

Uso de un aditivo biológico para mejorar las propiedades físico-mecánicas y térmicas del hormigón

Claudia Patricia Sánchez Henao*, Diego Andrés Jiménez
Castrillón Jorge Ignacio Ruiz Múnera

(Recibido el 17 de junio de 2005. Aceptado el 8 de noviembre de 2005)

Grupo de Bioprocesos. Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. A. A. 1226, Medellín, Colombia.

Resumen

Se utilizó un aditivo biológico compuesto principalmente por bacterias calcificantes (*T. ferroxidans*, *T. thioxidans*, *Desulfovibrio* y *Sulfolobus acidularios*) en una mezcla de hormigón. El aditivo se sintetizó a partir de cepas nativas con un medio nutritivo (medio 9 K modificado), $2,5 \leq \text{pH} \leq 3,0$ a temperatura ambiente en un bioreactor de 30 L. Con el fin de determinar la factibilidad técnica se prepararon cilindros de hormigón con 30, 60, y 100% de aditivo biológico para 2 edades (7 y 28 días.), se utilizaron mezclas 1:2,3:3 (para la relación cemento: arena: grava) y una relación agua: cemento de 0,56:1. La muestra sin aditivo biológico se usó como patrón. La resistencia aumentó 17,2 % para la muestra con 30% aditivo biológico ($14,63 \pm 2,11$ MPa y $15,17 \pm 0,85$ MPa a los 7 y 28 días. respectivamente); el porcentaje y el diámetro de poros disminuyó en 39 y 46%, respectivamente para 30% de aditivo biológico (0,91% de poros y diámetro de poro de $144,7 \mu\text{m}$); el coeficiente de conductividad térmica disminuyó en todas las muestras con aditivo biológico. La mejor dosificación fue la de 30% que disminuyó el coeficiente de conductividad térmica en un 50% ($0,33 \text{ W/m K}$). La probeta patrón fue desfavorable frente el ácido nítrico, presentando una mayor pérdida de peso promedio ($0,464 \pm 0,012$ g), mientras que la pérdida de peso de la probeta con 30% de aditivo biológico fue $0,326 \pm 0,028$ g.

----- **Palabras clave:** biorrefuerzo, porosimetría, conductividad térmica, bacterias calcificantes, durabilidad.

* Autor de correspondencia. Teléfono: +57+4+210 55 36, fax: +57+4+211 90 28, Correo electrónico: csanchez@udea.edu.co (C. Sánchez Henao).

Use of a biological additive to enhance the physical-mechanical and thermal properties of concrete

Abstract

The effect of the addition of a biological ingredient composed primarily of calcific bacteria (*T. ferroxidans*, *T. thioxidans*, *Desulfovibrio* and *Sulfolobus acidularios*) on the properties of concrete is studied. The biological additive was synthesized based on native cultures in a nutritive medium (modified 9K medium), $2.5 \leq \text{pH} \leq 3.0$, at room temperature in a 30 L bioreactor. Cylinders of concrete containing 30, 60, and 100% of the biological additive were prepared using different aging times (7 and 28 days) in order to determine the technical feasibility of the mixture. The mixture of concrete was prepared using a cement to sand to gravel ratio of 1:2,3:3 and a water to cement ratio of 0.56:1. The sample without biological additive was used as the reference. The main findings are: an increase of 17.2% in resistance was observed in the sample with 30% biological additive (14.63 ± 2.11 MPa and 15.17 ± 0.85 MPa at 7 and 28 days, respectively); the percentage of pores and their diameter decreased by 39% and 46%, respectively, in the sample with 30% biological additive (porosity: 0.91%, pore diameter: $144.7 \mu\text{m}$); thermal conductivity decreased in all samples containing the biological additive (the best behavior was obtained in the sample with 30% biological which displayed a 50% reduction in thermal conductivity: 0.33 W/m K); Durability to nitric acid indicates that weight lose was larger for the reference probe than for the sample with 30% additive, 0.464 ± 0.012 g and 0.326 ± 0.028 g, respectively.

----- *Key words:* bioreinforcement, porosimetry, thermal conductivity, calcific bacteria, durability.

