indica enseguida:

a) Disminución de las concentraciones de sulfatos. Las cargas de sulfatos que contienen las aguas residuales están directamente relacionadas con la producción de sulfuro, pues las bacterias sulforreductoras utilizan el sulfato como aceptador de electrones en la oxidación de materia orgánica (respiración anaerobia) (Massol, s. f.), reduciéndolo a sulfuro. En consecuencia, se han estudiado diferentes sistemas para la remoción de sulfatos, como lo son la electrodiálisis, el intercambio de iones y la ósmosis inversa; sin embargo, estos procedimientos no son muy aplicables a sistemas que conducen aguas residuales industriales con una alta demanda química de oxígeno. El control de sulfuro de hidrógeno también se puede controlar con la adición de compuestos químicos como Ca(OH)₂, Mg(OH)₂ y Al₂(OH)₂; pero esta adición de químicos es costosa y poco útil (Vincke, 2002).

b) Incremento del potencial redox para controlar la formación de sulfuro. La producción de sulfuro se realiza en la biopelícula del colector, a una profundidad de 1 mm, donde los niveles de oxígeno disuelto son bajos (Zhang *et al.*, 2008); por ende, uno de los métodos más aplicados es la inyección de aire u oxígeno en el sistema de recolección de aguas residuales. La inyección de aire aumenta la concentración de oxígeno disuelto a niveles entre 0,2 y 1,0 mgL⁻¹ en el punto final del alcantarillado. Se conoce que niveles de 0,5 mgL⁻¹ pueden prevenir la aparición de sulfuro, ayudan a disminuir la demanda biológica de oxígeno, no son tóxicos y su costo es de alrededor de 1,2 € por habitante. Una desventaja de las inyecciones de aire es la transferencia limitada de oxígeno (Vincke, 2002; Zhang *et al.*, 2008).

Estas inyecciones llegan a aumentar los niveles de oxígeno disuelto entre 5 y 7 mgL⁻¹, porque este es cinco veces más concretado que el aire (Chen y Leung, 2000). De hecho, esta es la técnica más efectiva para controlar el sulfuro; sin embargo, solo es aplicable para sistemas a presión y genera un riesgo potencial de incendios (Zhang *et al.*, 2008). La adición de una solución de nitrato, compuesta por óxido de nitrógeno principalmente (Vincke, 2002), ayuda a disminuir la concentración de sulfuro. Se ha evidenciado que la adición de 1,0 gL⁻¹ de nitrato previene la producción de sulfuro alrededor de 29 días, lo cual es posible gracias al aumento de potencial redox por la presencia de nitratos (Zhang *et al.*, 2008).

c) *Inhibición de la actividad de las bacterias sulfurorredutoras.* El uso de soda cáustica para elevar los niveles de pH es considerado el método más común para eliminar la actividad de las bacterias (Zhang *et al.*, 2008). La efectividad de aplicar NaOH aumentando el pH a un rango entre 10,5 y 12,5, con tiempos de exposición de 0,5 a 6 horas, ha demostrado que la tasa de producción de sulfuro en la biopelícula disminuye entre el 70 y el 90%, en tanto el efecto se mantiene aproximadamente por una semana (Gutiérrez *et al.*, 2014).

d) *Remoción química de sulfuro.* La agregación de químicos para controlar y remover el sulfuro de hidrógeno en fase líquida, antes de que salga a la atmósfera del colector, es un campo ampliamente investigado. De hecho, se ha estudiado la adición de sales metálicas, sales y compuestos oxidantes.

Para generar la precipitación con sales metálicas se utilizan principalmente compuestos de hierro, ya que la reacción que se presenta con el sulfuro forma sales insolubles. Los químicos utilizados comúnmente son cloruro férrico o ferroso y nitrato férrico. La precipitación del sulfuro ferroso es un proceso rápido; sin embargo, el uso combinado de sales férricas y ferrosas genera una mayor eficiencia para controlar las concentraciones de sulfuro disuelto (Zhang *et al.*, 2008). También se ha probado la aplicación de hierro coagulado, lo cual ha mostrado resultados positivos en la remoción de sulfuro, pero ha elevado la concentración de metales y la carga de sólidos (Vincke, 2002).

