



MECANISMOS DE BIODETERIORO DEL CONCRETO REFORZADO

J. FERNANDO MÁRQUEZ P.

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia
Profesor Asociado UFPS. Departamento de Construcciones Civiles, Vías y Transporte.
jfmarque@bari.ufps.edu.co

RESUMEN

Durante las últimas décadas, los estudios sobre el deterioro del concreto reforzado (CR) se han centrado principalmente en problemas tales como el ingreso de cloruros, la corrosión y la fatiga; sin embargo, recientemente, otros mecanismos de deterioro como el biodeterioro del concreto ha llamado la atención de los investigadores. El biodeterioro ha demostrado ser crítico en las estructuras ubicadas en ambientes agresivos, que pueden incluir el aire contaminado, aguas residuales, aguas profundas, aguas de escorrentía, lixiviación en rellenos sanitarios, drenajes ácidos en minas, y condiciones de altamar. También se ha observado que ciertas condiciones internas del concreto tales como el uso de concreto reciclado o residuos de demolición como escoria como agregados y el uso de agregados piríticos favorecen el ataque microbiano que amenaza tanto la durabilidad como la calidad del concreto. Este artículo presenta una visión general del ataque microbiano y el biodeterioro de las estructuras de CR; se centra principalmente en las transformaciones biológicas que afectan el material estructural. Además, el artículo presenta las iniciativas de investigación actuales y retos futuros en el ámbito del biodeterioro del concreto.

Palabras clave: biodeterioro, concreto reforzado, microorganismos, durabilidad.

1. INTRODUCCION

El biodeterioro de estructuras de concreto reforzado ha sido reconocido recientemente como un importante mecanismo de deterioro. El biodeterioro es un fenómeno que se ha observado en estructuras ubicadas en ambientes agresivos, por ejemplo en aguas residuales, aguas profundas, aguas de escorrentía, lixiviados en rellenos sanitarios, drenajes ácidos en minas, y zonas en mar adentro o altamar. Varios estudios han encontrado que la actividad de algunos microorganismos en la matriz interna del concreto puede afectar severamente a la vida de la estructura, generando altos costos de reparación o de sustitución [28].

El concreto es un material compuesto principalmente de cemento, agregados y agua. En particular, el constituyente básico, es decir, el cemento Portland, tiene una composición química que consiste en silicato dicálcico ($2CaOSi_2$), silicato tricálcico ($3CaOSi_2$), aluminato tricálcico ($3CaOAl_2O_2$), aluminoferrita tetracálcico ($4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$), sulfato de calcio o yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y otros [20]. Se ha observado que con esta estructura química, la presencia de compuestos de azufre y calcio en la matriz del concreto, y la de hierro en los agregados y el refuerzo de acero, favorece el ataque de ciertos microorganismos perjudiciales.

El objetivo principal de este trabajo es describir las iniciativas de investigación



actuales y retos futuros en el ámbito del biodeterioro del concreto.

2. DEFINICIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

El biodeterioro se puede describir como "cualquier cambio indeseable en las propiedades de los materiales causados por las actividades vitales de los organismos" [28]. Por lo tanto, el estudio del biodeterioro abarca un campo multidisciplinario que usa conceptos tanto de ingeniería como de biología. Los problemas del biodeterioro se han observado y estudiado en varios tipos de materiales como madera, metales y concreto [28-29].

Los mecanismos de biodeterioro se pueden clasificar de acuerdo a los efectos sobre el material [28] como: a) rotura física o mecánica; b) deterioro estético, promovido por el moho, el micelio, algunas microalgas, e importantes productores de biomasa que causan afeamiento de la apariencia del material [11]; y c) afectación química, que se produce cuando los microorganismos utilizan materiales del concreto como sustrato de crecimiento, o excretan productos nocivos en el material dañando su estructura interna. Un aspecto crucial del deterioro del concreto es el daño causado a la estructura interna del material, que con frecuencia conduce a un aumento en la porosidad que reduce la resistencia y facilita la formación de grietas y el ingreso de cloruros [8-28].