Introducción

La biotecnología aplicada al campo de los materiales utilizados para la construcción de vivienda es aún embrionaria y tan sólo en recientes búsquedas bibliográficas se han encontrado ejemplos de la utilización de microorganismos como una alternativa de solución al problema que existe en el ámbito mundial con los costos y el manejo estructural de los materiales. Se ha comprobado, sin embargo, la existencia de muchos microorganismos involucrados en la formación y degradación de minerales, dando origen a un nuevo campo de estudio como es la biomineralización [1, 2, 3].

El elevado valor de los materiales empleados para la construcción no permite que las personas de escasos recursos económicos puedan acceder a una solución de vivienda [4, 5]. Además, con el esquema actual constructivo y el poco avance en el desarrollo de la industria de la construcción, es imposible reducir el uso de los materiales, así como disminuir el espacio que cada una de estas estructuras ocupa en el área destinada para construir [6]. Esto último se puede ver en las normas ICONTEC, 1992 [7] o en las normas internacionales ASTM, 1987 [8].

El desarrollo biotecnológico en la industria de la construcción es muy nuevo y sólo existen unos pocos antecedentes que fueron los que impulsaron este trabajo. El Grupo de Estudio e Investigaciones sobre medios extremos de la Universidad de París VI, descubrió en 1974 la bacteria calcificante en el interior de la gruta francesa de Arcy-Sur-Cure, donde el equipo de Jean Pierre Adolphe restauró algunas obras de arte del museo del Louvre. Estas bacterias han sido utilizadas en el laboratorio nacional de monumentos históricos de Champs-Sur-Marne, sembrando una gran pared con millones de microorganismos regados con sus nutrientes; en poco tiempo se tejió una espesa pantalla de caliza [3].

También hay un método que evita el desmoronamiento, la pulverización y la descamación de las fachadas de piedra, gracias a un tratamiento 100% natural con base en bacterias. La conta-

minación, el hielo y la intemperie acaban con la piedra calcárea de iglesias y monumentos, para reparar estas viejas fachadas, se emplean películas protectoras de carbonato de calcio; se trata de una biomineralización natural al 100% y sin efectos secundarios indeseables, no produce coloración de la piedra, ni formación de sales residuales, tampoco interfiere en los intercambios gaseosos entre piedra y atmósfera.

El procedimiento llamado “Lifting Bacteriano”, fue experimentado por primera vez en Saint-Medard de Thouars, y dos años después, se efectuaron análisis en el Laboratorio de Investigación de Monumentos Históricos de Champs-Sur-Marne y en el Servicio de Microbiología de la Universidad de Nante, donde se pudo demostrar que la piedra había sido recuperada. Las bacterias calcificantes interfieren directamente precipitando los carbonatos mediante mecanismos difusionales a través de la membrana celular, en los que se produce intercambio de iones. La biomineralización puede utilizarse como tratamiento preventivo para impermeabilizar la piedra o como curativo aumentando la cohesión [5].

El hecho comprobado científicamente de la existencia de bacterias calcificantes y el conocimiento de sus propiedades, fue el punto de partida para buscar una aplicación práctica en la industria de la construcción. La utilización del aditivo biológico en la preparación de hormigones pretende mejorar sus propiedades físico-mecánicas y térmicas como son la resistencia, durabilidad, tamaño de poro y conductividad térmica [6, 9, 10, 11].

Este trabajo de investigación es novedoso ya que se utiliza un aditivo biológico del cual no hay mucha información en el país y de acuerdo con sus propiedades se le dio una utilización diferente y práctica en un tema tan importante como es la ciencia de los materiales. El propósito de este trabajo es determinar la factibilidad técnica de diseñar una mezcla de hormigón, adicionando el aditivo biológico, para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y térmicas [2].

En las últimas décadas el campo del hormigón, armado y pretensado, como material de construcción se ha extendido mucho, así como también las topologías especialmente concebidas. Hoy se construyen en hormigón puentes de grandes luces, estructuras de contención de centrales nucleares, plataformas petrolíferas al lado de la costa, grandes presas, etc. La relevancia social de estas construcciones, medida tanto con base en la peligrosidad potencial de su falla como al alto volumen de inversión que requieren, ha presentado un salto cualitativo en el nivel de exigencia de su control de calidad. Lo anterior muestra la importancia de realizar estudios en búsqueda de mejorar las cualidades y características del hormigón.

