

¿PUEDEN LOS MICROORGANISMOS IMPACTAR LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN? UNA REVISIÓN

Antonio De Turrís, Lisseth Ocando, Matilde F. de Romero, Mariana Fernández
deturrisa@hotmail.com, matil956@cantv.net, marianelafernandezguerrero@gmail.com

RESUMEN

Todos los materiales de construcción pueden ser colonizados por microorganismos en tan solo pocas horas de exposición a aguas naturales y a la atmósfera, impactando su durabilidad. En estudios previos se ha documentado la biodegradación de los materiales no metálicos, en particular de las estructuras de concreto, debido a la actividad microbiana. El deterioro del concreto resulta cuando algún agente ambiental rompe los enlaces inorgánicos de sus aglomerantes en el tiempo. Dentro de los agentes agresivos que pueden ser generados por los distintos microorganismos a los cuales pueda estar expuesto el concreto se encuentran los ácidos orgánicos e inorgánicos, sulfatos, sales de amonio, sales de magnesio, álcalis, esterés orgánicos y dióxido de carbono. Es importante entender el efecto de la actividad microbiana sobre los materiales de construcción para poder seleccionar las estrategias de control adecuadas tanto en la fabricación de estructuras no metálicas (como tuberías de drenajes y aguas residuales) como para la reparación y restauración de edificios y monumentos. En este artículo se realiza una revisión de los principales microorganismos que pueden modificar las propiedades de los materiales de construcción, en especial del concreto, así como el mecanismo responsable del deterioro del mismo

PALABRAS CLAVES: *Biodegradación, materiales de construcción, concreto, microorganismos, MICC.*

Recibido: Junio 2013 - Aceptado: Septiembre 2013

CAN MICROORGANISMS AFFECT BUILDING MATERIALS?

Antonio De Turrís, Lisseth Ocando, Matilde F. de Romero y Marianela Fernández

ABSTRACT

All materials for construction can be colonized by microorganisms in just a few hours of exposure to natural waters and to the atmosphere, affecting its durability. In previous studies biodegradation of non-metallic materials has been documented, especially concrete structures, due to microbial activity.

Concrete deterioration takes place once some environmental agent breaks the inorganic links of his binders. Among the aggressive agents, which can be generated by different microorganisms and the concrete might be exposed to, organic and inorganic acids, sulfates, ammonium salts, magnesium salts, alkalis, organic and carbon dioxide are found.

It is important to understand the effect of the microbial activity on construction materials to select control strategies adapted to non-metallic structures (such as drainage pipelines and waste water) to repair and restore buildings and monuments. This article reviews principal microorganisms that can modify the properties of construction materials, especially concrete, as well as the mechanism responsible for its.

KEY WORDS: *Biodegradation, construction materials, concrete, microorganisms, MICC*

INTRODUCCIÓN

El desgaste de los materiales de construcción se inicia tan pronto como una piedra es extraída de una cantera o un mortero se coloca en una edificación. Éste se debe a factores ambientales naturales como sol, nieve, viento, lluvia, etc., los cuales contribuyen gradualmente a la descomposición de los materiales en partículas más pequeñas y, finalmente, en los minerales constituyentes. No obstante, la actividad microbiana puede tener un impacto importante en la durabilidad de los materiales de construcción, siendo relevante entender esta actividad con el fin de seleccionar apropiadamente las estrategias de control y tratamiento para la reparación y restauración de edificios y monumentos.^{1,2} La descomposición de los materiales de construcción ha sido reconocida desde tiempos bíblicos (Levítico XIV, 33-57), aun cuando la existencia de los microorganismos responsables era desconocida para el momento. Probablemente, el primer artículo científico sobre la degradación de roca por bacterias productoras de ácido fue publicado en 1890 por el autor alemán Muntz. Una serie de trabajos científicos fueron publicados en la primera mitad del siglo pasado sobre el tema, principalmente por los grupos de trabajo en Gran Bretaña, Canadá, Francia, Alemania, Japón, Nueva Zelanda, Rusia, Suecia y EE.UU. Estas publicaciones muestran que una población diversa de microorganismos se detecta en los materiales de construcción y que algunos de estos organismos tienen actividades que pueden resultar en la degradación de las estructuras existentes.^{3,4}

Muchos microorganismos (algunos aún sin clasificar) han sido observados en los materiales de construcción, pero los estudiados más frecuentemente son hongos (levaduras), algas (incluyendo diatomeas) y bacterias (incluyendo actinomicetos y cianobacterias).² Los microorganismos pueden deteriorar los materiales de construcción bien sea usando el material del sustrato como un nutriente (proceso asimilativo), o generando metabolitos que inducen dicho deterioro (proceso no asimilati-

vo).^{2,5}

La biodegradación debido a la actividad de bacterias y hongos se ha evidenciado en materiales no metálicos como materiales celulósicos (papel, madera), tejido (algodón, lana, rayón), textiles de vinilo, cueros, grasas y lubricantes, recubrimientos de goma, (por ejemplo, para la electrónica y las aplicaciones estructurales), y productos arquitectónicos incluyendo la mampostería y el concreto.⁵ Normalmente, la acción sobre los materiales de construcción es compleja e incluye procesos químicos, físicos y mecánicos. Esta complejidad hace necesario una investigación multidisciplinaria con la colaboración de expertos en materiales e ingeniería civil, biología, química y geología así como microbiología.²

