

Microbially Induced Corrosion of Concrete

Members of ACI Committee 201 Task Group 5 explain the science of biogenic acidification in sewer system structures

by Samuel J. Lines, David A. Rothstein, Brent Rollins, and Charles (Chuck) Alt

Despite being one of the most durable construction materials, concrete can exhibit deterioration resulting from contact with chemicals, minerals, or environmental conditions. Common mechanisms of deterioration include damage from freezing and thawing, salt attack, and carbonation. A lesser-known cause of deterioration is microbially induced corrosion of concrete (MICC).

The root cause of MICC has been well documented; after World War II, C.D. Parker discovered that a sulfur-oxidizing bacterium, *Acidithiobacillus thiooxidans*, was involved in converting hydrogen sulfide (H_2S) gas into sulfuric acid (H_2SO_4).¹ Parker originally called these bacteria *Thiobacillus concretivorus* because they eat concrete. The acid attacks the concrete, causing the surface to erode or “corrode,” as it is termed in the sewer infrastructure literature (not to be confused with reinforcing steel corrosion). Since the initial identification of *Acidithiobacillus thiooxidans*, others have confirmed that it is the primary bacteria that causes MICC of concrete pipes in sewer systems.² These bacteria live at a very low pH, perhaps 2 to 4, whereas concrete has a pH of about 13 after manufacture. The high initial pH of new concrete provides a period of immunity to most bacterial growth. As the surface pH of the concrete is lowered by carbonation and sewer gases, however, it becomes more hospitable to hosting bacterial colonies.

Based on work by Islander et al.³ and confirmed by House,⁴ the corrosion process has three distinct phases (Fig. 1). Phase one is carbonation of the concrete. Over time, the natural process of carbonation will gradually lower the pH of the concrete to below 9. Phase two is the biological attachment phase, when neutrophilic sulfur-oxidizing bacteria (NSOB) such as *Thiomonas intermedia*, *Halothiobacillus neapolitanus*, and *Thiobacillus thioparus* will begin to colonize. Sand and Bock,⁵ as well as Cho and Mori,⁶ state that these species are required for *Acidithiobacillus thiooxidans* to colonize. Acids react with the calcium hydroxide ($Ca(OH)_2$) and calcium

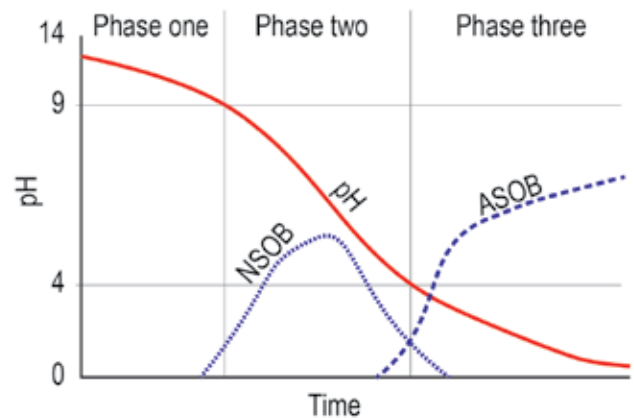


Fig. 1: A schematic representation of pH versus time for the three-stage process of MICC

silicate hydrate (CSH) constituents of concrete that provide this high alkalinity.

Phase three is the acid corrosion phase. *Acidithiobacillus thiooxidans*, an acidophilic sulfur-oxidizing bacteria (ASOB), produces a strong H_2SO_4 , rapidly deteriorating the concrete. Under extreme conditions, with high H_2S gas concentrations above the sewer liquid level, the erosion rate can reach up to 1/2 in./year (12 mm/year). Depending on concrete quality and sewer conditions, it can take anywhere from 2 to 15 years for the final phase to cause significant damage.

Sewer System Issues

From the 1940s through the 1970s, the United States experienced rapid development of suburbs, resulting in the creation of massive networks of underground infrastructure to handle sewer waste. Many of these networks consisted of combined sewer systems, designed to collect rainwater runoff, domestic sewage, and industrial wastewater in the same pipe.

In the late 1970s, Pomeroy and Parkhurst created a formula for forecasting the sulfide buildup in sewers.⁷ This model allowed sewer engineers to design structures with additional concrete as a sacrificial layer. In 1985, the United States Environmental Protection Agency (US EPA) published the “Design Manual for Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants.”⁸ This became a model for engineers to use for designing better infrastructure.

It has been suggested that the Clean Water Act of 1977⁹ and the Water Quality Act of 1987¹⁰ affected the severity of degradation in sewers by reducing the flow of the sewage.¹¹ The new regulations led to the diversion of stormwater from sewer systems, which greatly reduced both the volume of liquid and the metals that are toxic to microbes in the sanitary sewers. The reductions in flow and toxic metals thus created an environment prone to increased amounts of H₂S gas. Unfortunately, the existing predictive models did not adequately consider these changes.

The formation of H₂S begins once the sewage water is deprived of dissolved oxygen, which takes some time after entering the sewage network. Sanitary sewage is partially decomposed by numerous strains of bacteria in the water and other naturally occurring processes. This bacterial activity consumes the dissolved oxygen in the water and, at some point in time, sewage reaches anaerobic conditions. Even before the water becomes anaerobic, the sediments and the scum deposits in the bottom of the sewer may be deprived of oxygen.

Some bacteria are adapted to anaerobic conditions and do not need oxygen to survive. One of these species is *Desulfovibrio sp.*, a sulfate-reducing bacteria (SRB) that converts the sulfate in the wastewater to H₂S. The H₂S has a low solubility in water, so it will tend to escape. When there is turbulence, the H₂S sulfide gas is released into the atmosphere above the waterline. As H₂S is heavier than air, it tends to stay in the underground sewage system. As the bacteria need some time to consume the dissolved oxygen in water, the formation of H₂S increases with the transit time in the sewage system. The longer the time the sewage water needs to travel from the household to the treatment plant, the more H₂S issues will occur.