El proceso de biodeterioro del CR se puede dividir en dos etapas: fase de iniciación y fase secundaria o de desarrollo [14]. Durante la primera fase se produce el acondicionamiento del sustrato para que puedan desarrollarse allí los organismos vivos (disminución del pH, aumento de la humedad, formación de biopelículas). También esa fase se generan cambios internos (reacciones químicas, agrietamiento por contracción) y pequeños cambios en la apariencia. En esta etapa la biorreceptividad, es decir, la capacidad intrínseca de un

material para permitir la colonización por organismos vivos [8], desempeña un papel clave en el proceso. La biorreceptividad del concreto, mortero y piedra expuesta a ambientes interiores y al aire libre se ha identificado como una cualidad favorable para el crecimiento microbiano [21-25]. Según Prieto et al. [25], la biorreceptividad se puede medir usando siete categorías (de inapreciable a muy intensa), basado en una evaluación cualitativa del cambio de color. Por otro lado, durante la etapa de desarrollo, el crecimiento de microorganismos, y/o el agrietamiento excesivo pueden facilitar el ataque químico (por ejemplo, el debido a los cloruros) que afectan negativamente a la integridad material con ya que producen incremento de la porosidad, pérdida de peso y reducción de la resistencia (Fig 1).

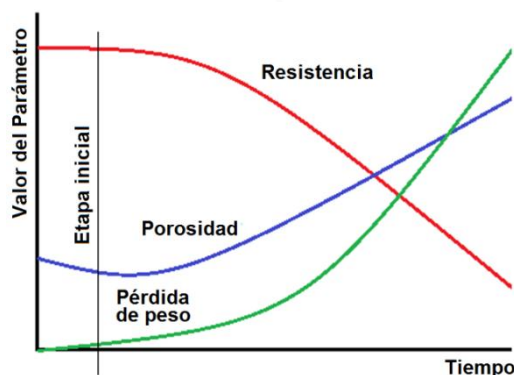


Figura 1: Tendencia de cambios en el material debido al biodeterioro

3. BIODETERIORO DE INFRAESTRUCTURA

3.1 Biodeterioro de sistemas de agua potable

Problemas asociados al crecimiento bacteriológico, formación de biopelículas y corrosión microbiana de las tuberías han sido reportados en sistemas de agua potable. Los desencadenantes más importantes de estos problemas son la temperatura, la edad del agua, la concentración de compuestos orgánicos y concentración de cloro residual. El rebrote



bacteriológico, la formación de biopelículas y la corrosión microbiana son los principales problemas biológicos asociados a los sistemas de agua potable. También las prácticas operacionales afectan el crecimiento de microorganismos como las bacterias nitrificantes y el re-crecimiento bacteriológico general modificando su influencia sobre los materiales de los sistemas de distribución [19].

3.2 Biodeterioro de sistemas de alcantarillado

En los sistemas de alcantarillado, la carbonatación y la presencia de sulfuro de hidrógeno hacen que el pH inicial del agua de los poros baje de 13 o más (pH original de concreto) a aproximadamente 9. En estas nuevas condiciones, el crecimiento microbiano inicia con sus subproductos metabólicos correspondientes. Por ejemplo, las bacterias oxidantes de azufre o bacterias sulfooxidantes (SOB) producen ácido sulfúrico que reacciona con el hidróxido de calcio formando yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que posteriormente reacciona con aluminato tricálcico conduciendo a la formación de etringita ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) [23]. Para concentraciones de sulfuro de hidrógeno (H_2S) entre 30 y 400 ppm las SOB pueden causar reducciones de espesor en las alcantarillas a tasas que van desde 1.4 hasta 7.6 mm/año en períodos de 2 meses a 14 años. Además de las SOB, están las bacterias reductoras de sulfato o bacterias sulforeductoras (SRB) que viven en el biofilm que se forma en las paredes de las tuberías de alcantarillado o sumergidas en las aguas residuales. Las SRB convierten anaeróticamente los sulfatos (típicamente 20 y 50 mg / L de aguas residuales) a sulfuros que posteriormente usan las SOB para su provecho [14].

La carbonatación y la combinación de ataque de sulfatos aceleran el daño en las capas más profundas de las tuberías de CR. En algunos experimentos reportados en [10],

se investigaron estos dos mecanismos de ataque. En estos experimentos, muestras cúbicas de 100 mm de lado, fueron expuestas a 20% de dióxido de carbono, humedad relativa de 70% y cuatro formas de sulfato durante 360 días. Los resultados mostraron pérdidas de peso que oscilaban entre 13.5% y 20.2%. Las pérdidas de resistencia a la compresión y al cortante medidas fueron del orden de un 10% y 19%, respectivamente [10].