Químicos como el cloro, el peróxido de hidrógeno y el permanganato de potasio son oxidantes

potenciales del sulfuro, pero su adición puede llegar a generar sustancias cancerígenas y metales pesados. La implementación del peróxido de hidrógeno ayuda a mantener el sistema en condiciones aeróbicas. Así, una concentración de 1,3 a 4 mgL⁻¹ puede llegar a eliminar el sulfuro entre un 85 y 100%, si se tiene una concentración de alrededor de 1 mgL⁻¹ de azufre. Recientemente se probó la adición de ácido nitroso junto con peróxido de hidrógeno en el sistema de alcantarillado de Australia, con una adición durante un periodo de 8 a 24 horas; con ello se observó una disminución del 80% en la producción de sulfuro de hidrógeno (Jiang *et al.*, 2013). El cloro puede reducir el sulfuro a sulfato o azufre elemental, dependiendo del pH, pero la eficiencia de este es baja, ya que la reacción química que se presenta es lenta. A su vez, el permanganato de potasio es un oxidante fuerte, pero llega a ser muy costoso (Zhang *et al.*, 2008).

Tipo II: implementación de aditivos y recubrimientos en el concreto: Las técnicas que se emplean en este tipo de control buscan incrementar la durabilidad, la resistencia y las propiedades del concreto o de la superficie de concreto que se exponen al ataque del ácido sulfúrico, para así disminuir el impacto del ataque o prolongar el tiempo de servicio de las estructuras. A continuación se muestran las principales técnicas del tipo II.

a) *Materiales suplementarios de cemento.* El uso de materiales que suplen al cemento en las mezclas de concreto ha sido evaluado en diversas investigaciones. El método de prueba que utilizan muchos de estos estudios es la exposición de los especímenes de concreto o mortero con modificaciones en diferentes soluciones de ácido sulfúrico químico. Esto, si bien no da valores exactos del comportamiento de estas mezclas frente al ataque biológico que se presenta como tal en los sistemas de alcantarillado, sí permite medir en cierto modo las reacciones químicas y los rendimientos de estas nuevas mezclas.

Uno de los materiales con los que se ha experimentado es el humo de sílice, también conocido como *microsilicio*. Según estudios, reemplazar el 15% del cemento por humo de sílice mejora la resistencia en una solución de ácido al 1% (Joorabchian, 2010). Sin embargo, en el 2002, pruebas microbiológicas realizadas en la Universidad de Ghent demostraron que las mezclas

con humo de sílice presentaron un porcentaje de pérdida de masa mayor y una disminución en el espesor de 4,4%; por ende, se concluyó que el humo de sílice presenta una influencia negativa frente al ataque por ácido sulfúrico biogénico (Vincke *et al.*, 2002).

El humo de sílice también se ha utilizado en mezclas con cemento puzolánico, donde la expansión fue menor, pero la pérdida de masa aumentó respecto a las muestras que no contenían humo de sílice (Girardi y Di Maggio, 2011; Girardi, Vaona y Di Maggio, 2010). Las probetas de concreto con suplemento de piedra caliza, puzolana y escoria de alto horno, expuestas a una inmersión cíclica en una solución de sulfato de sodio (50 gL^{-1}) y otra solución de ácido sulfúrico ($\text{pH} = 2,0$), presentaron un daño severo y una expansión considerable con respecto a unas mezclas que adicionaban humo de sílice (Girardi, Vaona y Di Maggio, 2010).

Probetas de concreto con silicatos hidratados se sometieron a ocho ciclos de inmersión en un ambiente microbiológico y en soluciones químicas. Como resultado se obtuvo una pérdida de masa menor, cercana a la mitad que la que demostró las probetas de concreto sin modificación o a la pérdida de masa que se presenta por el ataque en la pasta de cemento (De Muynck, De Belie y Verstraete, 2009).

La adición de escoria de alto horno a las mezclas de concreto ha demostrado una reducción considerable en la incidencia sobre la expansión ocasionada por el ataque con ácido sulfúrico (O'Connell, McNally y Richardson, 2012). En la investigación de Makhloufi (2011) se probó la respuesta de una serie de morteros con diferentes cantidades y combinaciones de materiales suplementarios. Como resultado se obtuvo que para la mezcla que contenía un 30% de puzolana y la que contenía un 30% de cenizas de alto horno, la pérdida de masa fue mínima en comparación con el mortero de control (compuesto por 95% clínker y 5% de yeso) y el que contenía un 30% de piedra caliza. Esto se da posiblemente por la presencia de minerales vulnerables al ataque químico, que las primeras mezclas de mortero no contienen (Makhloufi *et al.*, 2012).