Carbon dioxide (CO₂), thiosulfuric acid, and other mild acids abiotically reduce the pH of the concrete to around 9. This process can take months or even years, depending on the concrete quality. Once the concrete pH is below 9, colonization by alkaliphile microorganisms begins. Among them, a strain of *Thiobacillus* begins to colonize that is aerobic (requires oxygen). These bacteria convert H₂S into H₂SO₄. The weak H₂SO₄ produced by this strain lowers the pH of the concrete until it dies off and another strain colonizes. Each strain of aerobic *Thiobacillus* produces a stronger H₂SO₄ than the previous one.

While all concrete can be susceptible to this degradation, not all installations have the same environmental conditions that trigger the chain reaction. There is uncertainty about exactly what conditions must be present for the reactions to



Fig. 2: Calcium sulfate (gypsum) forms a whitish foamy mass on concrete

occur. Some theories suggest a high amount of sulfur in the water supply, a high iron content in the water, very hard water, and chemicals introduced into the waste stream, just to name a few. Sites with high relative humidity are reported as having more severity as well.¹¹ More research is needed to correlate lab testing and field conditions.

Cement Hydration and MICC

During the hydration of cement, CSH is formed and provides the desirable properties of hardened concrete. Typical hydrated cement forms about 50% CSH. Another compound, Ca(OH)₂, is also formed and composes 15 to 25% of the cement paste by mass.¹² By days 3 to 7 of the hydration process, the mass of the concrete is primarily composed of three compounds: CSH, Ca(OH)₂, and calcium aluminoferrite hydrates.

Ca(OH)₂ is hydrated lime and does not contribute to the strength or other desirable properties of the concrete, except perhaps to maintain the protective high pH environment around the reinforcing steel. Ca(OH)₂ will easily react with acids and other compounds. The reaction with CO₂ forms calcium carbonate, resulting in what is referred to as concrete carbonation. When H₂SO₄ reacts with Ca(OH)₂, the result is a hydrated calcium sulfate mineral known as gypsum (CaSO₄·H₂O). As such, gypsum is a primary indicator of MICC and often appears as a whitish foamy mass on the concrete (Fig. 2).

Advertise in Ci

For more information, contact
Jeff Rhodes, VP Sales
E-mail: jeff.rhodes@mci-group.com



MCI USA: +1.410.584.8487

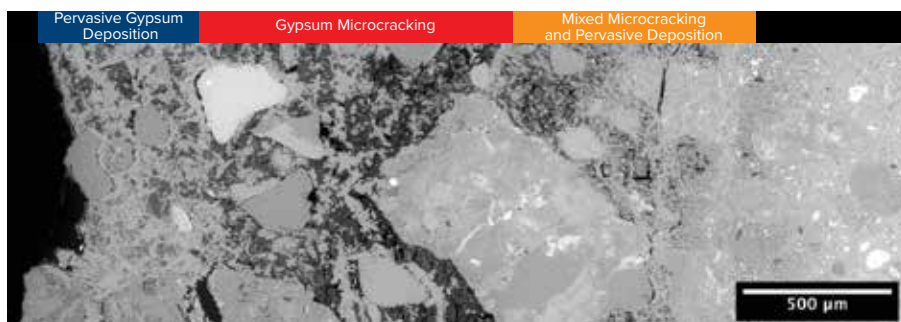


Fig. 3: A backscatter electron micrograph of alteration zones in a corroded concrete specimen (after Reference 13)

In the next step of this process, the concrete disintegrates even more. After H_2SO_4 consumes $Ca(OH)_2$, it reacts chemically with the aluminates present in the cement paste. This reaction forms ettringite, an expansive sulfoaluminate compound. As the ettringite forms, it causes internal expansion, which in turn causes cracking and spalling to occur. This chain of events allows more penetration, access to $Ca(OH)_2$, and a snowball of chemical reactions and damage to concrete (Fig. 3).

Concrete Mixtures and MICC

In a harsh environment exposed to sulfates, chlorides, or acids, it is very important to use a high-quality concrete mixture with a low water-cement ratio (w/c). According to the book *Design and Control of Concrete Mixtures*,¹² “Decreased permeability improves concrete’s resistance to freezing and thawing, re-saturation, sulfate, and chloride-ion penetration, and other chemical attack.” It is very important to reduce the permeability to increase durability. A w/c of 0.45 is good for most concrete products that are not exposed to harsh conditions. If there is a potential that the concrete will be exposed to these harsh conditions, the w/c should not exceed 0.40.

In addition to a low w/c , the use of pozzolanic and secondary cementitious materials can increase the density and lower concrete permeability. Fly ash, slag cement, and silica fume are just a few of the options. Using one or more of these mineral admixtures in the concrete mixture design will increase the strength and density while lowering the porosity and improving chemical resistance. Promising work with nanomaterials like colloidal silica also indicates significant reductions in permeability.¹⁴

Protecting Concrete from MICC

While concrete densification is important to increasing the life of the concrete structure, it will not stop the biological process that causes the *Thiobacillus* bacteria to secrete H_2SO_4 . However, concrete admixtures and surface-applied antimicrobial sealers are effective at reducing the effects of MICC.¹⁵ The effectiveness of these products can be evaluated using ASTM C1904.¹⁶

When a sewage structure is expected to be exposed to

very high concentrations of H_2S gas, the designer may choose to protect the concrete with a resin-based coating like epoxy or polyurea. These materials show good resistance to acid. However, most of them are of a hydrophobic nature—the concrete and the surrounding air must be dry enough to achieve a good bonding and polymerization. Resin-based liners do not impede the bacterial growth, so their surfaces will become very acidic with time. As long as

there is no flaw, pinhole, or puncture, H_2SO_4 will not reach the concrete beneath.