El costo del deterioro microbiano de los materiales de construcción es difícil de estimar. Incluye los costos económicos de la limpieza, pintura, reparaciones, así como los costos culturales debido a la desfiguración de la propiedad histórica. Entre las medidas para prevenir el biodeterioro se incluye el uso de biocidas, lo cual requiere el gasto de millones de euros por año. Estos costos no incluyen la investigación y el desarrollo de programas en curso en todo el mundo, con el objeto de desarrollar materiales más resistentes y biocidas amigables con el ambiente.²

En este trabajo se realiza una revisión documental del tipo de microorganismos, su crecimiento e impacto al modificar las propiedades de los materiales de construcción y en particular el concreto, así como los mecanismos responsables del deterioro de estos materiales.

Factores que influyen en el crecimiento microbiano sobre los materiales de construcción

Todos los materiales de ingeniería son colonizados por microorganismos (principalmente bacterias y hongos) en cuestión de horas después de su exposición en aguas naturales y en muchos ambientes atmosféricos. Los microorganismos crecen y producen una capa viscoelástica o biopelícula. La

mayor parte de las biopelículas de origen natural contienen un consorcio de microorganismos con requerimientos nutricionales y de oxígeno variados. Además, las necesidades nutricionales de una especie pueden ser proporcionadas por otros miembros de la comunidad. El medio ambiente en la interfase biopelícula/material es radicalmente diferente de la del medio global en términos de pH, oxígeno disuelto y especies orgánicas e inorgánicas.⁵

La biorreceptividad se refiere a las propiedades que controlan la capacidad de un material de ser colonizado por uno o más grupos de organismos vivos. La colonización microbiana puede modificar la microestructura y la humedad del material.¹

Como todos los seres vivos, los microorganismos no pueden crecer sin agua y su crecimiento también depende de las propiedades del material subyacente tales como condiciones de la superficie, composición, porosidad y permeabilidad, así como de las condiciones ambientales.² Adicionalmente, los microorganismos no crecen si no hay nutrientes o fuentes de carbón. Los organismos heterótrofos requieren materia orgánica, mientras que los microorganismos autótrofos fotosintéticos tales como las algas y cianobacterias usan la luz solar como fuente de energía y el dióxido de carbono del ambiente como fuente de carbón.

La colonización y el biodeterioro de los materiales de construcción generalmente están vinculados a condiciones ambientales. Los parámetros más importantes que afectan el crecimiento microbiano están representados por factores físicos (principalmente la humedad, la temperatura y la luz), así como la naturaleza química del sustrato.¹ El desarrollo es más rápido cuando hay vegetación adyacente desde la cual los microorganismos pueden ser transportados por el viento y la lluvia, y se acelera por excrementos de aves, fertilizantes agrícolas y óxidos de nitrógeno derivados de la contaminación, que introducen nutrientes (nitrógeno y fósforo) adicionales. Por otro lado, el incremento en la rugosidad de la superficie del material da lugar a condiciones más favorables para la adhesión

y crecimiento.¹

Una colonización inicial de bacterias quimioautótrofas favorece el asentamiento de bacterias heterótrofas y hongos. La actividad de las bacterias heterótrofas sobre las piedras se rige por la disponibilidad de materia orgánica adecuada. La mayoría de las piedras contienen suficiente materia orgánica de la deposición de partículas transportadas por el aire, polvo, tierra u organismos autótrofos y fototróficos muertos para mantener el crecimiento y la actividad de grandes poblaciones de bacterias.¹ Por otro lado, los materiales de construcción pueden proporcionar nutrientes para algunos microbios. Por ejemplo, los minerales del cemento y agregados del concreto y mortero pueden ser solubilizados por metabolitos microbianos, o utilizados directamente por las células en forma de nutrientes.²

IMPACTO MICROBIANO SOBRE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

En las biopelículas encontradas sobre los materiales de construcción se han identificado diferentes clases de microorganismos los cuales pueden decolorar la superficie de los mismos e incrementar el desgaste no biológico por acción físico-química (Tabla 1). Todos los materiales de construcción son heterogéneos formados por una combinación de diferentes materiales mineralógicamente similares, conteniendo compuestos tales como silicatos de calcio y aluminatos, sílice, compuestos de aluminio, sulfatos, mica y feldespato. Se ha encontrado que materiales mineralógicamente similares pueden ser atacados por el mismo tipo de microorganismos, utilizando los mismos mecanismos.²