El implemento de cenizas volantes en diferentes proporciones en las mezclas de concreto del 0 al 70% demostró un buen comportamiento de las probetas frente a la inmersión durante 60 días en una

solución al 5% de ácido sulfúrico. De esta manera, las muestras con un contenido del 70% perdieron 2,1% de resistencia y un 1,1% de masa, en comparación con las muestras que contenían un 0%, dado que estas perdieron un 58% en resistencia y un 8,3% de masa (Aydın *et al.*, 2007).

Otro material que se ha estudiado es el metacaolín, un iluminó silicato que influye en las propiedades del concreto, al incrementar la resistencia frente a la reacción álcali sílice. El esfuerzo a flexión y compresión reduce la permeabilidad de la superficie y, en general, mejora la durabilidad del este. En una investigación se sumergieron cilindros de concreto con 73,5 kgm^{-3} y 98 kgm^{-3} de metacaolín a soluciones de 3%, 5% y 7% de ácido sulfúrico. El análisis de la pérdida de masa demuestra que esta se redujo un 26,24%, un 23,90% y un 26,67%, respectivamente, en comparación con la mezcla de control en cada solución (Joorabchian, 2010). Sin embargo, el uso de materiales cementantes suplementarios no representa un mejoramiento total de la resistencia contra la deterioración ocasionada por el ataque químico combinado de sulfatos y ácido sulfúrico (Girardi y Di Maggio, 2011).

b) Concreto polimérico y polímeros modificadores. El concreto polimérico es usado en tuberías de pequeños diámetros y no reforzadas. Algunas de las características mecánicas de estos concretos son mayores a las del concreto convencional; sin embargo, son muy costosos (Joorabchian, 2010); en un rango entre el 20% y el 50% más que el concreto usado normalmente para la fabricación de tuberías (Vincke *et al.*, 2002).

La efectividad de la adición del polímero acrílico éster estireno se ha demostrado en algunas investigaciones: la reducción en el espesor fue de 1,7% y la pérdida de peso fue de 6,5%, mientras que el concreto de referencia, es decir, la mezcla con cemento *portland*, presentó valores de 2,7% y 7,4%, respectivamente. Estos especímenes se sometieron a cuatro ciclos de pruebas microbiológicas (Vincke *et al.*, 2002). Las mezclas que implementan estireno butadieno y policloruro de vinilo no presentan ninguna mejora en los resultados, mientras que el polímero acrílico arroja resultados mayores en disminución del espesor (4,1%) y en pérdida de peso (8,4%), con referencia al concreto anteriormente mencionado.

El mortero híbrido modificado con látex de acetato de polivinilo, lignosulfato, fosfato de tributilo y Na_2SiO_3 demostró una pérdida de resistencia a la compresión de 29,4% y una porosidad de 13,25%, después de ser sometido a cinco años de ataque por ácido sulfúrico, mientras que el mortero de referencia obtuvo valores 50,6% y 28,6%, respectivamente. La superficie del mortero modificado presentó menos fisuras (Li *et al.*, 2009); por ende, este mortero ayuda a la mitigar el ataque químico por ácido.

El uso de melanina, de estireno butadieno látex y emulsión no ayuda a controlar significativamente la degradación ocasionada por el ácido. De hecho, se presentan pérdidas de masa mayor; además estos materiales son muy costosos, ya que en una tubería de 0,6 m de diámetro se aumenta el costo en 7,95 euros por tubería o 70,33 euros por metro cubico (Pacheco-Torgal y Jalali, 2009).

c) *Recubrimientos protectores.* El uso de recubrimientos ha demostrado gran efectividad frente a la acción del ácido sulfúrico. Los recubrimientos epóxicos y los revestimientos con poliuria presentan una gran protección si se compara con el recubrimiento de cemento, que registra una gran pérdida de masa (De Muynck *et al.*, 2009). Sin embargo, el uso de dos mezclas de mortero como recubrimientos, elaboradas con un cemento que presenta altos contenidos de aluminato de calcio, arrojó algunos resultados interesante: una de las mezclas CC se desarrolló especialmente para tolerar ataques de corrosión por ácido sulfúrico químico y biogénico y demostró un buen desempeño en la exposición a una solución de 2% de ácido sulfúrico. Como resultado se obtuvo una disminución de pérdida de peso de 0,56% y de resistencia del 34% después de 150 días de exposición (Saricimen *et al.*, 2003).