Another approach to protect sewage concrete infrastructures from H_2S corrosion is to apply a mortar made of calcium aluminate cement (CAC) and calcium aluminate aggregate. CAC is a specialty cement with a different chemistry than portland cement. CAC inhibits bacterial activity when the surface pH approaches around 4 under the activity of bacteria. CAC does not have a biocide effect (the bacteria are not killed),¹⁷ but bacteria go into stasis and stop transforming the H_2S into H_2SO_4 . As no new acid is formed, the corrosion process is drastically slowed.¹⁸⁻²⁰ Thus, it is possible to protect ordinary concrete with a mineral barrier made of CAC rather than a polymer barrier. Antimicrobial additives have also been incorporated into these barriers.

Physical barriers such as liners and coatings are another option for controlling MICC. Membrane-forming liners have the ability to bridge cracks and other imperfections such as honeycombing that may be points of accelerated ingress. However, liners and coatings require periodic inspection and repair or replacement to ensure continued satisfactory operation. Liners and coatings can be tested using ASTM C1898²¹ to validate performance in stage three of corrosion.

Summary

According to a 2002 study by the Federal Highway Administration (FHWA),¹⁷ corrosion of metals is estimated to annually result in about \$36 billion in damage to the water and sewer system in the United States. MICC is probably a lesser-known and less-documented deterioration mechanism than steel corrosion or joint leakages that owners must deal with. A better understanding of MICC and the complex ecosystem of bacteria that drive it should permit engineers to improve design practices for new systems and rehabilitate existing structures. ACI Committee 201, Durability of Concrete, is working to improve the knowledge of this worldwide issue.

Acknowledgments

We thank the members of ACI 201-TG5, Microbially Induced Corrosion of Concrete, for their input. We also thank Patrick McGrath and Jean Herisson for contributing to this article.

References

1. Parker, C.D., "The Corrosion of Concrete: 1. The Isolation of a Species of Bacterium Associated with the Corrosion of Concrete Exposed to Atmospheres Containing Hydrogen Sulphide," *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Sciences*, V. 23, No. 2, June 1945, pp. 81-90.
2. Vincke, E.B.; Boon, N.; and Verstraete, W., "Analysis of the Microbial Communities on Corroded Concrete Sewer Pipes—A Case Study," *Applied Microbiology and Biotechnology*, V. 57, No. 5-6, Dec. 2001, pp. 776-785.
3. Islander R.L.; Deviny, J.S.; Mansfeld, F.; Postyn, A.; and Shih, H., "Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers," *Journal of Environmental Engineering*, V. 117, No. 6, Nov. 1991, pp. 751-770.
4. House, M.W., "Using Biological and Physico-Chemical Test Methods to Assess the Role of Concrete Mixture Design in Resistance to Microbially Induced Corrosion," MS thesis, Department of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 2013.
5. Sand, W.B., and Bock, E., "Concrete Corrosion in the Hamburg Sewer System," *Environmental Technology Letters*, V. 5, No. 12, Dec. 1984, pp. 517-528.
6. Cho, K.-S., and Mori, T., "A Newly Isolated Fungus Participates in the Corrosion of Concrete Sewer Pipes," *Water Science Technology*, V. 31, No. 7, 1995, pp. 263-271.
7. Pomeroy, R.D., and Parkhurst, J.D., "The Forecasting of Sulfide Build-up Rates in Sewers," *Proceedings of the Eighth International Conference on Water Pollution Research*, Sydney, Australia, 1978, pp. 621-628.
8. "Design Manual: Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants," EPA/625/1-85/018, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1985.
9. "Clean Water Act of 1977," Dec. 27, 1977, www.legislation.law.iu.edu/clean-water-act-of-1977.
10. "Water Quality Act of 1987," Feb. 4, 1987, www.legislation.law.iu.edu/water-quality-act-of-1987.
11. Wells, T., and Melchers, R.E., "An Observation-Based Model for Corrosion of Concrete Sewers Under Aggressive Conditions," *Cement and Concrete Research*, V. 61-62, July-Aug. 2014, pp. 1-10.
12. Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W.C., "Design and Control of Concrete Mixtures," *EB001*, fourteenth edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002, 358 pp.
13. Qiao, C., and Rothstein, D., "Microstructural Evaluation of Durability of Different Cementitious Mixtures in Microbial Induced Corrosion Environments," *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020)*, C. Serrat, J.R. Casas, and V. Gibert, eds., Barcelona, Spain, 2020, 2 pp.
14. ACI Committee 241, "Report on Application of Nanotechnology

MARK YOUR CALENDARS!



Strategic
Development
Council

aciFoundation

SDC Virtual Technology Forum 50

Registration Details to Follow

Sessions: August 24-26, 2021

Specific Times to Be Announced

Details at: www.acifoundation.org/technology/forums

Follow us:   

and Nanomaterials in Concrete (ACI 241R-17),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 36 pp.

15. Erbehtas, A.R.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., “Evaluating the Efficacy of Antimicrobial Additives against Biogenic Acidification in Simulated Wastewater Exposure Solutions,” *RILEM Technical Letters*, V. 4, Aug. 2019, pp. 49-56.

16. ASTM C1904-20, “Standard Test Methods for Determination of the Effects of Biogenic Acidification on Concrete Antimicrobial Additives and/or Concrete Products,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 13 pp.

17. Koch, G.H.; Brongers, M.P.H.; Thompson, N.G.; Virmani, Y.P.; and Payer, J.H., “Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States,” *FHWA-RD-01-156*, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2002, 773 pp.

18. Ehrich, S.; Helard, L.; Letourneaux, R.; Willocq, J.; and Bock, E., “Biogenic and Chemical Sulfuric Acid Corrosion of Mortars,” *Journal of Materials in Civil Engineering*, V. 11, No. 4, Nov. 1999, pp. 340-344.

