EVALUACIÓN DE LA BACTERIA UREOLÍTICA EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CONCRETO EN EL NORTE DE MÉXICO

Valdivia, F[1]; Castro, J[2]; Hernández, S[3]; Balagurusamy, N[4]; Narayanasamy, R[5]

[1] Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango, México, Alumno, Ing. Civil, ***valdiviadt@gmail.com***
[2] Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango, México, Alumno, Ing. Civil, ***jesus.castro.fica@gmail.com***
[3]Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México, Alumna, Ing. Bioquímica, ***aras_7077@hotmail.com***.
[4]Escuela de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Coahuila, Torreón, Coahuila, México. Catedrático, Dr. Ciencias Ambientales, ***bnagamani@uadec.edu.mx***
[5]Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango, México, Catedrático, Dr. Ing. Civil con especialidad en Sistemas Planeación y construcción, ***naraya@ujed.mx.***

RESUMEN

Las fallas y grietas son problemas que se presentan en el concreto. Una estrategia novedosa para la reparación de micro grietas en concreto es la precipitación de carbonato inducido por microorganismos (MICP por sus siglas en ingles), donde la ureasa cataliza la hidrólisis de urea a CO_2 y amoniaco, aumentando así su PH, resultando la precipitación de carbonato. MICP es una tecnología que posee el potencial de ayudar a minimizar los problemas ambientales, mejorar la calidad del concreto y además, es útil en el desarrollo de agentes auto – curativos en la industria de la construcción. Se utilizaron los organismos, que viven en la región de La Comarca Lagunera en el Norte de México, que muestran la actividad de ureasa, mismos que tienen la capacidad de formar calcita. Se agregaron cepas bacterianas ACRN 5 a la mezcla de concreto para una resistencia a la compresión de 250 kg/cm² en diferentes concentraciones para definir la óptima alcanzada, comparado con los cilindros de control (sin bacteria). La resistencia a la compresión de los cilindros de concreto fue analizada y se encontró que la concentración de 10^5 (partículas por mililitro de agua) dio la máxima resistencia a la compresión.

Palabras clave: Bacteria, resistencia a la compresión, adición, cepa, calcita, cemento.

ABSTRACT

Slits and cracks are problems which are found in concrete. A New strategy for the repair of micro-crack in concrete is the microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP), where the urease catalyzes the hydrolysis of urea to CO_2 and Ammonia, increasing its PH, resulting the carbonate precipitation. MICP is a technology that possesses the potential to help minimize environmental problems, improve the quality of concrete and more importantly it is useful in the development of self healing agents in the construction industry. Organisms living in The Comarca Lagunera in North Mexico were used, showing the activity of urease, which show capacity to from calcite. Bacterial Strains were added ACRN5 to the mixture of concrete for a compressive strength of 250 kg/cm² in different concentrations to define wich would be the most optimal, compared to the control cylinders (without bacteria). Compressive strength of the concrete cylinders was analyzed and it was found that the concentration of 10^5 (particles per milliliter of water) resulted to be the maximum compressive strength.

Key words: Bacteria, compressive strength, addition, strain, calcite cement.

1 INTRODUCCIÓN

Las reacciones químicas y físicas que describen la hidratación del cemento son muy complejas. Para poder entender los procesos químicos que determinan el fraguando del cemento, es necesario estudiar los elementos del clincker cada uno por separado. Esto supone que la hidratación de cada compuesto es un proceso independiente durante la hidratación del concreto. Después de dos horas el concreto pasa de estado plástico al estado sólido e irá ganando solidez durante el proceso de curado. Puesto que el concreto es débil en tensión, desarrolla grietas debido al encogimiento y a los cambios de temperatura. Usualmente al concreto se le añade acero de refuerzo para contrarrestar las fuerzas de tensión, pero cuando las micro grietas aparecen en la superficie del concreto, el agua y otros agentes corrosivos se introducen en el elemento estructural para después dañar el acero de refuerzo. Los problemas de durabilidad son manejados a través del método de impregnación de grietas, ya sea con cemento, bases epóxicas, resinas y otros rellenos sintéticos (NEVILLE, 1996). Una estrategia novedosa para la reparación de micro grietas en estructuras de concreto es la precipitación de carbonato inducido por microorganismos (MICP por sus siglas en ingles), donde la ureasa cataliza la hidrólisis de urea a CO_2 y amoniaco, lo que resulta el aumento de PH, por consecuencia la precipitación de carbonato. MICP es una tecnología que posee el potencial de ayudar a minimizar los problemas ambientales y además, mejorar la calidad y resistencia a la compresión del concreto. (NARAYANASAMY, 2012).