Los recubrimientos con cemento polimérico (poliéster) aumentan el periodo de vida de los elementos de concreto 71 veces frente a un ataque de 3 años, en una solución de ácido sulfúrico al 3% (Liu y Vipulanandan, 2001). Los recubrimientos de poliuretano también se han probado frente a la acción del ataque con ácido sulfúrico: los resultados muestran un cambio de peso entre 0,44% y -0,97 %, con lo cual se prolonga la vida de los elementos entre 14 y 57 veces más. Estos valores dependen de las características físicas y mecánicas y del espesor de la

capa de recubrimientos que se apliquen sobre la superficie de concreto (Vipulanandan y Liu, 2005).

Otro de los recubrimientos probados en esta área es el recubrimiento epóxido reforzado con fibras de vidrio, que logra prolongar la vida de los elementos un 70% más que los elementos sin recubrimiento, frente a una exposición durante 20 meses, en una solución de ácido sulfúrico al 3%; además presenta una probabilidad de falla del 50% (Vipulanandan y Liu, 2002).

El problema con el uso de recubrimientos y revestimientos es el alto costo que presentan. A pesar de que dependen del tipo de recubrimiento y del espesor de la capa, se estima que el incremento es de alrededor de dos a tres veces más el costo de una tubería de concreto convencional (Joorabchian, 2010; Vincke, 2002); sin embargo, estos revestimientos llega a ser viables para tuberías de diámetro pequeño (Pacheco-Torgal y Jalali, 2009).

d) *Refuerzo con fibras.* Las microfibras y las fibras se utilizan para mejorar la tenacidad y la resistencia al impacto del concreto; no obstante, el rendimiento de separación es relativamente grande de fibra a fibra y tiene una superficie específica pequeña. Esto limita la efectividad de las fibras y microfibras para controlar las microfisuras que se ocasionan en la segunda fase del ataque por ácido sulfúrico, es decir, la formación de etringita.

La pérdida de peso y la pérdida de espesor que se presentó en probetas de concreto con diferentes sistemas de refuerzo señaló algunas mejoras en la resistencia al ácido con nanoplatelets de grafito (GP), microfibra sintética y especialmente híbrido (GP/PVA) de refuerzo (Peyvandi *et al.*, 2013). El refuerzo con fibras de vidrio ha probado ser un buen sistema protector; además, las tuberías de concreto son más livianas, pero solo se fabrican en diámetros de 10 pies (Joorabchian, 2010).

Las características de los agregados implementados en la elaboración de las mezclas, las mezclas con bajas relaciones de agua cemento y las mezclas de alto rendimiento también se han evaluado frente al ataque químico del ácido sulfúrico (Bassuoni y Nehdi, 2007; Girardi y Di Maggio, 2011; Makhloufi *et al.*, 2012); sin embargo, ninguno de estos presenta una solución definitiva a la corrosión por ácido sulfúrico biogénico.

Tipo III: métodos antimicrobianos: El uso de recubrimientos antimicrobianos como nanomateriales, óxidos metálicos o aditivos que buscan reducir o eliminar la actividad de los diversos microorganismos presentes en los colectores de aguas residuales es un campo de investigación relativamente nuevo. Se han realizado experimentos a partir de los cuales se ha obtenido cierta inhibición de la actividad microbiana cuando los cultivos de *Thiobacillus* son expuestos a concreto con adición de formiato de calcio en la mezcla (Yamanaka *et al.*, 2002). Se informó también la eficacia de una sal en agua estabilizada de silicón de amonio cuaternario, que se añadió a una mezcla de concreto para inhibir el crecimiento de *Thiobacillus*.

Los recubrimientos antimicrobianos se han implementado en el concreto, utilizando fibras tratadas con biocidas (*Fibermesh*, fibras que contienen el aditivo *Microban B*). Se desarrollaron para mejorar las condiciones higiénicas de concreto local. El concreto que contiene estas fibras es muy eficaz en la inhibición del crecimiento de hongos y bacterias, tales como *Escherichiacoli* y *Staphylococcus aureus*. No hay informes disponibles en la inhibición de las bacterias sulfooxidantes (De Muynck *et al.*, 2009).