Las bacterias nitrificantes (*Nitrobacter*, *Nitrosomonas*) producen ácido nítrico, que es responsable de la solubilización del calcio de las piedras⁶, y degradan los carbonatos, aluminatos y silicatos, así como la portlandita. Todos los hongos producen ácidos orgánicos durante su metabolismo y estos conducen a la solubilización o quelación de minerales tales como el Al, K, Ca y Fe del sustrato del concreto

Actividad	Efecto (s)	Material	Microorganismo
Presencia física	Decoloración, Retención de Agua	Todos	Todos
Presencia física	Incremento del crecimiento de organismos heterotróficos	Cualquier superficie limpia	Algas, bacterias fotosintéticas
Enzimas hidrolíticas	Ruptura de componentes, degradación de aditivos de cadena corta	Madera, superficies pintadas, polímeros, mortero, concreto	Hongos, Bacterias Hongos filamentosos
Crecimientos filamentosos	Disgregación de materiales	Piedra, concreto, mortero, madera	Hongos, actinomicetos, cianobacterias, algas
Producción de ácidos	Degradación	Piedra, concreto, mortero	Hongos, bacterias
Movilización de iones	Debilitamiento y disolución	Piedra, concreto, mortero	Todos
Quelación de iones constituyentes	Debilitamiento y disolución	Piedra, concreto, mortero	Productores de ácidos orgánicos (Por ejemplo, hongos)
Captura de iones H+ por las células	Degradación alcalina	Piedra	Algas, cianobacterias
Liberación de Polioles (Por ejemplo: glicerol, polisacáridos)	Disrupción de capas de silicatos	Piedras silíceas	Todos

Tabla 1. Resumen de algunos efectos de los microorganismos sobre los materiales de construcción.²

y las piedra que contienen silicatos, feldespatos y micas. Las algas diatomeas requieren sílice para la estructura de su pared celular (frústula) y se ha determinado que han sido responsables de eliminar sílice del concreto. Los cálculos mineralógicos han demostrado la reducción de sílice y la presencia de restos de diatomeas en diversos concretos.⁷

La liberación biogénica de ácidos corrosivos es probablemente el mecanismo destructivo biogeoquímico más conocido e investigado de materiales inorgánicos. Este proceso, denominado biocorrosión cuando se trata de metales, resulta de la liberación de ácidos inorgánicos y orgánicos (procesos de degradación conocido como acidólisis y complexólisis, respectivamente). Luego ocurre un debilitamiento de la matriz mineral en ciertos lugares de la estructura compuesta de los materiales.^{8,9} Como resultado, estos procesos biogeoquímicos destructivos pueden conducir a la corrosión localizada o incluso a gran escala generando desgastes del material.¹⁰

Los procesos acidolíticos (intercambio catión-pro-

tón) están relacionados a la actividad de microorganismos quimiolitotróficos, tales como bacterias formadoras de ácido nítrico y sulfúrico. Debido a que estas bacterias necesitan de una humedad y nutrientes específicos, el impacto de las mismas se ve a menudo en construcciones expuestas a condiciones con relativa humedad y temperatura, tales como torres de enfriamiento y sistemas de drenaje, así como edificios expuestos a climas tropicales y subtropicales, como Brasil y Australia. El comportamiento potencialmente perjudicial de estas bacterias sobre concreto, mortero y ladrillo se ha cuantificado en cámaras de simulación determinando la velocidad de degradación.¹¹ En condiciones favorables para su crecimiento, las bacterias nitrificantes también se han encontrado en edificaciones de piedra natural. Sin embargo, es probable que estuvieran presentes como consecuencia de las actividades del rápido crecimiento de la microflora heterotrófica.^{9,12}

La corrosión de las piedras por microorganismos quimioorganotróficos como los líquenes, además de la liberación de CO₂ (producción de ácido car-

bónico), se caracteriza por la liberación de ácidos orgánicos, tales como ácido oxálico, ácido cítrico, ácido glucónico, ácido glioxílico y ácido oxaloacético.^{13, 14} Aparte de la corrosión, algunos de estos ácidos son capaces de formar complejos órgano-metálicos por quelación de cationes (Ca²⁺, Fe³⁺, Mn⁺, Mg²⁺) que cuando se remueven generan una disolución continua, resultando en daños corrosivos considerablemente mayores para el material que los propios complejos inorgánicos.^{1,2}

