

DEGRADACION BACTERIANA DE MATERIALES CEMENTICEOS

Rosato, V. G.^() y Aboujo, A.L.^(**)*

RESUMEN

Las bacterias habitan toda la superficie de la Tierra, aún en lugares sumamente inhóspitos para la vida. Se encuentran donde hay humedad y alimento en solución, colonizando con rapidez cualquier sustrato disponible. Dada su ubicuidad y la rapidez de reproducción, algunas bacterias pueden biodegradar los materiales cementíceos, como por ejemplo los morteros y hormigones de cemento portland. Entre éstas se encuentran las sulfobacterias, que forman sulfatos a partir de sulfuros y los bacilos nitrificantes que transforman las combinaciones amónicas en nitritos y nitratos. También es considerable la formación de ácido láctico y butírico por acción de las bacterias anaeróbicas facultativas. La acción degradante de todos estos grupos de bacterias se debe al carácter ácido de los productos de metabolismo o a reacciones de intercambio de bases sumamente agresivas para el hormigón. Esto reviste una gran importancia desde el punto de vista económico pues afecta a la vida útil de las estructuras. En Argentina no existen investigaciones vinculadas con el tema, por lo que se necesitan estudios de cuantificación, aislamiento e identificación de los microorganismos agresivos, la química de los materiales y su reacción frente al metabolismo de dichos microorganismos, la influencia del uso de materias contaminadas, etc. La degradación bacteriana de los materiales cementíceos es un campo de investigación con muchos interrogantes, y en el LEMIT se ha iniciado una línea de investigación en la cual se desarrollan estudio sobre el tema para contribuir a responder a algunos de ellos.

INTRODUCCION

Las bacterias son los organismos más antiguos que existen, ya que fueron las primeras en poblar nuestro planeta. Sus células son de formas variadas: cocos (esféricas), bacilos (en forma de bastón), espirilo (en forma de espiral) y vibrión (en forma de coma), pero todas tienen en común el tamaño pequeño y una organización sencilla caracterizada por la falta de organelas celulares (mitocondrias, retículo de Golgi, etc.) y de una membrana nuclear que encierre al único cromosoma. Debido a estas características, se las denomina células procariontes, para diferenciarlas del resto de los demás seres vivos que, como las plantas y los animales, tienen células eucariontes, con un núcleo delimitado por la membrana nuclear y la presencia de organelas.

(*) Becaria Posdoctoral CONICET - LEMIT

(**) Pasante - Estudiante de Biología, Fac. Cs. Nats. y Museo, U.N.L.P.

Las bacterias se encuentran en toda la superficie de la Tierra, aún en lugares sumamente inhóspitos para la vida, como por ejemplo charcas de aguas termales a altas temperaturas, las chimeneas volcánicas en el fondo de los océanos y también en lugares helados como la Antártida. Desde luego, no todas las bacterias toleran ambientes tan extremos, y cada especie tiene un rango de temperatura óptimo para su desarrollo: los psicrófilos entre 12-18° C, los mesófilos se desarrollan mejor entre 25-40° C y los termófilos, desde los 55- 65 C°. En cuanto al pH del medio, otro factor de gran importancia, el óptimo está comprendido entre 6,5 y 7,5, pero crecen también entre 4,0 y 9,5 (1).

Estos organismos cumplen un papel importante en la naturaleza, ya que para obtener nutrientes degradan el sustrato en moléculas asimilables, descomponiendo activamente la materia orgánica. Para esto requieren una fuente de energía, carbono, nitrógeno, fósforo y azufre, elementos metálicos, calcio, potasio, manganeso, magnesio, hierro y cobre, vitaminas esenciales del crecimiento y agua.

Por lo expuesto se encuentran donde haya humedad y alimento en solución, colonizando con rapidez cualquier sustrato disponible, ya que pueden reproducirse por fisión binaria o por gemación, que es el alargamiento de una parte de la célula que luego se separa, además de algunas que se reproducen sexualmente.