2 PROCESO DE BIOMINERALIZACIÓN

El desgaste de las superficies de concreto es un proceso complejo, incluyendo factores físicos, químicos y biológicos (por ejemplo la lixiviación, ataques por ácidos y sales, microorganismos tales como bacteria, musgos, algas, hongos causados por humanos mediante la contaminación). El desgaste a menudo induce un aumento de la porosidad, debilitamiento estructural de las capas de la superficie y una apariencia poco atractiva. Para evitar daños futuros los tratamientos de la superficie con repelentes de agua o bloqueadores de poros pueden ser aplicados. Sin embargo, los tratamientos con productos inorgánicos involucran algunas desventajas, tales como la diferencia entre el coeficiente de expansión térmica de la superficie tratada, degradación con la edad y la necesidad de un alto costo de mantenimiento. Además el uso de ciertos solventes contribuye a la contaminación ambiental. Otra manera de limpiar, reparar o proteger el concreto es utilizando procesos biológicos, los cuales pueden tener un carácter ecológico. En esta investigación la acción de la bacteria viva es usada para proteger y reparar los elementos del concreto. (G. HEIRMAN et al, 2003).

Como en cualquier otro proceso de biomineralización, la precipitación del carbonato de calcio ($CaCO_3$) se puede producir mediante dos mecanismos diferentes: biológicamente controladas o inducidas. En mineralización biológicamente controlada, el microorganismo controla el proceso, es decir, nucleación y crecimiento de las partículas, el organismo sintetiza los minerales en una forma que es único para su especie, independientemente del medio ambiental. Sin embargo, el carbonato de calcio producido por bacterias generalmente es conocido como “inducido” debido a que el tipo de mineral depende en gran parte del medio

Ambiental (De MUYNCK et al, 2010). La precipitación de carbonato de calcio es un proceso químico realmente sencillo, se rige principalmente por cuatro factores importantes (Ilustración 1):

A. Concentración de calcio
B. Concentración de disueltos inorgánicos de carbono
C. PH
D. Sitios de nucleación.

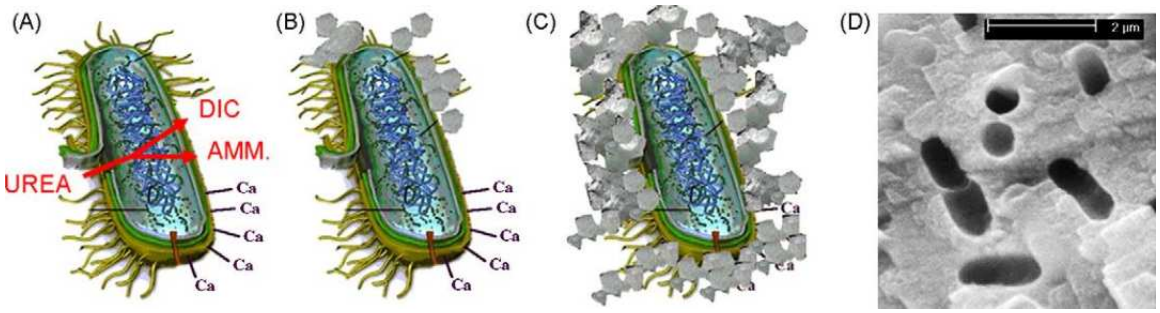

Ilustración 1. - Representación simplificada de los eventos ocurridos durante la precipitacón de carbonato inducido por el microorganismo.