Las zeolitas son otro componente con el que se han realizado investigaciones, dado que son materiales con propiedades bactericidas con iones metálicos, de aluminio, plata, zinc y cobre (Beving, O'Neill y Yan, 2008; De Muynck *et al.*, 2009; Haile, Nakhla y Allouche, 2008). Es un producto con una concentración del 1% que se encuentra en el mercado japonés. La eficiencia de las zeolitas se ha probado en diversos experimentos en los que la liberación de iones de plata les da altas características antimicrobianas y una resistencia al ataque por ácido sulfúrico producido biológicamente. Además, el uso de zeolitas genera un incremento en el número de microporos y una disminución en el número de macroporos del concreto. Como resultado se eliminan los productos expansivos de la corrosión por ASB en el interior de la pasta de cemento (Haile, Nakhla y Allouche, 2008).

Los nanoóxidos de cobre, junto con un recubrimiento de zeolitas, se utilizaron para reducir la actividad microbiológica. Así, se aplicó en la superficie de unas tuberías de concreto convencionales; el recubrimiento de cobre

altamente corroído mostró un 0% de actividad microbiana (Haile *et al.*, 2010). Este estudio estimó los límites de concentración mínimos para la inhibición de las bacterias de nanoóxido de cobre en los revestimientos de tuberías entre 2,3 mg y 2,6 mg.

El cobre tiene características altamente biosidas, debido a que tienen un efecto tóxico y disminuyen el crecimiento de estas. La deposición electrocinética de recubrimientos de óxido cuproso es un proceso efectivo para instalar este tratamiento antimicrobiano en superficies de concreto corroídas o sin corroer (Vaidya y Allouche, 2010).

Un método menos ensayado y, de hecho, nuevo en este campo es la implementación de una biopelícula de *Escherichia coli DH5a*, la cual proporciona una biocapa protectora como una barrera física en la superficie del mortero y así reduce la permeabilidad frente al entorno agresivo que contiene ácido sulfúrico. Los datos y el análisis que se realizaron sugieren que la presencia de biopelículas reduce el deterioro de mortero por el ataque químico. En las pruebas, la biopelícula se mantuvo viva y en continuo crecimiento durante el proceso de acidificación (Soleimani, Isgor y Ormeci, 2013).

3. Conclusiones

Con base en la revisión realizada, la adición de químicos a los sistemas de conducción de aguas residuales no son totalmente efectivos y llegan a producir cargas de contaminantes considerables para las fuentes receptoras de aguas residuales, lo cual ocasiona problemas mayores de salubridad.

La mayoría de las soluciones del segundo tipo que se han investigado aumentan la vida útil de los elementos de concreto expuestos a diferentes soluciones de ácido químico y a diferentes ciclos de pruebas microbiológicas; sin embargo, el costo de estas soluciones también es mucho mayor. La corrosión generada en los elementos de concreto por la acción del ácido sulfúrico biogénico es un proceso complejo, y a pesar de todas las investigaciones realizadas, no se ha podido establecer un mecanismo que controle por completo todas las variables que inciden en dicho problema y lo mitiguen realmente.

Las técnicas del tipo III son las más efectivas, ya que atacan directamente a las bacterias; sin embargo, por ser un campo estudiado recientemente, los

resultados no son del todo confiables: hacen falta más estudios sobre el incremento de costos y las afectaciones que podrían tener en sobre el ambiente y la salud humana.