Resistencia. La resistencia característica del hormigón es la interpretación estadística de los resultados de ensayos normalizados de probetas de hormigón y considera la dispersión de los mismos. Constituye un dato de control de calidad y su valor se ubica cerca del valor mínimo de la resistencia de la muestra total.

La resistencia mecánica de la pasta de cemento depende fundamentalmente de la cantidad de poros dejados por el exceso de agua indispensable para poder trabajar cualquier hormigón mientras menor sea esta cantidad mayor será la resistencia. En consecuencia, ésta es esencialmente una función de la cantidad de agua y de cemento, convenientemente expresada por el factor agua/cemento. Para lograr una determinada resistencia característica del hormigón se debe adoptar un valor medio de resistencia de acuerdo con la posible dispersión de los resultados de los ensayos, o bien, con base en la desviación normal lograda por el constructor con hormigones y equipos similares [12].

Porosidad en morteros. Se obtiene la información acerca de la geometría del poro y sus características dentro de la sección, los parámetros comúnmente analizados para la geometría del poro son: área, perímetro, diámetro máximo y mínimo, diámetro equivalente, redondez, forma, entre otras; mientras menor sea el número

de poros, mayor será la resistencia del material [13]. *Conductividad térmica.* El hombre siempre ha tenido constancia de los efectos del calor y también las acciones inversas del frío y ha tratado de aprovecharlos en un máximo dependiendo de su conveniencia. Entonces ha ideado diferentes técnicas para el aislamiento de éstos, que no permiten en un gran porcentaje el intercambio de temperatura entre dos ambientes.

Colombia, debido a sus condiciones geográficas, presenta gran variedad de climas; algunas zonas presentan condiciones extremas de calor. Por tanto, la búsqueda de materiales que regulan la temperatura de las viviendas esta directamente asociada con la disminución de los consumos energéticos. La conductividad térmica es un factor importante en el comportamiento de los materiales de construcción [14].

Durabilidad. El ataque de los químicos casi siempre ocurre cuando éstos se hallan en solución puesto que pueden penetrar profundamente en el mortero; la producción de mortero de alta calidad y baja permeabilidad es la primera línea de defensa. El control del agrietamiento es también una importante medida defensiva para limitar la exposición interna del mortero a los químicos agresivos.

El grado en el cual la menor permeabilidad mejora la vida en servicio del mortero en un ambiente de químicos agresivos, depende en gran medida del tipo de químicos y su concentración. El mortero de cemento Pórtland no resiste bien los ácidos. Sin embargo, la velocidad con que estos destruyen el mortero depende de la resistencia a los ácidos y su concentración, la temperatura de la solución de ácido y las condiciones de exposición, soluciones ácidas estáticas o móviles y a la solubilidad de los reactivos [15].

Con este trabajo se logra determinar la factibilidad técnica de diseñar una mezcla de hormigón, adicionando el aditivo biológico no convencional, para mejorar sus propiedades físico-mecánicas y térmicas, por lo que es necesario producir el aditivo biológico utilizando las condiciones

reportadas en la literatura, determinar las mejoras que se producen por la dosis de aditivo biológico sobre la resistencia, porosidad, durabilidad y conductividad térmica del hormigón. Se logran obtener mejoras significativas para la proporción de 30% aditivo biológico.

Metodología

Experimentación

Se produjo el aditivo biológico a partir de un inóculo que posteriormente fue escalado para garantizar la misma cantidad y calidad de aditivo biológico en cada ensayo. Para preparar el biomaterial, se utilizó un diseño de mezcla 1:2,3:3. (1 proporción de cemento, 2,3 de arena y 3 de grava) [16], para un hormigón de 210 kgf/cm² (resistencia utilizada en las estructuras de las edificaciones), la dosificación se obtiene por peso de cada componente. Los datos obtenidos para un metro cúbico de hormigón son: contenido de cemento, 335,48 kg/m³, cantidad de agregado grueso, 1.036,34 kg/m³ (peso seco), cantidad de agregado fino, 771,9 kg/m³, cantidad de agua, 190,35 kg/m³ y asentamiento, 10 cm.