El hinchamiento (expansión) y la formación de grietas pueden aparecer debido a la formación de etringita retardada, lo que debilita la matriz del concreto y acelera otros mecanismos perjudiciales tales como la corrosión del acero. Se pueden observar efectos aún más nocivos cuando hay penetración de cloruros, carbonatación y ataque de sulfatos. Tal caso es descrito por Moradian et al. [23] un sistema de alcantarillado enterrado en suelos que contienen cantidades considerables de sulfato y cloruros, y en donde el ambiente interior es rico en sulfatos y dióxido de carbono, puede requerir intervenciones tipo salvavidas en menos de 10 años.

3.3 Componentes del sistema de transporte

El uso de sales de deshielo y los procesos de congelación-descongelación pueden conducir a la corrosión del acero en pavimentos y tableros de puentes de concreto agrietados y porosos. También el reciclaje de pavimentos, la presencia de compuestos de amoníaco-nitrógeno, nitrato-nitrógeno y ortofosfato-fósforo incrementa la porosidad del concreto, cambia la forma y el tamaño de las estructuras porosas y aumenta la vulnerabilidad por obstrucción de los materiales en las estructuras de pavimento de carreteras [13]. Los microorganismos contenidos en aguas de escorrentía también pueden llegar a capas de geotextil y permanecer allí durante largos períodos de tiempo. Su crecimiento implica



reacciones químicas que pueden afectar el sustrato del concreto.

3.4 Biodeterioro en rellenos sanitarios

La disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios y la recuperación de tierras que han sido usadas para estas u otras aplicaciones también han mostrado problemas como resultado del ataque microbiano. El uso de materiales de construcción como los denominados "Drywall" hechos de yeso papel, pueden llegar a ser hasta el 30%, en peso húmedo de los residuos de demolición dispuestos en rellenos sanitarios. Algunos investigadores han medido la presencia de H_2S en cantidades que llegan hasta 12000 ppmv que son un producto de la descomposición de dicho material. La presencia simultánea de yeso, la humedad, las condiciones anaerobias, alguna fuente de carbono, el medio ambiente de pH neutro y temperaturas del medio (30 a 38 ° C) dan las condiciones óptimas para el crecimiento de SRB. Estas SRB metabolizan yeso y producen sulfuro de hidrógeno. A su vez, la presencia de H_2S y de carbono facilitan la proliferación de bacterias oxidantes de azufre en ambientes aeróbicos [30].

3.5 Biodeterioro en sistemas de estabilización de suelos

Los métodos de estabilización de suelos utilizados para manejar los problemas de expansión son tratados con frecuencia mezclando cemento Portland con tierra. El material resultante puede ser clasificado como un mortero de cemento que puede sufrir de problemas de biodeterioro. Durante la hidratación del cemento, se forman más de veintitrés minerales, que producen hasta un 15% de etringita/masa causando la hinchazón del suelo. La etringita y el yeso son los principales vinculantes de sulfato después de 28 días de curado el concreto siendo más importante la cantidad de sulfato que la de etringita [7]. Esta estructura química que se combina con agua sub-

superficial y el agua subterránea contaminada podría ser una fuente de ataque microbiano. Se requiere más investigación sobre estos suelos mejorados.

4. BIODETERIORO DE COMPUESTOS DE CONCRETO

Los agregados piríticos en RC son una fuente de energía para los microorganismos. En la naturaleza, piritas y pirrotitas son los minerales más abundantes que contienen sulfuro de hierro. La piritita (FeS_2), se asocia con rocas ígneas y metamórficas y venas minerales que han estado sujetas a altas temperaturas. Cuando esas rocas se forman en condiciones de baja temperatura se relacionan con sedimentos ricos en materia orgánica. La piritita es inestable bajo condiciones atmosféricas y se oxida en presencia de agua y oxígeno. Los procesos microbianos y químicos oxidan la piritita produciendo hinchazón y formación de grietas en el material que la contiene [24].