4. Referencias

- Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H. y Baradan, B. (2007). Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 42(2), 717-721. Doi: 10.1016/j.buildenv.2005.10.024
- Bassuoni, M. T. y Nehdi, M. L. (2007). Resistance of self-consolidating concrete to sulfuric acid attack with consecutive pH reduction. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1070-1084. Doi: 10.1016/j.cemconres.2007.04.014
- Beving, D. E., O'Neill, C. R. y Yan, Y. (2008). Hydrophilic and antimicrobial low-silica-zeolite LTA and high-silica-zeolite MFI hybrid coatings on aluminum alloys. *Microporous and Mesoporous Materials*, 108(1-3), 77-85. Doi: 10.1016/j.micromeso.2007.03.029
- Chen, G.-H. y Leung, D. H. (2000). Utilization of oxygen in a sanitary gravity sewer. *Water Research*, 34(15), 3813-3821. Doi: 10.1016/S0043-1354(00)00143-3
- De Muynck, W., De Belie, N. y Verstraete, W. (2009). Effectiveness of admixtures, surface treatments and antimicrobial compounds against biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(3), 163-170. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.12.004
- Espinosa Márquez, J., Revah, S. y Le Borgne, S. (2010). Rutas metabólicas de oxidación del azufre en bacterias quimiolitotóxicas, relevancia ambiental y biotecnología. *Mensaje Bioquímico*, 34, 101-120.
- Girardi, F. y Maggio, R. D. (2011). Resistance of concrete mixtures to cyclic sulfuric acid exposure and mixed sulfates: Effect of the type of aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 276-285. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.10.015
- Girardi, F., Vaona, W. y Di Maggio, R. (2010). Resistance of different types of concretes to cyclic sulfuric acid and sodium sulfate attack. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 595-602. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.07.002
- Gutierrez, O., Sudarjanto, G., Ren, G., Ganigué, R., Jiang, G. y Yuan, Z. (2014). Assessment of pH shock as a method for controlling sulfide and methane formation in pressure main sewer systems. *Water Research*, 48(0), 569-578. Doi: 10.1016/j.watres.2013.10.021
- Haile, T., Nakhla, G. y Allouche, E. (2008). Evaluation of the resistance of mortars coated with silver bearing zeolite to bacterial-induced corrosion. *Corrosion Science*, 50(3), 713-720. Doi: 10.1016/j.corsci.2007.08.012
- Haile, T., Nakhla, G., Allouche, E. y Vaidya, S. (2010). Evaluation of the bactericidal characteristics of nano-copper oxide or functionalized zeolite coating for bio-corrosion control in concrete sewer pipes. *Corrosion Science*, 52(1), 45-53. Doi: 10.1016/j.corsci.2009.08.046
- Hernández, M., A. Marchand, E., Roberts, D. y Peccia, J. (2002). In situ assessment of active Thiobacillus species in corroding concrete sewers using fluorescent RNA probes. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(4), 271-276. Doi: 10.1016/S0964-8305(02)000549
- Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J. y Matos, J. S. (2002). The sewer as a bioreactor - a dry weather approach. *Water Sci. Technol.*, 45(3), 11-24.
- Jiang, G., Keating, A., Corrie, S., O'Halloran, K., Nguyen, L. y Yuan, Z. (2013). Dosing free nitrous acid for sulfide control in sewers: Results of field trials in Australia. *Water Research*, 47(13), 4331-4339. Doi: 10.1016/j.watres.2013.05.024
- Joorabchian, S. M. (2010). *Durability of concrete exposed to sulfuric attack*. Toronto: Ryerson University.
- Li, G., Xiong, G., Lü, Y. y Yin, Y. (2009). The physical and chemical effects of long-term sulphuric acid exposure on hybrid modified cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 325-330. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.02.014
- Liu, H.-L., Lan, Y.-W. y Cheng, Y.-C. (2004). Optimal production of sulphuric acid by Thiobacillus thiooxidans using response surface methodology. *Process Biochemistry*, 39(12), 1953-1961. Doi: 10.1016/j.procbio.2003.09.018
- Liu, J. y Vipulanandan, C. (2001). Evaluating a polymer concrete coating for protecting non-metallic underground facilities from sulfuric