La precipitación activa es caracterizada de partículas de calcio (Ca) mediante intercambios iónicos en la membrana celular por la activación de calcio y/o enlaces iónicos de magnesio, acoplado con la producción de iones de carbonato (G. HEIRMAN et al, 2003).La carbonato génesis parece ser la respuesta de comunidades bacterianas heterotróficas a un enriquecimiento del medio ambiente en materia orgánica. El crecimiento de la bacteria puede ser dividido en cuatro etapas fundamentales:

I. FASE DE LATENCIA: El crecimiento y la reproducción están recién comenzando a ocurrir.
II. FASE LOGARITMICA: La reproducción ocurre a una velocidad exponencial, dando lugar a una masiva producción de CO_3 y HCO_3. Es en esta etapa donde las actuales partículas de calcio son formadas.
III. FASE ESTACIONARIA: La reproducción continua pero no con la misma velocidad como en la fase exponencial.
IV. FASE DE LA MUERTE: Finalmente, la población bacteriana comienza a morir o a extinguirse.

El papel real de la precipitación bacteriana sigue siendo, sin embargo, un tema de debate. Algunos autores creen que por ser este un subproducto accidental y no deseado del metabolismo, mientras que otros piensan que es un proceso específico con beneficios ecológicos para los organismos precipitantes (ENLRICH, 1998).

Los primeros resultados obtenidos a base de la experimentación fueron obtenidos en la torre sureste de la iglesia de Saint Medard (piedra caliza) construido durante el siglo XII en Thouars, Deux Sevres, Francia. El proceso de biomineralizacion realizado fue evaluado durante 1 año y seis meses después en el cual se encontró que la capa de calcita se comporta de forma natural y su proceso de envejecimiento es similar al de la roca (G. HEIRMAN et al, 2003).

Lo que se pretende realizar en este estudio está basado en materiales y organismos que se desarrollan en la Comarca Lagunera, región situada en el Norte de México, que muestra la formación de ureasa y forma calcita. Se separara una clase de bacteria de acuerdo a su actividad enzimática, para el experimento se propone la cepa bacteriana nombrada ACRN 5. Dentro del estudio se analizara cada uno de los materiales utilizados en la preparación de los cilindros de concreto adicionados con la bacteria y los cilindros de concreto de control (sin bacteria). Para así comparar su resistencia a la compresión a los 28 días, así como la inducción de ranuras en los cilindros con la bacteria, para observar el desarrollo enzimático dentro de los mismos.

El estudio básicamente consiste en la utilización de la bacteria nombrada ACRN5, a diferentes concentraciones, como aditivo al concreto estructural para mejorar la resistencia a la compresión de una dosificación de 250kg/cm² y compararlo con los cilindros de control. Así como registrar el comportamiento en la regeneración en las micro grietas, es uno de los principales objetivos en este estudio por lo que a continuación se puede observar la metodología utilizada para dicha investigación.

3 METODOLOGÍA

Dentro de la serie de ensayos realizados, la cepa bacteriana ACRN5 se utilizo como recurso para medir su comportamiento de la resistencia a la compresión y compararlo con los cilindros de concreto convencional. Como primer paso se recolecto la cepa bacteriana obtenida por medio del proceso de precipitación de carbonato de calcio inducido por microorganismos (MICP). Posteriormente se procede a realizar las pruebas correspondientes a los agregados finos y gruesos para después mezclarlos con el cemento portland y obtener los 48 cilindros deseados, así como la adición in situ a la mezcla de la cepa bacteriana (Tabla 1).