19. Herisson, J.G.; Guinot, D.; and Saucier, F., “Accelerated Biodeterioration of Various Cementitious Materials through an Accelerated Laboratory Chamber,” *Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interaction*, V. 1, A. Bertron and H. Jonker, eds., Toulouse, France, 2018, pp. 33-43.

20. Wack, H.; Gehrke, T.; Sand, W.; Pape, F.; Hintemann, D.; Brill, F.; and Deckert, S., “Accelerated Testing of Materials Under the Influence of Biogenic Sulphuric Acid Corrosion (BSA),” *Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interaction*, V. 1, A. Bertron and H. Jonker, eds., Toulouse, France, 2018, pp. 23-32.

21. ASTM C1898-20, “Standard Test Methods for Determining the Chemical Resistance of Concrete Products to Acid Attack,” ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 4 pp.

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Samuel J. Lines** is the Engineering Manager for Concrete Sealants, Inc., Tipp City, OH, USA. He has 30 years of experience in the precast concrete industry, and he has studied microbially induced corrosion of concrete for over 20 years. He is a member of ACI Committees 121, Quality Assurance Systems for Concrete; 201, Durability of Concrete; and 241, Nanotechnology of Concrete. Lines is Chair of ASTM Committee C27, Precast Concrete Products, and is active in ASTM Committees C09, Concrete and Concrete Aggregates, and C13, Concrete Pipe. In 2020, he was elected to serve a 3-year term on the Board of Directors for the National Precast Concrete Association. Lines received his BS in management and his MBA from Indiana Wesleyan University, Marion, IN, USA.



David A. Rothstein, FACI, is the Principal Petrographer of DRP, A Twining Company, Boulder, CO, USA. He has 25 years of experience as a concrete petrographer. Rothstein serves on several technical committees, including ACI Committees 201, Durability of Concrete; 221, Aggregates; 236, Material Science of Concrete; and 524, Plastering. He received his BS in geology from the University of Wisconsin; his MS in geology from Northern Arizona University, Flagstaff, AZ, USA; and his PhD in geology from the University of California—Los Angeles, Los Angeles, CA, USA. He was a postdoctoral researcher in the Department of Civil Engineering at Northwestern University, Evanston, IL, USA. Rothstein is a licensed geologist in California and Illinois.



Brent Rollins is the Vice President of Business Development and Research and Development for Spray-Lock Concrete Protection® LLC, a producer of colloidal silica based in Chattanooga, TN, USA. Before joining the company in May 2017, he spent 7 years as a university researcher and consultant and 20 years in the ready mixed concrete industry. Rollins has consulted and published globally, principally on the topics of concrete durability and infrastructure resilience, and he serves on several committees with ACI and ASTM International.



ACI member **Charles (Chuck) Alt** is the Technical Service Director with Imerys, Chesapeake, VA, USA, at the company's calcium aluminate site. He is a member of ACI Committees 223, Shrinkage-Compensating Concrete, and 242, Alternative Cements. He is Chair of ASTM Subcommittee C01.13, Special Cements, and is active on ASTM Committees C01, Cement; C09, Concrete and Concrete Aggregates; and C13, Concrete Pipe. He is also a member of the International Concrete Repair Institute, American Ceramic Society, and Association of Materials Protection and Performance (formerly NACE). Alt received his BS in ceramic engineering from The Ohio State University, Columbus, OH, USA, and his MBA from the College of William and Mary, Williamsburg, VA, USA.

Corrosión del Concreto Inducida por Microbios

Los miembros del Grupo de Trabajo 5 del Comité 201 del ACI explican la ciencia de la acidificación biogénica en las estructuras del sistema de alcantarillado

by Samuel J. Lines, David A. Rothstein, Brent Rollins, and Charles (Chuck) Alt

A pesar de ser uno de los materiales de construcción más duraderos, el concreto puede presentar deterioro como resultado del contacto con productos químicos, minerales o condiciones ambientales. Entre los mecanismos de deterioro más comunes se encuentran los daños por congelamiento y deshielo, el ataque por sal y la carbonatación. Una causa de deterioro menos conocida es la corrosión del concreto inducida por microbios (MICC, por sus siglas en inglés).

La causa fundamental del MICC está bien documentada; Después de la Segunda Guerra Mundial, C.D. Parker descubrió que una bacteria oxidante del azufre, *Acidithiobacillus thiooxidans*, estaba implicada en la conversión del gas de sulfuro de hidrógeno o ácido sulfhídrico (H_2S) en ácido sulfúrico (H_2SO_4).¹ Parker llamó originalmente a estas bacterias *Thiobacillus concretivorus* porque se comen el concreto. El ácido ataca el concreto, haciendo que la superficie se erosione o se “corroa”, como se denomina en la literatura sobre infraestructura de alcantarillado (no debe confundirse este ataque con la corrosión del acero de refuerzo). Desde la primera identificación del *Acidithiobacillus thiooxidans*, otros han confirmado que se trata de la principal bacteria que causa la MICC de las tuberías de concreto en los sistemas de alcantarillado.² Estas bacterias viven a un pH muy bajo, quizás de 2 a 4, mientras que el concreto después de su fabricación tiene un pH de aproximadamente 13. El elevado pH inicial del concreto nuevo ofrece un periodo de inmunidad a la mayor parte del crecimiento bacteriano. Conforme el pH de la superficie del concreto se reduce por la carbonatación y los gases del alcantarillado, se vuelve más adecuado para albergar colonias bacterianas.