A este diseño de mezcla se le agregó el aditivo biológico en proporciones de 30, 60, 100%; una relación de agua cemento de 0,56: 1. Por último se realizaron las respectivas pruebas al biomaterial las cuales se especifican más adelante.

Producción del aditivo biológico

Se obtuvieron las bacterias calcificantes, *Thiobacillus ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans*, *Desulfovibrio* y *Sulfolobus acidulario* por intermedio del ingeniero Julio César Pérez Ríos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, uno de los investigadores de la tesis de grado “Biolixiviación aplicada a un material aurífero refractario”, muestra tomada en la mina el zancudo, Titiribí (Antioquia) [17].

El medio de cultivo empleado fue el 9 K modificado, pH, 2,5-3,0, temperatura, 25 °C y la aeración necesaria para su crecimiento (no se

cuantificó). Para preparar 1 L de medio de cultivo 9 K modificado se requiere de fosfato de amonio, fosfato ácido dipotásico, sulfato de calcio, cloruro de potasio, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, carbonato de calcio, azufre y cloruro de calcio en cantidades de 3, 0,10, 4,20, 0,10, 0,01, 0,50, 2,5, 0,70 y 2 g/L, respectivamente; 300 mL de sulfato ferroso heptahidratado (solución 14,74% p/v), pH entre 3,0 y 3,6 [18].

Preparación del inóculo. En un agitador orbital se colocaron cuatro erlenmeyers de 500 mL con 225 mL de medio 9 K modificado y 25 mL de inóculo. La carga bacteriana fue analizada mediante tinción de Gram y posterior visualización en el microscopio. Se obtuvo una cantidad de inóculo de 3 L, necesarios para escalar el aditivo a 30 L que era el requerimiento final para las pruebas. El tiempo de reproducción está entre 7 y 10 días, para producir una población equivalente al inóculo, se necesita además de burbujeo y buena agitación.

Cuantificación de biomasa. Para la cuantificación de biomasa se utilizó la técnica de sólidos suspendidos totales [12]. Para realizar la curva de crecimiento del aditivo biológico se utilizaron cuatro erlenmeyers de 500 mL; a cada uno se le adicionaron 225 mL del medio nutritivo (9 K modificado) y 25 mL de inóculo. Los erlenmeyers y el medio se esterilizaron en una autoclave a 15 psi durante 20 min, posteriormente se le adicionó el inóculo a cada uno y se colocaron dentro del agitador orbital con temperatura controlada a 27 ± 2 °C y velocidad de agitación de 190 rev/min.

Biorreactor

Se trabajó con un biorreactor de acrílico con un diseño especial, se le acondicionó un sistema de aireación y agitación. El cultivo se escaló en un reactor tipo tanque agitado con una capacidad de 30 L, a éste se le acondicionó en el fondo una manguera con un núcleo metálico maleable y se enrolló en forma circular, perforada para lograr un suministro constante de aire y mantener homogeneizado el medio y a la vez brindar la aireación

necesaria para el crecimiento de la población microbiana. El tiempo de reproducción está entre 7 y 10 días, para producir una concentración equivalente de inóculo, 0,65 g/L.

Caracterización realizada al biomaterial

Las pruebas más relevantes a la hora de analizar un hormigón y comparar el nuevo material con el estándar existente son: resistencia, porosidad, durabilidad y conductividad térmica. Este trabajo se desarrolló con un modelo experimental aleatorio.

Prueba de resistencia

Vaciado de cilindros. Siguiendo el diseño de mezcla y usando formaletas de 4 x 8 “, se hicieron los cilindros de hormigón, los cuales fueron sometidos a pruebas de compresión (compresómetro Tinius Olsen) para obtener resultados de resistencia del hormigón con el aditivo biológico [19].

Se vaciaron cilindros de hormigón con 30, 60 y 100% de aditivo biológico, 18 cilindros por cada proporción. Se utilizaron 9 cilindros de cada proporción de aditivo biológico por edad (7 y 28 días), para lograr resultados estadísticos significativos.

Los cilindros presentaron las siguientes características: Resistencia del concreto a la compresión, 210 kgf/cm². Para la dosificación 1: 2,3: 3 empleada en el análisis por volumen, de un cilindro no estándar, se necesitaron: cemento (Rioclaro tipo I), 573,50 g, arena para concreto (Áridos de Antioquia), 1.148 g de arena; triturado o agregado grueso (Agregados del Norte), 1.722 g y 418 mL de agua.