Los problemas de deterioro relacionados con depósitos de roca estéril con contenido de piritita hasta de 30% y la acidificación de las aguas subterráneas en la minería del carbón han sido investigados ampliamente [26]. La escasez actual de buenas canteras en algunas partes del mundo ha llevado al uso de rocas que contienen piritita como agregado de concreto [32]. El contenido de azufre y compuestos ferrosos en el interior del concreto resultante ofrecen una fuente de alimento para las bacterias SOB y SBR que a su vez generan biodeterioro.

5. BIODETERIORO E INGRESO DE CLORUROS

En las estructuras de CR la corrosión del refuerzo puede ser facilitada cuando está en contacto con cloruros. La corrosión del acero de refuerzo en las estructuras RC afecta negativamente su ductilidad, su fuerza y su resistencia a la fatiga [9-17].



Poco después del vaciado, los altos valores de pH alto (>13) garantizan una protección del concreto alcalino sobre el acero de refuerzo que a su vez por lo general se protege a si mismo por una película de óxido superficial. Los iones cloruro pueden llegar a la superficie del concreto debido principalmente a entornos marinos o a la aplicación de sales de deshielo para superficies de las vías. Cuando los iones cloruro penetran en la matriz del concreto y entran en contacto con el refuerzo, un proceso llamado despasivación se produce iniciando su corrosión [3]. Este proceso se acelera cuando el concreto envejece. La presencia de gases tales como el CO₂ o el H₂S en el medio ambiente puede disminuir el pH del concreto hasta alrededor de 9, fomentando que los microorganismos crezcan y modifiquen la porosidad [14]. En las estructuras de RC expuestas a ambientes que combinan la proliferación de bacterias y la disponibilidad de cloruro, la porosidad y las grietas causadas por el ataque bacteriano aumentan, facilitando la difusión de cloruro dentro de la matriz de concreto, lo que conduce a la corrosión del refuerzo [4].

6. EFECTO DE LOS MICROORGANISMOS EN RC

6.1 Tipos de microorganismos

El crecimiento de los microorganismos se puede lograr cuando existen una fuente de carbono, un donador de electrones y un aceptor de electrones final. Los microbios se llaman heterótrofos cuando la fuente de carbono es orgánica, o autótrofos cuando la asocian al dióxido de carbono. La dinámica de los microorganismos se basa en la transferencia de un electrón de un donante a un receptor. Los microorganismos se denominan aeróbicos si el aceptor de electrones es oxígeno o anaerobios, si el aceptor de electrones es diferente de oxígeno. En ausencia de un aceptor de electrones externo, los electrones pueden

ser redistribuidos dentro de la fuente de electrones, oxidando parcialmente algunos átomos de carbono y reduciendo los otros átomos de carbono (metabolismo anaeróbico) [14]. Los organismos principales involucrados en el biodeterioro de concreto incluyen bacterias, hongos, algas y líquenes [28].

6.2 Algas, hongos y líquenes

El crecimiento de hongos se ha observado en edificios, monumentos y estructuras subterráneas. Los hongos más comunes observados son *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cladosporium* y *Penicillium* [2]. Las bacterias y hongos quimioorganotróficos con o sin la presencia de fotoautótrofos pueden actuar colectivamente como colonizadores microbianos primarios, preparando la superficie para su posterior herencia microbiana [12]. La *Stichococcus* sp., *Chlorella* sp. y *Cyanobacterium Gloeocapsa* son los géneros de algas más comúnmente halladas y usadas en pruebas relacionadas con los materiales de construcción [21]. Por otro lado los Cocoides y las colonias de Cianobacterias, Endolitos, *Trentepohlia*, *Thyrea*, *Aspicilia*, *Verrucaria*, *Caloplaca* son los líquenes asociados al biodeterioro de terracota, cemento y yeso pintado [11].

La colonización de las superficies exteriores de los edificios por parte de cianobacterias, algas, briófitos y líquenes lleva a formar comunidades complejas que facilitan el desarrollo de bacterias heterótrofas, protozoos, moluscos y artrópodos. Muchos de ellos son termo-tolerantes (65-70 °C) en condiciones secas pero termo-sensible en condiciones húmedas (20-55 °C). Se han propuesto tratamientos físicos basados en la humectación y calentamiento (45-55°C) o envoltura de plástico para inhibir la proliferación de microorganismos [31] con mediano éxito que aún requiere investigación.