Fig. 1: Representación esquemática del pH en función del tiempo para el proceso de tres etapas de MICC

Basado en el trabajo de Islander et al.³ y confirmado por House,⁴ el proceso de corrosión tiene tres fases muy claras (Fig. 1). La primera fase es la carbonatación del concreto. Con el tiempo, el concreto por debajo de 9. La segunda fase es la fase de fijación biológica, en la que las bacterias neutrófilas oxidantes del azufre (NSOB), como las *Thiomonas intermedia*, las *Halothiobacillus neapolitanus* y las *Thiobacillus thioparus*, comenzarán a colonizar. Sand y Bock,⁵ así como Cho y Mori,⁶ afirman que estas especies son necesarias para que el *Acidithiobacillus thiooxidans* pueda colonizar. Los ácidos reaccionan con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) y el silicato del calcio hidratado (CSH) constituyentes del concreto que proporcionan esta alta alcalinidad.

La tercera fase es la fase de corrosión ácida. El *Acidithiobacillus thiooxidans*, una bacteria acidófila oxidante del azufre (ASOB), produce un fuerte H_2SO_4 que deteriora rápidamente el concreto. En condiciones extremas, con altas concentraciones de gas H_2S por

encima del nivel de líquido de la alcantarilla, la tasa de erosión puede alcanzar hasta 12 mm/año. Dependiendo de la calidad del concreto y de las condiciones de la alcantarilla, la fase final puede tardar entre 2 y 15 años en causar un daño significativo.

Problemática del sistema de alcantarillado

Desde la década de 1940 hasta la de 1970, los Estados Unidos experimentaron un rápido desarrollo de los suburbios, lo que dio lugar a la creación de enormes redes de infraestructuras subterráneas para gestionar los residuos del alcantarillado. Muchas de estas redes consistían en sistemas de alcantarillado combinados, diseñados para recoger la bajada de aguas pluviales, las aguas residuales domésticas y las aguas residuales industriales en la misma tubería.

A finales de los años 70, Pomeroy y Parkhurst crearon una fórmula para prever la acumulación de sulfuro en las alcantarillas.⁷ Este modelo permitió a los ingenieros de alcantarillado diseñar estructuras con concreto adicional que sirviera como una capa de sacrificio o desgaste. En 1985, la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) publicó el “Manual de diseño para el control de olores y la corrosión en los sistemas de alcantarillado sanitario y las plantas de tratamiento”,⁸ convirtiéndose en un modelo que los ingenieros utilizaron para diseñar mejores infraestructuras sanitarias.

Se ha sugerido que la Ley de Aguas Limpias de 1977⁹ y la Ley de Calidad del Agua de 1987¹⁰ afectaron la severidad de la degradación en las alcantarillas al reducir el flujo de las aguas residuales que fluyen en los drenajes¹¹. La nueva normativa provocó el desvío de las aguas pluviales de los sistemas de alcantarillado, lo que redujo en gran medida tanto el volumen de líquido como los metales tóxicos para los microbios en las alcantarillas sanitarias. La reducción del caudal y de los metales tóxicos creó así un entorno propicio para el aumento de las cantidades de gas H₂S. Lamentablemente, los modelos de predicción existentes no consideraban adecuadamente estos cambios.

La formación de H₂S comienza una vez que el agua residual es privada de oxígeno disuelto, lo que ocurre algún tiempo después de entrar en la red de alcantarillado. Las aguas residuales son parcialmente descompuestas por numerosas cepas de bacterias en el agua y otros procesos naturales. Esta actividad bacteriana consume el oxígeno disuelto en el agua y, en algún momento, las aguas residuales alcanzan condiciones anaeróbicas. Incluso antes de que el agua se convierta en anaeróbica, los sedimentos y los depósitos de heces en el fondo de la alcantarilla pueden verse privados de oxígeno.

Algunas bacterias están adaptadas a condiciones anaeróbicas y no necesitan oxígeno para sobrevivir. Una de estas especies es la *Desulfovibrio* sp., una bacteria reductora de sulfato (SRB) que convierte el sulfato de las aguas residuales en H₂S. El H₂S tiene una baja solubilidad en el agua, por lo que tiende a escaparse. Cuando hay turbulencias, el gas sulfuro H₂S se libera a la atmósfera por encima de la superficie del agua. Como el H₂S es más pesado que el aire, tiende a permanecer en el sistema de alcantarillado subterráneo. Como las bacterias necesitan cierto tiempo para consumir el oxígeno disuelto en el agua, la formación de H₂S aumenta con el tiempo de tránsito en el sistema de alcantarillado. Cuanto más tiempo necesite el agua residual para viajar desde el punto de recolección hasta la planta de tratamiento, más problemas ocasionará el H₂S.

El dióxido de carbono (CO₂), el ácido tiosulfúrico y otros ácidos suaves reducen abióticamente el pH del concreto a cerca de 9. Este proceso puede durar meses o incluso años, dependiendo de la calidad del concreto. Una vez que el pH del concreto está por debajo de 9, comienza la colonización por parte de los microorganismos alcalófilos. Entre ellos, una cepa de *Thiobacillus* comienza a colonizar a esa que es aeróbica (requiere oxígeno). Estas bacterias convierten el H₂S en H₂SO₄. El débil H₂SO₄ producido por esta cepa reduce el pH del concreto hasta que se extingue y otra cepa lo coloniza. Cada cepa de *Thiobacillus* aeróbica produce un H₂SO₄ más fuerte que la anterior. Aunque todo el concreto puede ser susceptible de sufrir

esta degradación, no todas las instalaciones presentan las mismas condiciones ambientales que desatan la reacción en cadena. No se sabe con exactitud qué condiciones deben darse para que se produzcan las reacciones. Algunas teorías sugieren una alta cantidad de azufre en el suministro de agua, un alto contenido de hierro en el agua, agua muy dura y los productos

químicos introducidos en el flujo de residuos, sólo para nombrar algunos.

Asimismo, se ha informado de que los sitios con alta humedad relativa experimentan una mayor intensidad.¹¹ Se necesita más investigación para correlacionar las pruebas de laboratorio y las condiciones de campo.