Visto su ubicuidad y la rapidez de reproducción, no es de extrañar que algunas bacterias puedan biodegradar los materiales cementíceos, como por ejemplo los morteros y hormigones de cemento portland. Entre éstas se encuentran las sulfobacterias, que forman sulfatos a partir de sulfuros y los bacilos nitrificantes que transforman las combinaciones amónicas en nitritos y nitratos. También es considerable la formación de ácido láctico y butírico por acción de las bacterias.

La acción degradante de todos estos grupos de bacterias se debe al carácter ácido de los productos de metabolismo o a reacciones de intercambio de bases(2) sumamente agresivas para el hormigón. Esto reviste una gran importancia desde el punto de vista económico pues afecta a la vida útil de las estructuras, por lo que en el presente trabajo se pasa revista a los grupos de bacterias intervinientes y a sus mecanismos de acción.

CARACTERIZACION DE LAS BACTERIAS

En el presente trabajo no se hace hincapié en la clasificación de las bacterias ni en los métodos empleados para su clasificación. Sin embargo, se da una breve caracterización de los distintos tipos funcionales agrupados según su metabolismo. Siguiendo este criterio, se reconocen los siguientes grupos principales:

I) Autotróficos: Toman los elementos de sustancias simples (CO_2 , Carbonatos). Son las bacterias más simples en cuanto a exigencias nutricionales. De acuerdo al mecanismo de obtención de la energía se dividen en:

- a) Fotosintéticas: obtienen energía aprovechando la energía solar. Bacterias fototropas, Ej.: Bacterias con clorofila bacteriana (Clorobiáceas), sulfobacterias purpúreas (Rhodospirillaceas).
- b) Quimiosintéticas: obtienen la energía mediante oxidación de sustancias inorgánicas, carbonatos y nitratos. Ej. de bacterias quimiótrofas son: bacterias nitrificantes, sulfobacterias y ferrobacterias.

II) Heterotróficas: extraen los alimentos de sustancias orgánicas complejas. Son quimiosintéticas.

IMPORTANCIA DE LAS BACTERIAS EN LA DEGRADACION DE MATERIALES

Siendo organismos descomponedores, las bacterias pueden atacar y degradar los más diversos sustratos. Por ejemplo, aunque no atacan directamente a los metales, intervienen en la corrosión de los mismos. Alguno de los mecanismos de degradación se informan a continuación(1):

- a) Produciendo sustancias corrosivas, originadas en su metabolismo. De este modo transforman un medio originalmente inerte en agresivo.
- b) Originando celdas de aireación diferencial por efecto de un desigual consumo de oxígeno en zonas localizadas, originando una situación favorable para proceso corrosivos de los metales.
- c) Consumiendo sustancias inhibitoras de la corrosión y favoreciendo la acción de iones agresivos presentes en el medio o producidos por el metabolismo bacteriano.

ACCION DE LAS BACTERIAS SOBRE EL HORMIGON

I) Acción de las bacterias anaeróbicas

Se detecta principalmente en las estructuras subterráneas, especialmente en desagües cloacales. Los principales agentes son las sulfobacterias o bacterias del azufre, que obtienen energía de compuestos inorgánicos reducidos del azufre (sulfuros, tiosulfato y azufre elemental)

a los que transforman en sulfato, que en la forma de ácido sulfúrico puede causar daños severos al material cementicio(3).