6.3 Bacterias

Las bacterias son los microorganismos más agresivos para los elementos de CR. En un ambiente adecuado metabolizan compuestos que conducen a reacciones químicas nocivas para el concreto. Este proceso se denomina corrosión microbiana del concreto (MICC) y se puede presentar en los sistemas de alcantarillado, instalaciones de tratamiento de agua, piscinas, torres de enfriamiento e instalaciones hidráulicas [27].

En las aguas residuales, hay una transformación continua de H_2S en azufre parcialmente oxidado (tiosulfato, azufre elemental y especies de polisulfato). La existencia de nutrientes y la turbulencia del flujo facilitan el ascenso de H_2S hacia las paredes de la tubería. En este entorno las especies *Thiobacillus* pueden crecer usando CO_2 atmosférico como fuente de carbono [27-28]. El metabolismo de dichas especies produce un descenso del pH y promueve un mejor ambiente para que otras bacterias crezcan, se reproduzcan y mueran.

Los microorganismos sulfooxidantes neutrófilos (NSOM) más estudiados y su rango de pH incluyen *T. thioparus* (4,5-10), *T. novellus* (5-9,2), *T. neapolitanus* (4-9), *T. intermedius* (1,7-9); mientras que los microorganismos sulfooxidantes acidófilos (ASOM) incluyen *A. Cryptum* (4.6 a 5.3). y *T. thiooxidans* (0,5-4). Las *T. thiooxidans* (ahora llamada *Acidithiobacillus thiooxidans*) producen ácido sulfúrico (H_2SO_4) que ataca la matriz del concreto produciendo sulfato de calcio ($CaSO_4$) [18] y la muy expansiva etringita capaz de causar agrietamiento interno, hinchazón y roturas capilares [22-27-28].

Además de los anteriores se han observado en tuberías de alcantarillado los *Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum* y *Acidiphilium Cryptum* [33]. Las *Cyanobacterium Chroococcidiopsis* y las *Cyanobacterium Pleurocapsa* fueron encontradas en las biopelículas de edificios y monumentos [11].

Las ASOM puede moverse hacia las profundidades de las capas corroídas del concreto pero las NSOM no pueden hacerlo. La actividad de las bacterias puede modificar las tasas de corrosión haciendo que varíen entre 2 y 4.7 mm/año [5-18-27-33]. Por otro lado se ha observado que en ambientes ricos en ASOM, el deterioro microbiológico es más perjudicial que el deterioro químico (inmersión en ácido sulfúrico) conduciendo a una pérdida adicional de peso de material de hasta el 8% en el primer caso [22].

Giannantonio et al. [12] estudiaron las principales comunidades microbianas presentes en superficies de concreto a la vista. Ellos identificaron las *Proteobacteria*, *Acidobacteria*, *Firmicutes*, *Actinobacteria*, *Cyanobacterias*, *Bacteroidetes* y *Planctomycetes*, siendo las gamma-proteobacteria la más abundante (75%). Tres filotipos bacterianas: *Actinomycetales*, *Xanthomonadales* y *Rhodospirillales* fueron identificados como los más abundantes (más de 70%) de la composición de la comunidad microbiana en las alcantarillas, mientras que sólo el 4% de toda la comunidad pertenecía a *acidithiobacillales* (por ejemplo, *A. thiooxidans*) [6].

Las picaduras por corrosión del acero son también una preocupación importante en la corrosión del acero. Johnston y Voordouw [15] informaron de que la influencia de SRB en las picaduras de acero puede causar pérdidas de 0.050, 0.090 y 0.095 mm/año, para razones oxígeno/azufre de 1.0, 1.6 y 2.4 respectivamente. Estos resultados sugieren que el crecimiento biótico genera una mayor distorsión material que el ataque químico o el crecimiento abiótico.

Un resumen de las cepas más comunes de bacterias utilizadas en pruebas de biodeterioro en concreto y materiales relacionados se muestra en la Tabla 1.