Fig. 2: El sulfato de calcio (yeso) forma una masa espumosa blanquecina sobre el concreto

Hidratación del Cemento y MICC

Durante la hidratación del cemento, se forman CSH los cuales brindan las propiedades deseables del concreto endurecido. El cemento hidratado típico forma alrededor del 50% de CSH. También se forma otro compuesto, el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual constituye entre el 15 y el 25% de la pasta de cemento en masa.¹² En los días 3 a 7 del proceso de hidratación, la masa del concreto está compuesta principalmente por tres compuestos: CSH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y los hidratos de aluminoferrita de calcio. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es cal hidratada y no contribuye a la resistencia ni a otras propiedades deseables del concreto, excepto quizás para mantener el entorno protector de alto pH alrededor del acero de refuerzo. El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reacciona fácilmente con ácidos y otros compuestos. La reacción con el CO_2 forma carbonato de calcio, lo que

da lugar a lo que se conoce como carbonatación del concreto. Cuando el H_2SO_4 reacciona con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el resultado es un sulfato de calcio hidratado mineral conocido como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Así, el yeso es un indicador principal de la MICC y suele aparecer como una masa espumosa blanquecina en el concreto (Fig. 2).

En el siguiente paso de este proceso, el concreto se desintegra aún más. Después de que el H_2SO_4 consuma el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, reacciona químicamente con los aluminatos presentes en la pasta de cemento. Esta reacción forma etringita, un compuesto de sulfoaluminato expansivo. A medida que se forma la etringita, se produce una expansión interna, que a su vez provoca la aparición de grietas y desprendimientos. Esta cadena de acontecimientos permite una mayor penetración, el acceso al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y una bola de nieve de reacciones químicas y daños en el concreto (Fig. 3).

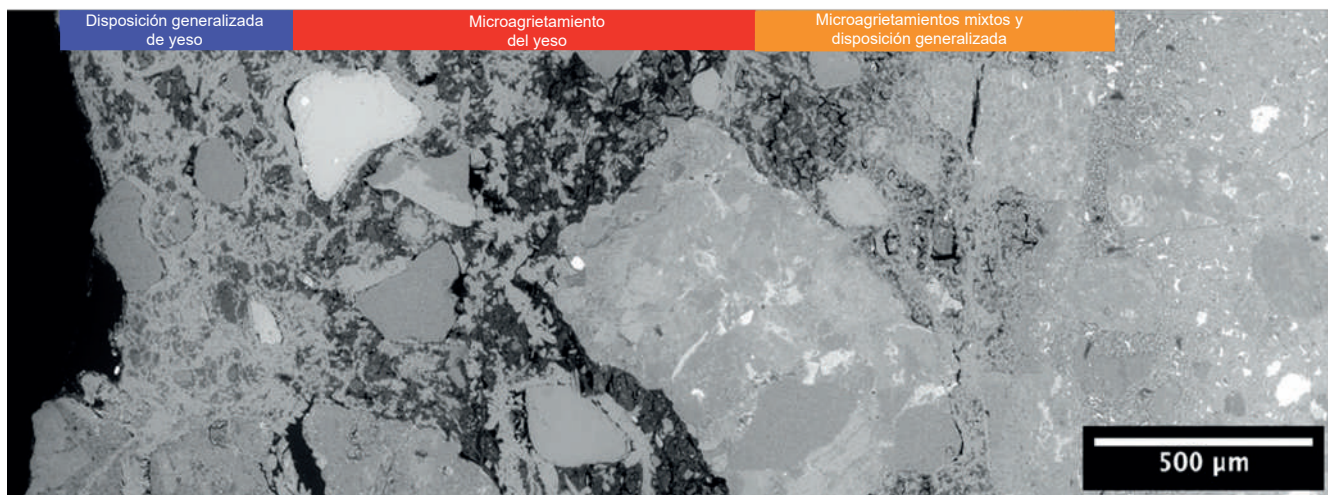


Fig. 3: Micrografía electrónica de retrodispersión de zonas de alteración en un espécimen corroído de concreto (según la Referencia ¹³).

Mezclas de Concreto y MICC

En un entorno hostil expuesto a sulfatos, cloruros o ácidos, es muy importante utilizar una mezcla de concreto de alta calidad con una baja relación agua-cemento (*a/c*). Según el libro *Design and Control of Concrete Mixtures*,¹² “La disminución de la permeabilidad mejora la resistencia del concreto al congelamiento y deshielo, a la sobresaturación, a la penetración de sulfatos y iones de cloruro y a otros ataques químicos”. Es muy importante reducir la permeabilidad para aumentar la durabilidad. Una relación *w/c* de 0.45 es buena para la mayoría de los productos de concreto que no están expuestos a condiciones adversas. Si existe la posibilidad de que el concreto sea expuesto a estas condiciones adversas, la relación *w/c* no debe exceder de 0.40.

Además de una baja relación *a/c*, el uso de materiales cementantes puzolánicos u otros materiales cementantes secundarios puede aumentar la densidad y reducir la permeabilidad del concreto. Las cenizas volantes, el cemento de escoria y el humo de sílice son sólo algunas de las opciones. El uso de uno o varios de estos aditivos minerales en el diseño de la mezcla de concreto aumentará la resistencia y la densidad mientras disminuye la porosidad y mejora la resistencia química. Los prometedores estudios realizados con nanomateriales, como la sílice coloidal, también indican reducciones significativas de la permeabilidad.¹⁴

Protección del Concreto contra el MICC

Aunque la densificación del concreto es importante para aumentar su vida útil en la estructura, no se detendrá el proceso biológico que hace que la bacteria *Thiobacillus* segregue H_2SO_4 . Sin embargo, los aditivos para el concreto y los selladores antimicrobianos aplicados en la superficie son eficaces para reducir los efectos de la MICC.¹⁵ La efectividad de estos productos puede evaluarse utilizando la norma ASTM C1904.¹⁶