Otro proceso biogeoquímico importante, el cual se observa a menudo en piedras naturales, es la movilización, transporte y liberación oxidativa de hierro y manganeso por diferentes bacterias y hongos quimioorganótrofos. En este proceso, los cationes se movilizan de las piedras por procesos corrosivos biogénicos. A través de la inmovilización posterior de los cationes, se mantiene un gradiente de concentración constante y un proceso de lixiviación que acelera el proceso de descomposición. Después de la oxidación biológica de los cationes metálicos acumulados, los óxidos resultantes pueden ser depositados en la superficie de la roca, como una pátina de color, o en la superficie celular del microorganismo, comúnmente en asociación con algas activas y cianobacterias que producen oxígeno por fotosíntesis. De esta manera, ocurre el empobrecimiento o enriquecimiento local del material, dando lugar a la compresión y por lo tanto una alteración en la resistencia del material.² Todo este proceso se ve afectado por las especies biológicas presentes, la superficie, el clima y la estación del año.¹⁵

INFLUENCIAS BIOGEOFÍSICAS

En el curso del tiempo y en función de su exposición a la influencia ambiental, así como a la contaminación antropogénica, los materiales inorgánicos son susceptibles a los cambios estructurales y materiales en sus superficies y/o capas superiores (Tabla 2). Debido a estos cambios estructurales y a una inducción química de los materiales se forman costras o costras e incrustaciones.^{1,2} Estas costras se forman a partir de reacciones con gases (SO₂, NO_x, CO₂), compuestos orgánicos, óxidos de hierro e hidróxidos, así como otras sustancias particuladas, tales como partículas de polvo, hollín, metales y caucho.^{1,2} Los factores relacionados con el material (absorción y difusión de humedad, acción capilar y expansión caliente/húmeda), los factores climáticos (clima interno y externo) y los factores de exposición (geometría, conducción del agua) tienen un efecto sobre el cambio del comportamiento de la humedad y la formación de costras sobre la piedra natural. Éstas son de color oscuro y aceleran el debilitamiento de la matriz estructural del material debido a un aumento en la absorción de calor, una alteración en el comportamiento de expansión higrotérmica, así como en la capacidad de conservación de humedad. Como resultado de esto, ocurre un endurecimiento superficial, un desprendimiento de las capas superficiales de la piedra, estrés y desgaste debajo de las lutitas de la piedra (pérdida de cohesión, presión de cristalización, ciclos de hielo-deshielo).²

Microorganismos	Alteraciones
Bacterias autótrofas	Costras negras, pátinas negras-marrones, exfoliación, pulverización.
Bacterias heterótrofas	Costras negras, pátinas negras-marrones, exfoliación, cambio de color (decoloración).
Cianobacterias	Pátinas y láminas de varios colores y consistencia.
Hongos	Manchas coloreadas y parches, exfoliación, picaduras.
Algas	Pátinas y láminas de varios colores y consistencia.
Líquenes	Costras, parches y picaduras.

Tabla 2. Resumen de las alteraciones físicas generadas por los microorganismos sobre los materiales de construcción.²

En la medida en que se forman las costras, la microflora de las piedras interviene de diversas formas para acelerar y catalizar el proceso de deterioro: a través de una coloración biogénica, la superficie de la piedra está inicialmente sujeta a efectos estéticos perjudiciales,¹⁶ alterando también la capacidad de absorción de calor del material.² Una serie de pigmentos biogénicos, incluida la clorofila y subproductos obtenida a partir de algas verdes y cianobacterias, así como compuestos marrón-negro (Feofitina), contribuyen a cambios de color en las superficies expuestas. Otras sustancias involucradas pueden incluir ficobiliproteínas, caroteno y pigmentos bacterianos, productos de la oxidación de hierro biogénico y manganeso por hongos.¹⁶

Aparte de los cambios de pigmentación, las biopelículas superficiales sobre materiales inorgánicos pueden resultar en cambios en la difusión de vapor de agua dentro del material, junto con la liberación de sustancias tensoactivas, implicando un cambio en la retención de agua por capilaridad.¹⁷ Debido a la contracción y expansión de las biopelículas que contienen carbohidratos y proteínas, a la actividad de los hongos, cianobacterias e hifas liquenáceas que penetran el sustrato, se ejerce una presión mecánica sobre la estructura del mineral. Estas influencias biogeofísicas aumentan otros procesos de daños estructurales, tales como los ciclos de hielo-deshielo o la presión de cristalización de sales enriquecidas en el material, que también pueden ser de origen biológico. Además, la absorción de gases nocivos de la atmósfera se incrementa por las biopelículas superficiales.² De esta forma, los procesos biogénicos aceleran la velocidad de reacción de procesos degradantes sobre la superficie del material y, en consecuencia la formación de costras principalmente por inducción química o biogeoquímica.²

BIODEGRADACIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Algunos de los materiales de construcción más utilizados se basan en carbonatos (caliza, mármol,

arenisca, mortero, etc.). Los carbonatos son un importante reservorio de carbono en la superficie de la tierra; representa el 78,5% del total de carbono. Los carbonatos en la naturaleza pueden ser degradados fácilmente como una consecuencia directa o indirecta de la actividad microbiológica. La base química para esta descomposición es la inestabilidad de los carbonatos en solución ácida. Por lo tanto, cualquier organismo que genera ácidos orgánicos (bacterias, hongos, líquenes, etc.) o ácidos inorgánicos (bacterias) es capaz de disolver carbonatos insolubles. Incluso la generación metabólica de CO₂ durante la respiración tiene este efecto.¹