Tabla 1: Pruebas correspondiente a efectos de las bacterias en el concreto

AUTOR	MATERIAL MICROORGANISMOS	Y
Monteny et al. 2001.	Material: Concreto resistente a los sulfatos Bacteria: Bacteria sulfuro-oxidante (Bacteria <i>Thiobacillus</i>) y biopolímeros	
Hernandez et al. 2002	Material: Concreto. Coronas de tuberías de alcantarillado Bacteria: <i>Thiobacillus ferrooxidans</i> , <i>Thiobacillus thiooxidans</i> , <i>Leptospirillum ferrooxidans</i> y miembros del género <i>Acidiphilium</i> .	
Roberts et al. 2002	Material: Morteros de aluminato de calcio, microsilíce y cemento Portland. Bacteria: Agua servida de la ciudad de Houston	
Aviam et al. 2004.	Material: Mortero de cemento Portland Bacteria: <i>Thiomonas intermedia</i> and <i>Halothiobacillus neapolitanus</i> .	
Bielefeldt et al. 2009	Material: Concreto de tubería nueva para recolección de aguas servidas Bacteria: <i>Acidiphilium cryptum</i> , <i>Thiobacillus neapolitanus</i> , <i>Thiobacillus thioparus</i> , <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> .	

Lors et al. 2009.	Material: Mortero de cemento Portland Bacteria: <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> .
Giannantonio et al. 2009b	Material: Concreto (pintado / superficies sin pintar) Bacteria: <i>Phylum Proteobacteria</i> , principalmente <i>Gammaproteobacteria</i> .

7. EFECTOS POSITIVOS DE BACTERIAS

Las bacterias se han utilizado también para mejorar el rendimiento del concreto; en este caso, en lugar de describir el proceso como biodeterioro, se denomina biorremediación. La biorremediación utiliza microbios para producir cambios benéficos en las propiedades de un material y parece ser una alternativa para hacer frente al biodeterioro. Por ejemplo Kaur et al. [16] estudiaron los efectos de los hongos (*Eupenicillium crustaceum*) en concretos mezclados con arenas de fundición residuales tratadas. Ellos encontraron que el material tratado por hongos tuvo una ganancia en la resistencia a la compresión (28 d) del 24%. Además, la absorción de agua y la porosidad cayeron del 44% a 50% en comparación con el material sin tratar. Esta mejora puede explicarse por la capacidad del cultivo de hongos para formar biominerales y llevar a cabo biodeposición (precipitación de carbonato bacteriano). La posible interacción de líquen, micorriza y hongos saprotróficos con los sistemas naturales de roca, tierra y edificios, yeso y granitos y su influencia en la formación de biomineral secundario sobre los sustratos atacados se proponen como iniciativas de investigación futuras.



Según Achal et al. [1], el uso de *Bacillus* sp. CT-5 (aislado a partir de cemento) conduce a la biomineralización de carbonato de calcio y mejora la resistencia a la compresión en un 36%, reduciendo la absorción de agua hasta en un 83% en los cubos de mortero. Una ganancia menor (18%) se observó en la resistencia a la compresión de las muestras de mortero de cemento sometidas a *Bacillus pasteurii* y *Pseudomonas aeruginosa*.

8. PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS PARA BIODETERIORO

Hay muchos métodos de ensayo disponibles para identificar la actividad bacteriana en el concreto. En primer lugar, los métodos mineralógica-microbiológicos pueden ser utilizados para describir la topografía superficial de los materiales, la morfología de microorganismos, la composición del material, y otras propiedades usando radiación electromagnética o de difracción de electrones. Algunas de las pruebas más comunes incluyen Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), espectroscopia de energía dispersiva (EDS), espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDAX), difracción en polvo con rayos X (XRPD). También hay pruebas químicas que se centran en la identificación y cuantificación de los componentes químicos y sus reacciones dentro de los materiales. Estos incluyen el análisis cuantitativo (gravimétrico y volumétrico) y cualitativo.

9. FUTUROS RETOS DE INVESTIGACIÓN

Actualmente se adelantan investigaciones sobre el efecto de la conjunción de la disponibilidad de los microorganismos y agregados piríticos dentro del concreto en ambientes húmedos o saturados. También la influencia del ataque bacteriano sobre la porosidad, la resistencia mecánica y la difusividad de cloruros en el mortero está siendo investigada. Estos temas requieren más investigación específicamente en la dinámica microbiológica implicada.