Algunas especies de *Thiobacillus* están implicadas en la corrosión del hormigón(1) (2) (3). Parker (1947) investigó por primera vez el deterioro de conductos cloacales de hormigón en Melbourne y aisló *Thiobacillus thiooxidans* y *T. thioparus* en grandes números de las áreas corroídas. El daño se atribuyó al ácido sulfúrico producido a partir del ácido sulfhídrico originado en la ruptura de las proteínas en la cloaca y que luego fue empleado por la bacteria. Gilchrist (7) informó hallazgos similares y determinó que sólo se requerían 0,05 p.p.m. de ácido sulfhídrico para el crecimiento de las dos especies de *Thiobacillus*. Milde et al.(6) aislaron grandes números de tiobacilos de las áreas corroídas del hormigón en el sistema de cloacas de Hamburgo, notablemente *T. thiooxidans*, *T. neapolitanus*, *T. intermedius* y *T. novellus*. Encontraron que había una sucesión de bacterias en el proceso de degradación, con los estadios tempranos de la corrosión dominados por tiobacilos quimiolitótrofos como *T. intermedius* y *T. novellus* que fueron reemplazados por *T. thiooxidans* cuando el pH cayó por debajo de 5. Esto causó mayor acidificación y un deterioro severo del hormigón. En una investigación posterior, Sand y Bock(8) encontraron que los números de tiobacilos se correlacionaban con el grado de corrosión.

Fjerdingsstad(9) investigó la corrosión bacteriana del hormigón en laboratorio usando cultivos puros de *T. thiooxidans*. Cuando se incubaron en un medio de sales minerales con 1% de azufre elemental las bacterias eran capaces de producir ácido sulfúrico que ocasionaba pérdidas de peso de entre 11 a 60 % en los bloques de hormigón. Pérdidas similares fueron señaladas por Gore y Unnithan(10) con *T. thiooxidans* y *T. concretivorus* usando un medio de cultivo suplementado con tiosulfato en condiciones estáticas. Midieron concentraciones de ácido sulfúrico hasta 0,04 N producido por estas bacterias luego de 36 días.

En un intento de simular condiciones naturales, se emplearon cámaras de degradación con cultivos de *Thiobacillus*(11). Usando este sistema, se hallaron tasas de degradación correspondientes a pérdidas de peso de entre 1 a 10% que se correlacionaban fuertemente con la presencia de grandes números de *T. thiooxidans*. En estas condiciones, la degradación era más lenta que lo hallado por Fjerdingsstad(9) o Gore y Unnithan(10), y se producía en 9 meses. Sin embargo, las condiciones en la cámara de degradación representaban más fielmente el ambiente del conducto cloacal.

En los procesos de degradación del hormigón también intervienen las bacterias de nitrógeno, que son quimiolitótrofos que oxidan compuestos de nitrógeno inorgánico para obtener energía y generan ácidos como producto final. Hay dos grupos: uno oxida el amonio para formar ácido nitroso (etapa 1), que puede ser oxidado por el segundo grupo para formar ácido nítrico (etapa 2). El amonio puede llegar en el polvo como sulfato o nitrato y el nitrito para la

etapa 2 se puede originar en parte de la emisión de automóviles, suelo, industria, y la actividad metabólica de los oxidadores de amonio. Estas bacterias son comunes en los suelos y ambientes acuáticos, y al igual que las sulfobacterias, su actividad dependerá de la existencia de un sustrato adecuado.

Los nitrificadores se identificaron en hormigón y fibrocemento. Novotny et al.(12) aislaron *Nitrosomonas* spp. en techos de fibrocemento deteriorado de un establo pobremente aireado donde las concentraciones de amonio eran consistentemente altas. Kaltwasser(13), investigando la degradación de fibrocemento en una torre de enfriamiento con agua rica en amonio, halló grandes cantidades de bacterias oxidadoras de amonio en el limo de la capa superficial del hormigón. En ambos casos, las bacterias aisladas producían ácido en pruebas de laboratorio, (11) et al.(14) obtuvieron resultados similares usando cámaras cerradas para simular la degradación y encontraron un deterioro severo de los bloques de hormigón cultivados con *Nitrosomonas* y *Nitrobacter* spp en el período de un año. Las bacterias se encontraron en un biofilm sobre los bloques de hormigón y la corrosión aparecía debajo de esta capa, y se observó con microscopía electrónica de transmisión. En estas condiciones, las bacterias no sólo producían ácido nítrico, pero además catalizaban la conversión de sulfito a ácido sulfúrico. El efecto neto se describió como “corrosión del hormigón inducida por nitrificación” .