La fácil capacidad de trabajar la caliza hace que sea la piedra más frecuentemente utilizada para la construcción de edificios históricos y monumentos. La piedra caliza se compone principalmente de carbonatos de calcio (calcita) y magnesio (dolomita), con mayor o menor cantidad de otros materiales, como el cuarzo, arcilla y bioclastos. El mármol es una roca metamórfica formada por la recristalización de la piedra caliza bajo relativamente altos niveles de calor y presión. Es capaz de tener un alto brillo y, por lo tanto, se utiliza para propósitos ornamentales.

Los análisis microbiológicos de piedras erosionadas han mostrado la presencia de bacterias que utilizan dióxido de azufre o compuestos que contienen azufre, dando lugar al sulfato como producto del metabolismo. Las bacterias pueden estar involucradas en la oxidación así como en la reducción de azufre. Atlas et al¹⁸ han reportado que los iones de calcio obtenidos por liberación a partir del yeso cuando la *Desulfovibrio desulfuricans* reduce el sulfato reaccionan con el dióxido de carbono, lo que resulta en la formación de calcita. Las costras de yeso sobre mármol tratado con un caldo bacteriano mostraron la limpieza y neomineralización llevada a cabo por la bacteria, que consume una gran parte del yeso disponible en la costra.

Ortega-Calvo y Saiz-Jiménez¹⁹ reportaron la presencia de bacterias que degradan el fenantreno en las calizas de dos catedrales europeas (Sevilla, España, y Mechelen, Bélgica). Esto sugiere que los

microorganismos presentes en los materiales de construcción son capaces de transformar contaminantes atmosféricos depositados y utilizarlos para su crecimiento.

Se ha demostrado que los hongos también pueden crecer en los materiales de construcción y su crecimiento puede inducir cambios mecánicos o químicos en los minerales. Los hongos aislados de piedras erosionadas son generalmente saprófitos ubicuos cuyos conidios son fácilmente distribuidos a través de la atmósfera entre los que destacan: *Aspergillus*, *Penicillium* y *Cladosporium*, por lo que estos tienen una distribución mundial. Además, estos hongos tienen un notable potencial de degradación de polisacáridos. La corrosión por hongos de la piedra caliza fue estudiada por Koestler et al²⁰. Después de sólo cinco semanas, un cultivo de las hifas de un *Trichotecium* sp penetró al menos 1 mm en los cristales. Se sabe que especies de *Trichotecium* secretan ácido oxálico, ácido cítrico y ácido glucónico entre otros productos. Estas secreciones pueden atacar químicamente la dolomita o calcita, causando el ataque químico observado. Los canales creados por los hongos además proporcionan nuevas vías de ataque profundo dentro de los cristales y un área superficial enormemente susceptible al ataque por agua y/o ácidos disueltos en el agua, tales como ácido nítrico y sulfúrico a partir de contaminantes del aire.

A pesar de que las cianobacterias y las algas son organismos comúnmente asociados con ecosistemas acuáticos, también se encuentran dispersos sobre sustratos terrestres. Su existencia en la superficie de los suelos, piedras, y árboles, en particular en áreas húmedas, es bien conocida. En los materiales de construcción crecen en lugares húmedos, en las cornisas, en agujeros y grietas, o debajo de las costras, donde se retiene el agua y su evaporación es lenta debido a la protección contra los vientos o sol directo. Su crecimiento raramente es uniforme, con frecuencia forma rayas que siguen las áreas de humedad. Se ha reportado¹ que en los monumentos se presentan dos grupos principales de cianobacterias. El primer grupo contiene especies que

viven bajo una luz tenue y condiciones de humedad constante. Este grupo desarrolla costras y forma crecimientos espesos y coloreados en el interior de las paredes dentro de los edificios. El segundo grupo está compuesto de especies que pueden soportar condiciones extremas, tales como alta intensidad de la luz y períodos de sequía. Este grupo es el principal agente de suciedad en las superficies externas de los edificios.

El deterioro de las piedras calizas, mármoles y areniscas por líquenes fue investigado por Saiz- Jiménez et al¹ y también se reportaron estudios petrográficos de varios tipos de piedras calizas deterioradas de los mosaicos romanos de Itálica debido a la acción de los líquenes. Los líquenes epilíticos y endolíticos colonizan, penetran y atacan químicamente las piedras calizas. Los líquenes epilíticos cubren la superficie de las piedras calizas, causando daños mecánicos y químicos (picaduras). Los líquenes endolíticos se producen por debajo de las superficies de las piedras. Los líquenes son capaces de soportar períodos prolongados de sequía, pero una vez que esté disponible el agua la pueden reabsorber rápidamente. Esto es particularmente cierto en especies xerofíticas. El proceso puede producir un deterioro de la piedra, en particular por la expansión y contracción sucesiva de los líquenes durante el humedecimiento y secado.