Las necesidades adicionales de investigación en el campo pueden incluir:

1. El estudio de ataque microbiano en las estructuras de CR construidas en zonas saturadas con agua sub-superficial contaminada o en suelos estabilizados.
2. Estudio del efecto del ataque microbiano en las estructuras construidas en tierras recuperadas.
3. Se requiere mejor comprensión de los problemas de biodeterioro de los elementos de CR enfocados desde los procesos microbiológicos.
4. Es recomendable estudiar los efectos de la combinación de biodeterioro y ataque de cloruros sobre estructuras construidas mar adentro y sobre la infraestructura energética.
5. Es importante estudiar posibles estrategias correctivas para mitigar los efectos del biodeterioro del CR.
6. Estudio de la posible aplicación de biodegradación en la creación de nuevos materiales verdes.
7. Desarrollo de modelos integrales para explicar los procesos de biodeterioro en cada uno de los temas anteriores.

10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El biodeterioro de las estructuras de CR, también llamado corrosión microbiana del concreto microbially induced (MICC), es un facilitador y un actor principal del proceso de deterioro global. El biodeterioro físico y químico son las clases más agresivas de deterioro, los cuales son comúnmente promovidos por la actividad bacteriana. El biodeterioro puede afectar a las barras de refuerzo de concreto directa o indirectamente debido a repercusiones biogénicas (grietas, aumento de la porosidad) y la penetración de cloruro.



REFERENCIAS

- [1] Achal V., Mukherjee A., Sudhakara Reddy M. 2011. "Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures." ASCE. Journal of materials in civil engineering. 23:730-734.
- [2] Aira, M., Jato, V., Stchigel, A., Rodriguez, F. 2007. "Aeromycological study in the Cathedral of Santiago de Compostela (Spain)." Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation. 60, 231-237
- [3] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., and Vennesland. 2009. "Critical chloride content in reinforced concrete - A review." Cement and Concrete Research. 39(12), 1122-1138.
- [4] Bastidas-Arteaga E., Bressolette P., Chateauneuf A., Sánchez-Silva M. 2009. "Probabilistic lifetime assessment of RC structures under coupled corrosion-fatigue deterioration processes." Elsevier. Structural Safety 31:84-96
- [5] Bielefeldt, A. Gutierrez-Padilla, M., Ovtchinnikov, S., Silverstein, J., Hernandez, M. 2009 accepted manuscript December 7, not copyedited. "Bacterial kinetics of sulfur oxidizing bacteria and their biodeterioration rates of concrete sewer pipe samples." American Society of Engineers. Journal of Environmental Engineering
- [6] Cayford B., Tyson G., Keller J., Bond P. 2010. "Microbial community composition of biofilms associated with sewer corrosion." International Water Association. 6th International Conference on Sewer Processes and Networks. November 2010. Australia.
- [7] Chrysochoou M., Grubb D., Malasavage N. 2012. "Assessment of Sulfate-Induced Swell in Stabilized Dredged Material: Is Ettringite Always a Problem?" ASCE. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering. 138:407-414.
- [8] De Muynck, W., Maury, A., De Belie, N., Verstraete, W. 2009. "Evaluation of strategies to prevent algal fouling on white architectural and cellular concret." Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation. 63, 679-689
- [9] Du Y., Clark L., Chan A. 2005. "Effect of corrosion on ductility of reinforcing bars." Magazine of Concrete Research 57. No. 7 September, 407-419.
- [10] Gao R., Li X., Xu Q., Zhao S. 2011. "Concrete Deterioration under Alternate Action of Chemical Attack Environments." IEEE.
- [11] Gaylarde, Ch., Gaylarde, P. 2005. "A comparative study of the major microbial biomass biofilms on exteriors of buildings in Europe and Latin America." Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation. 55, 131-139
- [12] Giannantonio, D., Kurth, J., Kurtis, K., Sobecky, P. 2009b. "Molecular characterizations of microbial communities fouling painted and unpainted concrete structures." Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation. 63, 30-40
- [13] Goede W., Haselbach L. 2012. "Investigation into the Structural Performance of Pervious Concrete." ASCE. Journal of transportation engineering. 138:98-104.
- [14] Hudon E., Mirza S., Frigon D. 2011. "Biodeterioration of Concrete Sewer Pipes: State of the Art and Research Needs." ASCE. Journal of pipeline systems engineering and practice. 2:42-52
- [15] Johnston Sh., Voordouw, G. 2012. "Sulfate-Reducing Bacteria Lower Sulfur-Mediated Pitting Corrosion under Conditions of Oxygen Ingress." ACS. Environmental science and technology. 46:9183-9190.
- [16] Kaur G., Siddique R., Rajor A. 2012. "Influence of fungus on properties of concrete made with waste foundry