MATERIAL	CANTIDAD
Cemento	354.38 KG
Agua	167.73 LTS
Grava	953.44 KG
Arena	721.78 KG
Total	2199 KG

MATRIAL	CANTIDAD
Cemento	1.975 KG
Agua	0.935 LTS
Grava	5.310 KG
Arena	4.019 KG
Total	12.239

Tabla 1. - Cantidad em kilogramos para um metro cúbico de concreto (iazquierda). Cantidad en kilogramos para un cilindro de 15x30cms. (derecha)

Posteriormente se procedió a tamizar el agregados fino y grueso por las mallas ¾", # 4, # 8 y # 10 (Crespo, 2008). Se obtuvo una dosificación para un concreto con f´c de 250kg/cm² en la cual se detalla las cantidades utilizadas de agregados, cemento, agua y cepa bacteriana (NEVILLE, A.M., 1996). El estudio experimental descrito a continuación, realizado con la finalidad de demostrar que la bacteria ureolítica procesada aumentará la resistencia a la compresión en el concreto. Mismo que se llevo a cabo mediante el proceso de precipitación de carbonato de calcio inducido mediante la bacteria ACRN 5. Misma que se distribuirá en tres diferentes cantidades (concentraciones de 10^4,10^5 y 10^6. Celulas por mililitro de agua) para demostrar cuál de ellas será la que mejor resistencia obtenga.

3.1 Materiales utilizados

a) CEMENTO: Cemento Portland ordinario disponible en el mercado local. El cemento utilizado será debidamente probado en cuanto a sus características de acuerdo a la norma ASTM C187-98.
b) AGREGADO FINO: Arena disponible en el mercado local. La arena disponible será graduada de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM136-06.
c) AGUA: Potable, disponible en la localidad conforme a la especificación de la norma ACI 318-2008.
d) MICROORGANISMO: La cepa bacteriana ACRN5 mostro la actividad ureolítica y fue aislada del suelo de la región. Previamente cosechados, desarrollados y multiplicados en un medio que contiene urea para después de 48 horas utilizarlas en los cilindros de concreto. Dichas cepas fueron utilizadas in situ agregadas a la mezcla de concreto de acuerdo a la concentración requerida de partículas bacterianas por mililitro de agua (tabla 2).

CONCENTRACIÓN	ADICIÓN A LA MEZCLA (ml)
10^4 células por mililitro de agua	0.000935
10^5 células por mililitro de agua	0.00935
10^6 células por mililitro de agua	0.0935

Tabla 2. - Cantidad de cepa bacteriana añadida al concreto (in situ).

3.2 Resistencia a la compresión de los cilindros

Un total de 48 cilindros de concreto con dimensiones de 30x15 fueron fabricados, de los cuales:

- 12 fueron fabricados con la bacteria ACRN5 a una concentración de 10^6 células por mililitro de agua.
- 12 fueron fabricados con la bacteria ACRN5 a una concentración de 10^5 células por mililitro de agua.
- 12 fueron fabricados con la bacteria ACRN5 a una concentración de 10^4 células por mililitro de agua.
- 12 fueron fabricados sin bacteria (control)

Los cilindros fueron sometidos al proceso de cámara de curado, esperando obtener la máxima resistencia calculada a los 28 días del proceso.

4 RESULTADOS

La resistencia a la fuerza de compresión en los cilindros de concreto, a los 28 días en la cámara de curado, fueron preparados a diferentes concentraciones de cepa bacteriana ACRN5 resultando la concentración de 10^5 células por mililitro de agua, la de mayor resistencia obtenida (Ilustración 2).

Los resultados obtenidos durante el experimento son mostrados a continuación en las diferentes tablas. Se podrá observar la resistencia a la compresión obtenida a los 3, 7, 14 y 21 días del proceso en la cámara de curado (Tabla 3).