Palermo, Helene y Rossetto(15) resumen los mecanismos de acción microbiológica sobre las estructuras subterráneas de hormigón y su agresividad (ver Tabla 1).

También mencionan que estos microorganismos son capaces de vivir en el interior del hormigón, dentro de los poros, formando comunidades de bacterias amonificantes aerobias y anaerobias, bacterias desnitrificantes, bacterias del azufre, levaduras y hongos.

Concluyen que el biodeterioro no se restringe a las atmósferas con gas sulfhídrico u hormigones antiguos. Muchos de los nutrientes necesarios pueden estar en el propio cemento, o en las aguas freáticas, pero también es importante tener en cuenta la posibilidad de contaminación con petróleo o nafta, que aumenta la agresividad potencial del ataque microbiano.

II) Acción de las bacterias aeróbicas.

Existe muy poca información al respecto. Los mecanismos de degradación aeróbica de los morteros cementíceos se están estudiando en Japón(16). Realizaron experimentos con probetas de cubicas de 4 cm de lado colocadas en frascos de cultivo con 300 ml. de medio de cultivo y hallaron que las bacterias *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis* generaban ácido acético y butírico, provocando degradación de la probeta, ya que al final del experimento se observaba una mayor cantidad de calcio en el medio, relacionada con la mayor concentración de ácidos, y una mayor carbonatación. Pero estos experimentos no son completamente fiables por los siguientes motivos:

Tabla 1: Mecanismos de acción microbiológica y su agresividad

Mecanismos de acción	Acción	Agresividad
Biofilm y acumulación de agua	A través del metabolismo de los microorganismos cuando se excreta como material extracelular. Ocurre sobre la superficie o en microcolonias en los poros de los materiales inorgánicos.	-Francamente agresivo compuesto por heteropolisacáridos y proteínas o compuestos como nitrato o ácidos orgánicos); -Si hidrofílicos, son parcialmente responsables durante el ciclo térmico.
Por tensión de sales	Los ácidos son convertidos en sales.	-Francamente agresivo -En condición de saturación y secado puede ocasionar estado de tensión y esfoliado superficial.
Por complejización	Los ácidos orgánicos vuelven los materiales insolubles en biológicamente disponibles.	-Francamente agresivo a los minerales -Solubilizan hierro, potasio, manganeso, magnesio, calcio y otros metales.
Por ataque ácido	Acidos producidos por el metabolismo de la micro-biota local. Acidos: sulfúrico por las bacterias quimioli-totróficas; nítrico por las bacterias nitrificantes y orgánicos por otros microorganismos.	-Fuertemente agresivo por el biodeterioro/disolución de los materiales.

- a) No se aireó el medio de cultivo, de modo que asegurara un ambiente realmente aeróbico.
- b) El medio es muy rico en nutrientes, lo cual lo aleja de las condiciones reales.
- c) La presencia de los ácidos acético y butírico se debe a la falla señalada en a), porque se producen por procesos de fermentación estrictamente anaeróbicos.

CONSIDERACIONES FINALES

Hasta el presente se han estudiado los mecanismos anaeróbicos, por ser los más agresivos y de acción más rápida, que afectan sobre todo a estructuras subterráneas (desagües cloacales, tanques de depósito de nafta, túneles de trenes o viales, etc.). En cuanto a los

mecanismos aeróbicos de degradación, aún deben probarse, pues los resultados obtenidos hasta ahora por Kawai et al. (16) sólo permiten afirmar que estas bacterias aeróbicas facultativas pueden producir en condiciones anaeróbicas ácidos orgánicos capaces de atacar el hormigón.

En Argentina no se registran investigaciones vinculadas con el tema, por lo que se necesitan estudios de cuantificación, aislamiento e identificación de los microorganismos agresivos, la química de los materiales y su reacción frente al metabolismo de dichos microorganismos, la influencia del uso de materias contaminadas, etc.

Otro punto que se ignora y que merece una mayor investigación es cómo varía el ataque microbiano ante hormigones elaborados con cementos con adiciones, como por ejemplo, puzzolanas, escoria granuladas de altos hornos, filler calcáreo, etc..