Cuando se prevé que una estructura de alcantarillado estará expuesta a concentraciones muy altas de gas H_2S , el diseñador puede optar por proteger el

concreto con un recubrimiento a base de resina, como epoxi o poliurea. Estos materiales ofrecen una buena resistencia al ácido. Sin embargo, la mayoría son de naturaleza hidrofóbica: el concreto y el aire circundante deben estar lo suficientemente secos para lograr una buena adhesión y polimerización. Los revestimientos a base de resina no impiden el crecimiento bacteriano, por lo que sus superficies acabarán siendo muy ácidas con el tiempo. Mientras no haya ningún defecto, agujero o perforación, el H_2SO_4 no llegará al concreto que se encuentra debajo.

Otro enfoque para proteger las infraestructuras de concreto del alcantarillado de la corrosión por H_2S , es aplicar un mortero hecho de cemento de aluminato de calcio (CAC) y agregado de aluminato de calcio. El CAC es un cemento especializado con una química diferente a la del cemento portland. El CAC inhibe la actividad bacteriana cuando el pH de la superficie se aproxima a 4 debido a la actividad de las bacterias. El CAC no tiene un efecto biocida (las bacterias no mueren),¹⁷ pero éstas entran en reposo y dejan de transformar el H_2S en H_2SO_4 . Como no se forma ningún ácido nuevo, el proceso de corrosión se ralentiza drásticamente.¹⁸⁻²⁰ De esta forma, es posible proteger al concreto ordinario con una barrera mineral hecha de CAC en lugar de una barrera polimérica. También se han incorporado aditivos antimicrobianos en estas barreras.

Las barreras físicas, como los revestimientos y los recubrimientos, son otra opción para controlar la MICC. Los revestimientos que forman membranas tienen la capacidad de cubrir las grietas y otras imperfecciones, como los panales de abeja, que pueden ser puntos de acceso acelerado para los agentes degradantes. Sin embargo, estos revestimientos requieren una inspección periódica y su reparación o sustitución para garantizar un funcionamiento satisfactorio. Los revestimientos y los recubrimientos pueden probarse utilizando la norma ASTM C1898²¹ para validar el rendimiento en la tercera fase de la corrosión.

Resumen

Según un estudio realizado en 2002 por la Administración Federal de Carreteras (FHWA),¹⁷ se estima que la corrosión de los metales genera anualmente unos 36 mil millones de dólares de daños al sistema de agua y alcantarillado en los Estados Unidos. La MICC es probablemente un mecanismo de deterioro menos conocido y documentado que la corrosión del acero o las fugas en las juntas al que deben enfrentarse los usuarios. Una mejor comprensión de la MICC y del complejo ecosistema de bacterias que la propician debería permitir a los ingenieros mejorar las prácticas de diseño de los nuevos sistemas y rehabilitar las estructuras existentes. El Comité 201 del ACI, Durabilidad del Concreto, está trabajando para mejorar el conocimiento de este problema mundial.

Reconocimiento

Agradecemos las aportaciones de los miembros del grupo ACI 201-TG5, Corrosión microbiana del concreto. También agradecemos a Patrick McGrath y Jean Herisson su contribución a este artículo.

Referencias

1. Parker, C.D., "The Corrosion of Concrete: 1. The Isolation of a Species of Bacterium Associated with the Corrosion of Concrete Exposed to Atmospheres Containing Hydrogen Sulphide," *Australian Journal of Experimental Biology and Medical Sciences*, V. 23, No. 2, June 1945, pp. 81-90.
2. Vincke, E.B.; Boon, N.; and Verstraete, W., "Analysis of the Microbial Communities on Corroded Concrete Sewer Pipes—A Case Study," *Applied Microbiology and Biotechnology*, V. 57, No. 5-6, Dec. 2001, pp. 776-785.
3. Islander R.L.; Deviny, J.S.; Mansfeld, F.; Postyn, A.; and Shih, H., "Microbial Ecology of Crown Corrosion in Sewers," *Journal of Environmental Engineering*, V. 117, No. 6, Nov. 1991, pp. 751-770.
4. House, M.W., "Using Biological and Physico-Chemical Test Methods to Assess the Role of Concrete Mixture Design in Resistance to Microbially Induced Corrosion," MS thesis, Department of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, 2013.
5. Sand, W.B., and Bock, E., "Concrete Corrosion in the Hamburg Sewer System," *Environmental Technology Letters*, V. 5, No. 12, Dec. 1984, pp. 517-528.
6. Cho, K.-S., and Mori, T., "A Newly Isolated Fungus Participates in the Corrosion of Concrete Sewer Pipes," *Water Science Technology*, V. 31, No. 7, 1995, pp. 263-271.
7. Pomeroy, R.D., and Parkhurst, J.D., "The Forecasting of Sulfide Build-up Rates in Sewers," *Proceedings of the Eighth International Conference on Water Pollution Research*, Sydney, Australia, 1978, pp. 621-628.
8. "Design Manual: Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants," EPA/625/1-85/018, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1985.
9. "Clean Water Act of 1977," Dec. 27, 1977, www.legislation.law.iu.edu/clean-water-act-of-1977.
10. "Water Quality Act of 1987," Feb. 4, 1987, www.legislation.law.iu.edu/water-quality-act-of-1987.
11. Wells, T., and Melchers, R.E., "An Observation-Based Model for Corrosion of Concrete Sewers Under Aggressive Conditions," *Cement and Concrete Research*, V. 61-62, July-Aug. 2014, pp. 1-10.
12. Kosmatka, S.H.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W.C., "Design and Control of Concrete Mixtures," EB001, fourteenth edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2002, 358 pp.
13. Qiao, C., and Rothstein, D., "Microstructural Evaluation of Durability of Different Cementitious Mixtures in Microbial Induced Corrosion Environments," XV International Conference on Durability of Building Materials and Components (DBMC 2020), C. Serrat, J.R. Casas, and V. Gibert, eds., Barcelona, Spain, 2020, 2 pp.
14. ACI Committee 241, "Report on Application of Nanotechnology and Nanomaterials in Concrete (ACI 241R-17)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 36 pp.
15. Erbehtas, A.R.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Evaluating the Efficacy of Antimicrobial Additives against Biogenic Acidification in Simulated Wastewater Exposure Solutions," *RILEM Technical Letters*, V. 4, Aug. 2019, pp. 49-56
16. ASTM C1904-20, "Standard Test Methods for Determination of the Effects of Biogenic Acidification on Concrete Antimicrobial Additives and/or Concrete Products," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 13 pp.
17. Koch, G.H.; Brongers, M.P.H.; Thompson, N.G.; Virmani,