Tratamiento	Resistencia a la compresión (kg/cm²)			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Control (sin bacteria)	80.35	101.39	116.94	248
Concentración 10^4	241.44	298.98	328.22	375.13
Concentración 10^5	241.90	280.49	348.96	398.16
Concentración 10^6	158.64	193.34	259.36	294.26

Tabla 3. - Resistencia a la compresión de las tres diferentes concentraciones de de la cepa bacteriana ACRN5.

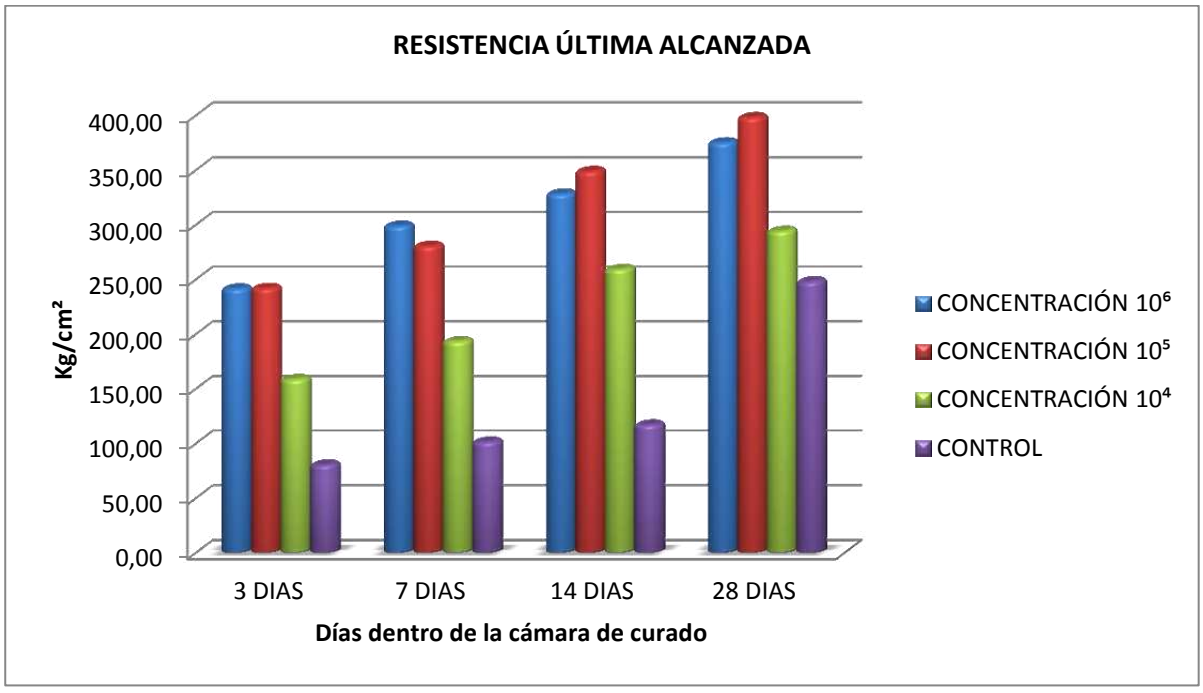

Ilustración 2. - Muestra que la concentración de 10^5 obtuvo la mayor resistencia a los 28 dias dentro de La cámara de curado.

La siguiente tabla muestra los incrementos obtenidos durante las pruebas de laboratorio en cuanto a la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto (Tabla 4). Se puede observar dentro de la misma, que el mayor de los incrementos se obtuvo a los 28 días del proceso de curado resultando satisfactoria la adición de la cepa bacteriana ACRN5.

CONCENTRACIÓN BACTERIA POR MILILITRO DE AGUA	INCREMENTOS EN RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (kg/cm²)							
	3 DÍAS		7 DÍAS		14 DÍAS		28 DÍAS	
CONTROL (SIN BACTERIA)	80.35	---	101.39	---	116.94	---	248	---
ACRN5 10^5	241.90	96.76 %	280.49 %	112.19 %	348.96 %	139.58 %	398.16 %	159.26 %

Tabla 4. - Incremento en la resistencia a la compresion a los 3,7,14 Y 28 días en la cámara de curado.