BIODEGRADACIÓN DEL CONCRETO

El concreto se utiliza en aplicaciones estructurales en todo el mundo debido a su resistencia, durabilidad y bajos costos. Se utiliza para grandes tanques de almacenamiento y tuberías, revestimientos interiores y recubrimientos exteriores para tuberías de acero y recipientes, pavimentación y muchas otras aplicaciones. Una aplicación importante de construcción es la recolección de aguas residuales municipales y los sistemas de tratamiento. El concreto se está evaluando actualmente como una barrera de protección en el almacenamiento de residuos nucleares. Severyn²¹ estima que el deterioro del concreto en la recolección de aguas residuales

y sistemas de tratamiento se debe principalmente a la biodegradación y que se gastan anualmente más de 100 millones de dólares para reemplazar bocas de visita, pozos de bombeo, tuberías de concreto, facilidades de tratamiento y desarenadores. El concreto es un agregado inerte, tal como roca y grava rodeada por un aglutinante de cemento. Los silicatos y aluminatos hidratados se producen al reaccionar con el agua. El deterioro del concreto se produce cuando algún agente ambiental puede romper los enlaces inorgánicos del aglomerante del cemento.

Los ácidos, sulfatos, sales de amonio y de magnesio, álcalis, esterres orgánicos y dióxido de carbono pueden destruir un aglutinante en el tiempo. Perfettini et al²² evaluaron la degradación del aglutinante del cemento inducido por productos metabólicos de dos cepas de hongos, *Aspergillus niger* y *Mycelia sterila*, aisladas de muestras de suelo. El cemento portland se expuso en contacto directo con las dos cepas de hongos por 11 meses. Los ácidos producidos por *A. niger* (glucónico y oxálico) disolvieron el cemento, incrementando la porosidad en un 11,4% y redujo en un 78% la resistencia a la flexión (fuerza aplicada a tres puntos de la superficie que causa la rotura). El aumento en la porosidad indica la disolución del cemento y la penetración de especies biológicas y químicas. La *M. sterila* (glucónico y ácido málico) causó una lixiviación significativa de 4,2% de calcio con respecto al contenido original, un aumento del 11% de la porosidad y una pérdida del 62% en la resistencia a la flexión. Los ácidos orgánicos producidos por los hongos solubilizan el calcio, sílice, aluminio, y minerales de hierro. La solubilización se relaciona más con la naturaleza del ácido que con la concentración.

Kulpa y Baker²³ y Mansfeld et al²⁴ describieron el complejo proceso de biodegradación en los sistemas de recolección de aguas residuales que involucran mediación bacteriana aeróbica y anaerobia del ciclo del azufre. Bajo condiciones anaeróbicas las bacterias sulfato reductoras (SRB) reducen el sulfato en sulfuro en las aguas residuales. El sulfuro de hidrógeno (H_2S) se libera en el ambiente aeróbico

de la tubería de desagüe sobre las aguas residuales, donde se oxida a ácido sulfúrico por las bacterias oxidantes de azufre, comúnmente *Thiobacilli*. Como se produce ácido, el nivel de pH puede alcanzar un valor de 2,0 o inferior. La disolución de la tubería de concreto se produce como resultado de la acción corrosiva del ácido. Moosavi et al²⁵ reportaron que la producción biogénica de H_2S por SRB podría permear el concreto y convertir las películas de óxido de hierro pasivas sobre barras de acero a una película de sulfuro de hierro no protector.

CORROSIÓN DEL CONCRETO INDUCIDA MICROBIOLÓGICAMENTE (MICC)

Los microorganismos que producen ácido sulfúrico catalizan la degradación de las tuberías de concreto por el proceso conocido como corrosión del concreto inducida microbiológicamente (MICC). MICC se da a través de tres etapas distintas y abarcan cambios en las poblaciones de microorganismo activos y en las propiedades del concreto (Figura 1).²⁶

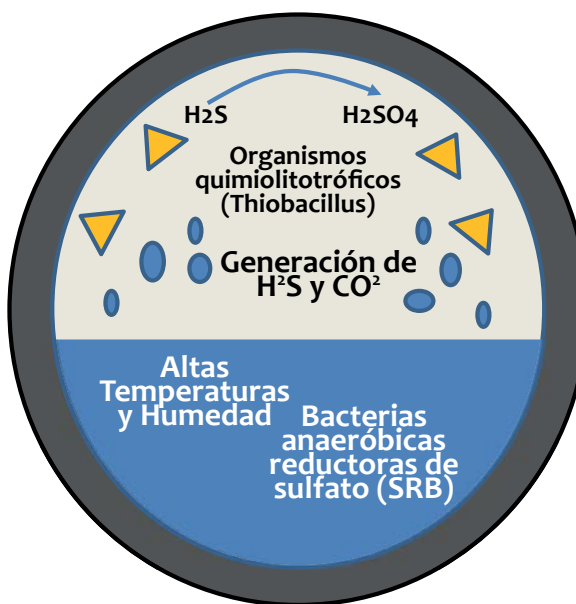


Figura 1. Esquema del proceso de corrosión del concreto inducido microbiológicamente en una tubería o drenaje de agua residual.