- acid attack. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), 311-321. Doi: 10.1016/S0886-7798(01)00053-0
- Makhloufi, Z., Kadri, E. H., Bouhicha, M. y Benaissa, A. (2012). Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution. *Construction and Building Materials*, 26(1), 497-504. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.06.050
 - Massol, A. (s. f.). Nutrientes y gases: azufre. Recuperado de <http://goo.gl/nxzJxE>
 - Monteny, J., De Belie, N., Vincke, E., Verstraete, W. y Taerwe, L. (2001). Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer-modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(9), 1359-1365. Doi: 10.1016/S0008-8846(01)00565-8
 - Monteny, J., Vincke, E., Beeldens, A., De Belie, N., Taerwe, L., Van Gemert, D. y Verstraete, W. (2000). Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 623-634. Doi: 10.1016/S0008-8846(00)00219-2
 - Nica, D., Davis, J. L., Kirby, L., Zuo, G. y Roberts, D. J. (2000). Isolation and characterization of microorganisms involved in the biodeterioration of concrete in sewers. *International Bio deterioration & Biodegradation*, 46(1), 61-68. Doi: /10.1016/S0964-8305(00)00064-0
 - O'Connell, M., McNally, C. y Richardson, M. G. (2010). Biochemical attack on concrete in wastewater applications: A state of the art review. *Cement and Concrete Composites*, 32(7), 479-485. Doi: 10.1016/j.cemconcomp.2010.05.001
 - O'Connell, M., McNally, C. y Richardson, M. G. (2012). Performance of concrete incorporating GGBS in aggressive wastewater environments. *Construction and Building Materials*, 27(1), 368-374. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.07.036
 - Pacheco-Torgal, F. y Jalali, S. (2009). Sulphuric acid resistance of plain, polymer modified, and fly ash cement concretes. *Construction and Building Materials*, 23(12), 3485-3491. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.001
 - Pérez Sanz, D. (2007). *El efecto corona en la red de saneamiento del Área Metropolitana de Barcelona*. Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.
 - Peyvandi, A., Soroushian, P., Balachandra, A. M. y Sobolev, K. (2013). Enhancement of the durability characteristics of concrete nanocomposite pipes with modified graphite nanoplatelets. *Construction and Building Materials*, 47(0), 111-117. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.002
 - Roberts, D. J., Nica, D., Zuo, G. y Davis, J. L. (2002). Quantifying microbially induced deterioration of concrete: initial studies. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(4), 227-234. Doi: 10.1016/S0964-8305(02)00049-5
 - Sand, W. (2008). *Microbial corrosion and its inhibition biotechnology set*. S. l: Wiley.
 - Saricimen, H., Shameem, M., Barry, M. S., Ibrahim, M. y Abbasi, T. A. (2003). Durability of proprietary cementitious materials for use in wastewater transport systems. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5), 421-427. Doi: 10.1016/S0958-9465(02)00082-3
 - Soleimani, S., Isgor, O. B. y Ormeci, B. (2013). Resistance of biofilm-covered mortars to microbiologically influenced deterioration simulated by sulfuric acid exposure. *Cement and Concrete Research*, 53(0), 229-238. Doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.016
 - Starosvetsky, J., Zukerman, U. y Armon, R. H. (2013). A simple medium modification for isolation, growth and enumeration of Acidithiobacillus thiooxidans (syn. Thiobacillus thiooxidans) from water samples. *Journal of Microbiological Methods*, 92(2), 178-182. Doi: 10.1016/j.mimet.2012.11.009
 - Vaidya, S. y Allouche, E. N. (2010). Electrokinetically deposited coating for increasing the service life of partially deteriorated concrete sewers. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2164-2170. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.042
 - Vincke, E. (2002). *Biogenic sulfuric acid corrosion of concrete: microbial interaction, simulation and prevention* (tesis de doctorado). Gante, Bélgica: Universidad de Gante.
 - Vincke, E. et al. (2002). Influence of polymer addition on biogenic sulfuric acid attack of concrete. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(4), 283-292. Doi: 10.1016/S0964-8305(02)00055-0
 - Vipulanandan, C. y Liu, J. (2002). Glass-fiber mat-reinforced epoxy coating for concrete in

sulfuric acid environment. *Cement and Concrete Research*, 32(2), 205-210. Doi: 10.1016/S0008-8846(01)00660-3

- Vipulanandan, C. y Liu, J. (2005). Performance of polyurethane-coated concrete in sewer environment. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1754-1763. Doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.033
- Yamanaka, T. *et al.* (2002). Corrosion by bacteria of concrete in sewerage systems and inhibitory effects of formates on their growth. *Water Research*, 36(10), 2636-2642. Doi: 10.1016/S0043-1354(01)00473-0
- Yousefi, A., Allahverdi, A. y Hejazi, P. (2014). Accelerated biodegradation of cured cement paste by *Thiobacillus* species under simulation condition. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 86, Part C(0), 317-326. Doi: 10.1016/j.ibiod.2013.10.008
- Zhang, L., De Schryver, P., De Gussemé, B., De Muynck, W., Boon, N. y Verstraete, W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42(1-2), 1-12. Doi: 10.1016/j.watres.2007.07.013