Fallado de cilindros. Los cilindros se curaron en cámara húmeda y fueron fallados a compresión a los 7 y 28 días (compresómetro Tinius Olsen), para el fallado fue necesario refrentar los cilindros con yeso para que cada cilindro estuviera nivelado y la presión ejercida por el compresómetro se distribuyera uniformemente.

Prueba de porosimetría

La muestra se pule para ser montada en el microscopio, desde donde se observan los poros en tonos oscuros como el negro y el gris, son muy fáciles de distinguir del resto de la superficie. La cámara de video convierte la imagen del campo del microscopio en una señal electrónica que se envía al computador para efectuar el análisis.

La primera fase que presenta este procedimiento es la digitalización de la señal de la cámara. La segunda fase es la conversión de imagen de escala de grises a una imagen binaria; la imagen resultante de este proceso posee sólo píxeles blancos y negros, dependiendo si el píxel se encuentra o no dentro del rango de niveles elegidos de grises. Por medio de este proceso los poros se identifican solamente por las coordenadas del contorno; estas coordenadas son los primeros datos para el procesamiento que realiza el computador, con los cuales se obtiene la información acerca de la geometría del poro y sus características dentro de la sección.

La última fase del proceso, es la medición de la geometría del polígono que delimita las coordenadas antes halladas. Los parámetros comúnmente analizados para la geometría del poro son: área, perímetro, diámetro máximo y mínimo, diámetro equivalente, redondez, forma, entre otras [13].

Se realizaron 4 secciones pulidas del hormigón a diferentes proporciones de aditivo biológico, es decir, se tomaron pequeños cilindros de hormigón y se pulieron muy finamente con lijas de diferente calibre (150, 320, 600), hasta obtener una superficie lisa para observarla en microscopio metalográfico y compararla con otra a través de imágenes digitales.

Bajo el criterio visual del observador, se usó un microscopio electrónico de alta resolución y el sistema de análisis digital de imágenes Leica Q500; se realizó la inspección de las superficies de las muestras ya pulidas para 30, 60 y 100% de aditivo biológico, a la edad de 28 días.

Pruebas de conductividad térmica

Vaciado de lozas. Estas lozas se utilizaron para las pruebas de conductividad térmica, se fabricaron sobre un marco de madera de dimensiones (30 * 30 * 2 cm) que fuera fácil de desmoldar. En las pruebas de porosimetría y conductividad térmica se necesitó sólo arena y cemento (morteros), para lo cual se utilizó una dosificación de 1: 2,75 según la NTC 220 1992/07/22 segunda revisión [7]. Se utilizaron 8 placas para diferentes proporciones de aditivo y a una sola edad (28 días). Para cada placa se utilizaron 910,35 g de cemento, 2.503,50 g de arena y 288,32 mL de aditivo biológico.

Medición de la conductividad térmica. A los 28 días de curadas las lozas se procedió a realizar los ensayos de conductividad térmica como lo indica la norma ASTM C177-85 [9]. Se requirió una placa generadora de calor que consistía de dos placas de acero de 30 * 30 * 0,03 cm, con resistencia eléctrica en su interior. Un par de intercambiadores de calor permitieron estabilizar la temperatura exterior, hechos cada uno de dos placas de hierro con dimensiones 30 * 30 * 1 cm, con una entrada y una salida de agua.

Pruebas de durabilidad. Los ácidos sulfúrico y nítrico son fuertes y altamente agresivos. La agresividad se incrementa al aumentar la concentración y la temperatura del ácido. Las soluciones móviles son más agresivas que las estáticas, debido a que constantemente nuevo ácido llega a estar en contacto con el mortero. Los ácidos que forman productos solubles reactivos, generalmente son más agresivos que los ácidos que forman productos insolubles [15].

El ácido ataca al mortero disolviendo los productos de hidratación del cemento o a través de reacciones químicas ácido-básicas. El hidróxido de calcio, producto de reacción que se disuelve más rápidamente, es atacado aún por las concentraciones leves o bajas de soluciones de ácido. Los ácidos más fuertes y más concentrados atacan todos los hidratos de silicato de calcio.