- sand.” *Journal of Materials in Civil Engineering*. Accepted March 19, 2012
- [17] Li S., Zhang W., Gu X., Zhu C. 2011. “Current Status on Fatigue of Corrosion Reinforcement. *IEEE*.
- [18] Lors, Ch., Chehade, M., Damidot, D. 2009. “pH variations during growth of *Acidithiobacillus thiooxidans* in buffered media designed for an assay to evaluate concrete biodeterioration.” *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation*. 63, 880–883
- [19] Machell J., Boxall J. 2011. “Field Studies and Modeling Exploring Mean and Maximum Water Age Association to Water Quality in a Drinking Water Distribution Network.” *ASCE. Journal of Water Resources Planning and Management*. Accepted December 15, 2011.
- [20] Mehta, P., Monteiro, P. 2006. “CONCRETE, Microstructure, Properties, and Materials”. *Mc-Graw Hill*. Third Edition, 659 p.
- [21] Miller, A., Dionisio, A., Macedo, M. 2006. “Primary bioreceptivity: A comparative study of different Portuguese lithotypes.” *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation*. 57, 136–142
- [22] Monteny, J., De Belie, E., Vincke, E., Verstraete, W., Taerve, L. 2001. “Chemical and microbiological tests to simulate sulfuric acid corrosion of polymer/modified concrete.” *Elsevier. Cement and Concrete Research*. 31, 1359–1365
- [23] Moradian M., Shekarchi M., Pargar F., Bonakdar A., Valipour M. 2012. “Deterioration of Concrete Caused by Complex Attack in Sewage Treatment Plant Environment.” *ASCE. Journal of performance of constructed facilities*. 26:124-134.
- [24] Oliveira I., Cavalaro S., Aguad A. 2012. “New Unreacted-Core Model to Predict Pyrrhotite Oxidation in Concrete Dams.” *ASCE. Journal of Materials in Civil Engineering*. Accepted March 29, 2012.
- [25] Prieto, B., Silva, B., Aira, N., Alvarez, L. 2006. “Toward a definition of a bioreceptivity index for granitic rocks: Perception of the change in appearance of the rock.” *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation*. 58, 150–154
- [26] Regmi G., Indraratna B., Nghiem L., Golab A., Prasad B. 2011. “Treatment of Acidic Groundwater in Acid Sulfate Soil Terrain Using Recycled Concrete: Column Experiments.” *ASCE. Journal of environmental engineering*. 137:433-443.
- [27] Roberts, D., Nica, D., Zu, G. 2002. “Quantifying microbially induced deterioration of concrete: initial studies.” *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation*. 49, 227–234
- [28] Sanchez-Silva M, Rosowsky David. 2008. “Bioderieration of Construction Materials: State of the Art and Future Challenges.” *ASCE. Journal of materials in civil engineering*. 20:5,352–365.
- [29] Starosvetsky, D., Armon, R., Tahalom, J., Starosvetsky, J. 2001. “Pitting corrosion of carbon steel caused by iron bacteria.” *Elsevier. International Biodeterioration & Biodegradation*. 47, 79–87
- [30] Tolaymat T., El Badawy A., Carson D. 2012. “Estimate of the Decay Rate Constant of Hydrogen Sulfide from Drywall in a Simulated Bench Scale Study.” *ASCE. Journal of Environmental Engineering*. Accepted June 20, 2012.
- [31] Tretiach M, Bertuzzi S., Candotto F. 2012. “Heat Shock Treatments: A New Safe Approach against Lichen Growth on Outdoor Stone Surfaces.” *ACS. Environmental science and technology*. 46, 6851–6859.