5 CONCLUSIONES

Las siguientes conclusiones son basadas en el estudio experimental descrito con anterioridad.
La cepa bacteriana que fue aislada de los suelos en la región Norte de México puede formar calcita promoviendo así la sanación autógena. De las tres diferentes concentraciones de cepa bacteriana analizadas, se encontró que la óptima concentración de densidad celular bacteriana (ACRN5) es de 10^5 células por mililitro de agua, misma que resulto en el incremento de la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.
Se encontró durante el proceso de experimentación que las mezclas de los materiales deberán ser hechas en una sola exhibición, es decir, el mismo día y de preferencia a la misma hora, para evitar la fase de la muerte de la bacteria.
Una vez aislada la bacteria del suelo de la región solamente estará disponible durante las próximas 48 horas, por lo que es indispensable hacer el experimento de forma rápida. La cepa bacteriana funciona específicamente para el suelo de la región, ya que contiene un alto porcentaje de ureasa. Se deja para el posterior estudio el análisis del suelo para una región diferente del país.

6 AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento por el apoyo brindado para la realización de este trabajo al Laboratorio de Bioremediación de La Escuela de Ciencias Biológicas, UAdeC, y al Laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura, de la Universidad Juárez del Estado de Durango, Campus Gómez Palacio, así como a todas las personas que hicieron posible éste proyecto.

7 Bibliografía

BENYUS, J. (1998). **INNOVACION INSPIRADA POR LA NATURALEZA**. En J. BENYUS. TUSQUETS.

Comité ACI 224. (s.f.). **Causas, Evaluación y Reparación de Fisuras en Estructuras de concreto.**

Corral, J. T. (2004). **Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón ; origen y prevencion.** *REDALIC, Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portuga* , 72-114.

Crespo, C. (2008). ***"Mecánica de suelos y cimentaciones".*** México: , tomo 1, sexta edición, Limusa.

De MUYNCK et al, W. N. (2010). **Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review.** Gent, Belgium: ELSEVIER.

ENLRICH, H. (1998). **Geomicrobiology: its significance for geology**. *Earth Sci. Rev. 45* , 45-60.

G. HEIRMAN et al, T. H. (2003). **BIOLOGICAL REPAIR OF DAMAGED CONCRETE AND MORTAR SURFACES: BIOMINERALISATION.** *Proceedings of the 6th Internetional Conference on Materials Science and Restoration (MSR VI)* , 501-508.

G. Heirman, T. H. (2003). **Biological repair of damaged concrete and mortar sirfaces: BIOMINERALISATION.**, (págs. 501-508.).

G. Heirman, T. H. (2003). **BIOLOGICAL REPAIR OF DAMAGED CONCRETE AND MORTAR SURFACES: BIOMINERALISATION**., (págs. 501-508.).

IMCYC, I. M. (2005). **Agrietamiento en el Concreto**. *CONCEPTOS BASICOS* , 76-78.

Lauer et al, K. R. (1956). **"Autogenous Healing of Cement Paste,**". *ACI Journal, Proceedings* , V. 27 No. 10, Junio, pp. 1083-1098.

NARAYANASAMY, R. (2012). **DEVELOPEMENT AND EVALUATION OF BIO-CONCRETE PRODUCED BY USING BACTERIA ISOLATED FROM SEMI-ARID SOILS OF THE COMARCA LAGUNERA, NORTHEAST MEXICO**. *EVALUACION DE LAS BACTERIAS UREOLITICAS A DIFERENTES CONCENTRACIONES EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DEL CONCRETO*, (págs. 2-3). GHENT, BELGIUM.

NEVILLE, A.M. (1996). ***Properties of Concrete****, 4th Edition.* Prentice Hall, NJ.: Pearson Higher education.