En la atmósfera se encuentran diferentes contaminantes en estado gaseoso, como el dióxido de ni-

trógeno, el dióxido de azufre, el gas carbónico, el ozono y el material particulado que al combinarse con el agua lluvia, reaccionan y se convierten en ácidos que posteriormente causan las principales patologías en los materiales de acabados.

Por la razón anterior los morteros utilizados para la elaboración de las lozas se sometieron a la acción de los principales ácidos que afectan al material en nuestro medio; para ello, se consultó el tipo de agente agresor y la cantidad de contaminantes que se encuentran en la atmósfera de Medellín, en el caso de la lluvia ácida. Se realizó un simulacro del fenómeno, aumentando la concentración mil veces más que la real registrando las modificaciones que iban surgiendo [16].

Vaciado de morteros. Se utilizaron marcos de madera con dimensiones 4 * 4 * 2 cm y se necesitaron 24 morteros; las pruebas se realizaron por triplicado.

Obtención de la durabilidad. Se tomaron tres morteros de cada proporción de aditivo biológico; inicialmente se pesó cada mortero; luego se sumergieron en 250 mL de cada ácido (ácido sulfúrico y ácido nítrico) a pH 2, se hizo lectura diaria del pH a cada mortero hasta que éste se estabilizó en el tiempo [13, 15].

Resultados y discusión

Aditivo biológico

Para determinar la cinética de crecimiento se partió de una cepa nativa y la información del medio de cultivo reportada [18]. Sin embargo, el medio en un principio no se comportó de la mejor manera y el aditivo crecía muy lentamente debido a que las bacterias se encontraban esporuladas. Muchas bacterias pueden formar una resistencia o reposo conocida como endóspora, propiedad de los cocos y bacilos.

En la siembra se pudo observar el crecimiento de 4 tipos de colonias de diferentes colores: rojo, amarillo, café claro y blanco; luego se sacó una muestra para visualizarla en el microscopio y se

observaron cocos en la roja; bacilos en la amarilla, cocobacilos en la café claro y una mezcla de las tres en la blanca, todos gramnegativos lo cual corroboró que tenían las características esperadas del aditivo biológico.

El comportamiento cinético fue el esperado; al principio se tuvo una fase de latencia prolongada

de 30 h aproximadamente, este tiempo fue largo debido a la adaptación que tuvo que darse por el consorcio de bacterias. La fase exponencial tuvo una duración de 40 h, a partir de este momento se detuvo el crecimiento bacteriano; en la figura 1 se aprecia la concentración de biomasa que se logró obtener de 0,65 g/L.

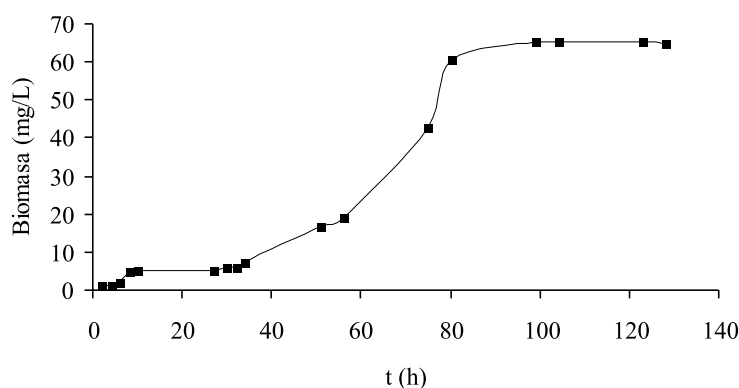


Figura 1 Cinética de crecimiento del aditivo biológico

Caracterización del biomaterial

Resistencia a la compresión

Los factores que influyen en la resistencia de morteros se encuentran muy ligados a la porosidad de la pasta, como son por ejemplo la redondez del poro y la gravedad específica [12, 13]. La resistencia a la compresión de las mezclas con aditivo biológico estuvo por encima de la mezcla patrón, con excepción de la mezcla con 100% del aditivo biológico, como se presenta en la tabla 1. De acuerdo con los resultados obtenidos, la mezcla con 30% del aditivo, a una edad de 7 días, presenta aumento del 17,20%, con respecto a la mezcla patrón. Es razonable suponer que una mezcla de prueba de concreto es homogénea y que cualquier variación entre dos cilindros compañeros, elaborados de una muestra determinada, es ocasionada por la variación en la fabricación, el curado y la prueba.