En la primera etapa de MICC, el pH en el espacio superior de las tuberías de concreto se reduce de 13 a 9, aproximadamente, debido a las reacciones del dióxido de carbono (CO_2) y otros gases ácidos formados por la condensación de humedad. Este es un proceso abiótico y no provocado por microorganismos.

La segunda etapa de MICC, corresponde a la colonización de microorganismos oxidantes de azufre en la zona superior de la tubería donde condensa la humedad. Esta población de bacterias utiliza los compuestos de azufre reducidos, tales como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y otras especies generadas por las aguas residuales, produciendo azufre elemental y ácidos politiónicos, que además disminuyen el pH de la superficie del concreto por debajo del neutro. A medida que el pH del concreto se reduce, se cree que los microorganismos oxidantes de azufre neutrófilos, tales como *Thiobacillus neapolitanus* y *Thiobacillus thioparus*, continúan la colonización, produciendo aún más ácido hasta el límite de pH más bajo para su crecimiento (por debajo de pH3). Más allá de esto, una población de microorganismos oxidantes de azufre acidófilos, tal como *Acidithiobacillus thiooxidans*, y las bacterias acidófilas heterotróficas tales como *Acidiphilium cryptum* se establecen y continúan la oxidación del sulfuro de hidrógeno (H_2S) a ácido sulfúrico. Los microorganismos oxidantes de azufre acidófilos autotróficos pueden sostener esta oxidación a niveles de pH por debajo de 3.

El crecimiento de microorganismos oxidantes de azufre acidófilos en una biopelícula sobre la superficie del concreto se acompaña de abundante producción de ácido, que es la verdadera causa de

CONCLUSIONES

Mediante esta revisión se puede concluir lo siguiente:

1. La mayoría de los materiales de construcción son susceptibles al deterioro microbiano.
2. Los microorganismos pueden deteriorar los materiales de construcción bien sea usando el material

la corrosión generada por la solubilización de minerales en la matriz del concreto. El ácido producido por las bacterias difunde a través del concreto fresco, reacciona con los aglutinantes del concreto y produce etringita y yeso que comprometen severamente la permeabilidad y propiedades de resistencia de la tubería.

El rápido deterioro de las tuberías de desagüe de concreto debido a MICC tiene un impacto importante en la salud ambiental y seguridad, particularmente en países con climas cálidos, como los EE.UU. y México. En este sentido, Gutiérrez-Padilla et al26 desarrollaron un sistema experimental para demostrar el mecanismo de MICC por medición de pH, formación de sulfato y la pérdida de masa en un ambiente acelerado para luego investigar a las condiciones comunes encontradas en los sistemas de recolección de drenajes. En un sistema con una circulación continua de agua y microorganismos oxidantes de azufre mas una inoculación de *Acidiphilium cryptum*, observaron una caída significativa del pH (de 10 a 3), una pérdida de masa de 0,39%, formación de sulfato y liberación de calcio en 100 días de experimentación. Una concentración continua de sulfuro de hidrógeno en el sistema mantuvo el proceso de MICC. Se observó que la corrosión se inició por microorganismos neutrófilos oxidantes de azufre. Basado en estos resultados, obtuvieron que el mecanismo de MICC en una tubería de desagüe de concreto nueva se puede explicar por el hecho de que el crecimiento de microorganismos neutrófilos oxidantes de azufre proporcionan condiciones favorables para el crecimiento de los microorganismos acidófilos oxidantes de azufre.

del sustrato como un nutriente (proceso asimilativo), o generando metabolitos que inducen dicho deterioro (proceso no asimilativo).

3. La susceptibilidad y tasa de degradación varían entre diferentes materiales.
4. Datos de laboratorio y de campo validan la biodegradación del concreto y otros materiales de construcción.