Como se desprende de estos pocos ejemplos, la degradación bacteriana de los materiales cementíceos es un campo de investigación con muchos interrogantes y en el LEMIT se ha iniciado una línea de investigación en la cual se desarrollan estudio sobre el tema para contribuir a responder a algunos de ellos.

REFERENCIAS

- (1) Videla, H.A., Salvarezza, R. C. 1984- Introducción a la corrosión microbiológica. Librería Agropecuaria, Buenos Aires. 127 pp.
- (2) Biczók, I. 1972- La corrosión del hormigón y su protección. 715 pp. Ediciones URMO, Bilbao.
- (3) May, E.; Lewis, F. J.; Pereira, S.; Tayler, S.; Seaward, M.R. D. y Allsopp, D. 1993' Microbial deterioration of building stone- a review. *Biodeterioration Abstracts* 7(2):109-123.
- (4) Parker, C.D. 1947- A species of sulphur bacteria associated with the decay of concrete. *Nature* 159, 439-440.
- (5) Forrester, J.A. 1959- Deterioration of concrete by sulphur bacteria in a purification plant. *Surveyor* 116: 661-664.
- (6) Milde, K.; Sand, W.; Wolff, W.; Bock, E 1983- Thiobacilli of the corroded concrete walls of the Hamburg sewer system. *Journal of General Microbiology* 129. 1327-1333.
- (7) Gilchrist, F.M.C. 1953- Microbiological studies of the corrosion of concrete sewers by sulphuric acid producing bacteria. *South African Industrial Chemist* 7: 214-215.
- (8) Sand y Bock 1984- Concrete corrosion in the Hamburg sewer system. *Science and Technology letters* 5, 517-528.
- (9) Fjerdingsstad, E. 1969 - Bacterial corrosion of concrete in water by *Thiobacillus*, *Thiobacillus oxidans*. *Water Research* 3:21-30

- (10) Gore, P.S.; Unnithan, R. V. 1977- Thiobacilli from Cochin backwaters and their oxidative and corrosive activities. *Indian Journal of marine Science* 6.
- (11) Bock , E; Sand,W. 1986- Applied electron microscopy on the biogenic destruction of concrete blocks; use of transmission electron microscope for the identification of mineral acid producing bacteria. In *Proceedings of the 8th. Int. Conference on Cement Microscopy*, Orlando, April 1986.
- (12) Novotny, J.;Wasserbauer, R; Zadak, Z 1972- Influence du facteur biologique sur al destruction de couvertures en amiante-ciment des étales. In *1st International Symposium on the deterioration of Building Stones*. Romanowsky, V.(ed.), pp.155-156- Chambéry, France: Les Imprimeries Réunies de Chambéry.
- (13) Kaltwasser , H.1976- Destruction of concrete by nitrification. *European Journal of applied Microbiology and Biotechnology* 3, 185-192.
- (14) Bock, E.; Sand, W., Meincke, M., Ahlers, B.; Meyer, C.; Sameluck, F. 1988 - Biologically induced corrosion of natural stones- srtong contamination of monuments with nitrifying organisms. In: *Biodeterioration 7*. Houghton, D.R.; Smith, R.N.; Eggins, H.O.W. (eds.) pp. 436-440. New York, U.S.A.; Elsevier.
- (15) Palermo, G.; Helene, P. y Rossetto, M.C. 1997- Deterioração microbiológica em obras subterrâneas urbanas: contribuição para a compreensão. *Anales del IV Congreso Iberoamericano de Patología de las Construcciones Conpat- 21 a 24 de octubre de 1997*, Porto Alegre, R.S. , Brasil.
- (16) Kawai, K.; Morinaga, T., Tazawa, E. 2000- The mechanism of concrete deterioration caused by aerobic microorganisms. en *First International RILEM Workshop on Microbial Impact on Building Materials*.6-7 July 2000, Sao Paulo, Brazil.(en CD)