Y.P.; and Payer, J.H., "Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States," FHWA-RD-01-156, Federal Highway Administration, Washington, DC, 2002, 773 pp.

18. Ehrich, S.; Helard, L.; Letourneaux, R.; Willocq, J.; and Bock, E., "Biogenic and Chemical Sulfuric Acid Corrosion of Mortars," Journal of Materials in Civil Engineering, V. 11, No. 4, Nov. 1999, pp. 340-344.

19. Herisson, J.G.; Guinot, D.; and Saucier, F., "Accelerated Biodeterioration of Various Cementitious Materials through an Accelerated Laboratory Chamber," Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interaction, V. 1, A. Bertron and H. Jonker, eds., Toulouse, France, 2018, pp. 33-43.

20. Wack, H.; Gehrke, T.; Sand, W.; Pape, F.; Hintemann, D.; Brill, F.; and Deckert, S., "Accelerated Testing of Materials Under the Influence of Biogenic Sulphuric Acid Corrosion (BSA)," Proceedings of the Final Conference of RILEM TC 253-MCI: Microorganisms-Cementitious Materials Interaction, V. 1, A. Bertron and H. Jonker, eds., Toulouse, France, 2018, pp. 23-32.

21. ASTM C1898-20, "Standard Test Methods for Determining the Chemical Resistance of Concrete Products to Acid Attack," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 4 pp.



Samuel J. Lines, miembro de ACI, es Director de Ingeniería de Concrete Sealants, Inc. en Tipp City, OH, EUA. Tiene 30 años de experiencia en la industria del concreto prefabricado y lleva más de 20 años estudiando la corrosión inducida por microbios en el concreto. Es miembro de los comités ACI 121, Sistemas de Aseguramiento de la Calidad del Concreto; 201, Durabilidad del Concreto; y 241, Nanotecnología del Concreto. Lines preside el Comité C27 de la

ASTM, Productos Prefabricados de Concreto, y participa activamente en los Comités C09 de la ASTM, Concreto y Agregados para Concreto, y C13, Tuberías de Concreto. En 2020, fue elegido para un mandato de tres años en el Consejo de Administración de la Asociación Nacional de Prefabricados de Concreto. Lines se licenció en administración y obtuvo un MBA en la Universidad de Indiana Wesleyan, Marion, IN, EUA.



Brent Rollins, es el Vicepresidente de Desarrollo de Negocios e Investigación y Desarrollo de Spray-Lock Concrete Protection® LLC, un productor de sílice coloidal con sede en Chattanooga, TN, EUA. Antes de unirse a la empresa en mayo 2017, pasó 7 años como investigador y consultor universitario y 20 años en la industria del concreto premezclado. Rollins ha realizado consultorías y publicado a nivel mundial, principalmente sobre temas de durabilidad

del concreto y resiliencia de las infraestructuras, y forma parte de varios comités de ACI y ASTM International.



David A. Rothstein, FACI, es el principal petrógrafo de DRP, empresa de Twining Company, Boulder, CO, USA. Tiene 25 años de experiencia como petrógrafo especialista en concreto. Rothstein forma parte de varios comités técnicos, entre ellos Comités ACI 201, Durabilidad del Concreto; 221, Agregados; 236, Ciencia de los Materiales del Concreto; y 524, Revestimientos. Se licenció en geología por la Universidad de Wisconsin; obtuvo un máster en geología

de la Universidad del Norte de Arizona, Flagstaff, AZ, USA; y su doctorado en geología por la Universidad de California-Los Ángeles, Los Ángeles, CA, EUA. Fue investigador postdoctoral en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Northwestern, Evanston, IL, EUA. Rothstein es geólogo autorizado en California e Illinois.



Charles (Chuck) Alt, miembro de ACI, es Director del Servicio Técnico de Imerys, Chesapeake, VA, EUA, en el sitio de aluminato de calcio de la empresa. Es miembro de los Comités 223 del ACI, Concreto de Contracción Controlada, y 242, Cementos Alternativos. Es presidente del Subcomité C01.13 de la ASTM, Cementos especiales, y participa activamente en los comités de ASTM C01, Cemento; C09, Concreto y Agregados para Concreto y C13, Tuberías de Concreto. También es miembro del Instituto Internacional de Reparación del Concreto, la Sociedad Americana de Cerámica, y de la Asociación de Protección y Comportamiento de Materiales (antes NACE). NACE). Alt se licenció en ingeniería cerámica por la Ohio State University, Columbus, OH, EUA, y un máster en administración por el College of William and Mary, Williamsburg, VA, EUA.

La traducción de este artículo correspondió a la Sección Noreste de México

Corrosión del Concreto Inducida por Microbios



Traductor: Lic. Iliana Margarita Gárza Gutiérrez



Revisor Técnico: Ing. José Lozano y Ruy Sánchez