REFERENCIAS

1. C. Saiz-Jimenez. The Biodeterioration of Building Materials. (Chapter 4): p. 4.1-4.6.
2. C. Gaylarde, M. Ribas Silva, Th. Warscheid. "Microbial impact on building materials: an overview". *Materials and Structures*. Vol.36, (2003): p. 342-346.
3. J.N. Turner. *The Microbiology of Fabricated Materials*. (J & A Churchill, London, 1975).
4. A.H. Walters, J.J. Elphick. *Biodeterioration of Materials*. (Elsevier, London, 1968).
5. B. Little, R.I. Ray, P. Wagner. *Biodegradation of Nonmetallic Engineering Materials*. (Chapter 3): p. 3.1-3.9.
6. A. Muntz, *Compt. Rend. Acad. Sci.* 110: 1370-2 in *Principles of Soil Microbiology*, (Williams & Wilkins, Baltimore, 1932).
7. M. Ribas Silva, "Study of concrete deterioration through its microstructure", *Materiales de Construcción* 43 (23) (1993). p. 15-24.
8. P.S. Griffin, N. Indicator, R.J. Koestler. "The biodeterioration of stone: a review of deterioration mechanisms, conservation, case histories and treatment, *International Biodeterioration*". 28 (1991). p. 187-208.
9. E. May, F.J. Lewis, S. Pereira, S. Tayler, M.R.D. Seaward, D. Allsopp, "Microbial deterioration of building stone – a review". *Biodeterioration Abstracts*. 7/2 (1993). p. 109-123.
10. W.E. Knmabein. *Biotransformations in monuments – a sociological study*, in *Durability of Building Materials*, (Elsevier, Amsterdam, 1988). p. 359-382.
11. E. Bock, W. Sand. "The microbiology of masonry biodeterioration", *Journal of Applied Bacteriology*. 74 (1993) p. 503-514.
12. Th. Warscheid, Th. Becker, J. Braams, S.C. Bruggerhoff, W.E. Krumbein, K. Petersen, "Studies on the temporal development of microbial infection of different types of sedimentary rocks and its effects on the alteration of the physico-chemical properties in building materials", en *Conservation of Stone and other Materials*, Proc. of an International Congress (E & FN Spon, London, 1993) p. 303-313.
13. F.J. Lewis, E. May, A.F. Bravery. *Metabolic activities of bacteria isolated from building stone and their relationship to stone decay*, in *Biodeterioration* 7 (Elsevier Applied Science, London, 1988) p. 107-112.
14. J. Braams, "Ecological studies on the fungal microflora inhabiting historical sandstone monuments", (University of Oldenburg, Oldenburg, 1992).
15. R. Kumar, A. Kumar, "Biodeterioration of stone in tropical environments - an overview" (J. Paul Getty Trust, USA, 1999).
16. C.E. Urzi, W.E. Kmmbein, Th. Warscheid, "On the question of biogenic colour changes of Mediterranean monuments". (Coatingcrnst-microstroma-tolite-pafna-scialbamra-skin-rock varnish) in *Conservation of monuments in Mediterranean Basins*, Proceedings of an International Symposium (Geneva, 1992) p. 397-420.
17. Th. Warscheid, M. Oelting, W.E. Krumbein, "Physicochemical aspects of deterioration process on rocks with special regard to organic pollution" *Int. Biodet.* 28 (1991) p. 37-48.
18. R.M. Atlas, A.N. Chowdhury, K.L. Gauri, "Microbial Calcification of Gypsum-Rock and Sulfated Marble". *Stud. Conserv.* 33 (1988) p.149-153.
19. J.J. Ortega-Calvo, C. Saiz-Jiménez, "Microbial Degradation of Phenantrene in two European Cathedrals" *FEMS Microbiol. Ecol.* 22 (1997) p. 95-101.
20. R.J. Koestler, A.E. Charola, M. Wypyski, J.J. Lee "Microbiologically Induced Deterioration of Dolomitic and Calcitic Stone as Viewed by Scanning Electron Microscopy" 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Vol. II (1985) p. 617-626.
21. P.A. Wagner, R.I. Ray, B.J. Little, and W.C. Tucker, *MP* 33, 4(1994): p. 46.
22. J.V. Perfettini, E. Revertegat, N. Langomazino, *Experientia* 47 (1991): p. 527.
23. C.F. Kulpa, C.J. Baker, "Involvement of Sulfur-Oxidizing Bacteria in Concrete Deterioration," in *Microbially Influenced Corrosion and Biodeterioration*, eds. N.J. Dowling, M.W. Mittleman, and J.C. Danko (Knoxville, TN: Univ. Tennessee, 1991), p. 4-7.
24. F. Mansfeld, H. Shih, A. Postyn, J. Deviny, R. Islander, C.L. Chin, "Corrosion Monitoring and Control in Concrete Sewer Pipes," *CORROSION/90*, paper no. 113 (Houston, TX: NACE, 1990).
25. A.N. Moosavi, J.L. Dawson, R.A. King, "The Effect of Sulphate-Reducing Bacteria on the Corrosion of Reinforced Concrete," in *Biologically Induced Corrosion*, ed. S.C. Dexter (Houston, TX: NACE, 1986) p. 291.
26. M. Guadalupe D. Gutierrez-Padilla, A. Bielefeldt, M. Hernandez, J. Silverstein, "Monitoring of microbially induced concrete corrosion in pipelines". *NACE International*, (2007): pp. 1-5, Houston: TX (USA).