La mezcla de 60% tuvo resistencia levemente por encima de la muestra patrón; en la mezcla de 100% de aditivo biológico se ve disminución muy grande de la resistencia, hasta 40%, esto se debe a que el pH de la solución es de 4,5, más ácida que el de las mezclas de 30 y 60% que fueron de 6,3 y 5,6 respectivamente y el cemento es de composición alcalina, con pH de 12 a 13, lo que podría comprometer el proceso de cohesión de los coloides del cemento y las reacciones que intervienen en éste. Otra posible razón, es que el sustrato del aditivo biológico pudo haber reaccionado de algún modo.

A los 28 días se obtuvo incremento en la resistencia de los cilindros comparados con los fallados a 7 días, mostrando porcentaje de variación menor, debido a que los cilindros de hormigón, a la edad de 28 días han estabilizado el tiempo de fraguado.

Tabla 1 Resultados de la resistencia a la compresión de morteros de concreto preparados en función de la concentración de aditivo biológico y tiempo de fraguado

<i>Proporción de aditivo biológico</i>	<i>Edad de fallado (días)</i>	<i>Resistencia promedio (MPa)</i>	<i>Desviación estándar (MPa)</i>	<i>Coficiente de varianza (%)</i>
0 %	7	12,10	1,98	16,38
	28	13,02	1,60	12,25
30%	7	14,63	2,11	14,45
	28	15,17	0,85	5,60
60%	7	12,62	1,46	11,60
	28	13,18	1,00	7,59
100%	7	7,29	0,75	10,23
	28	7,99	0,75	9,73

Porosimetría

Al comparar los resultados de los datos obtenidos por el programa poros, se muestra disminución en el porcentaje de poros de todas las mezclas que contienen el aditivo biológico (véase figura 2). La mezcla con 100% del aditivo disminuyó el porcentaje de poros en 38% con respecto a la mezcla patrón, la mezcla con 30% de aditivo disminuyó el porcentaje de poros en 39%, siendo esta la mejor aunque con poco margen de diferencia con la primera. La mezcla con 60% de aditivo biológico así mismo disminuyó el porcentaje de

poros pero en menor proporción, 27%. También se observa en la figura 3 que el diámetro de poro disminuye en las mezclas de 30 y 60% de aditivo biológico, la disminución porcentual del diámetro de poro para el 30% fue de 46% y para el 60% de 22% con respecto al patrón, la mezcla con 30% de aditivo logró la mayor reducción de los diámetros de poro. Hay que destacar que en la mezcla del 100% de aditivo los diámetros de poro aumentaron con respecto al patrón, en 14,37%, aunque no ocurrió lo mismo con los porcentajes de poro; lo que pudo ser debido a la mayor presencia de burbujas de aire en el vaciado.

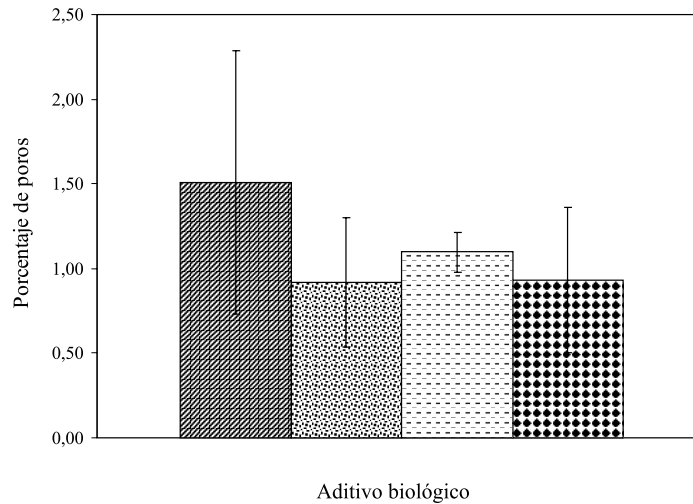


Figura 2 Porcentaje de poros de los morteros con diferentes proporciones de aditivo biológico

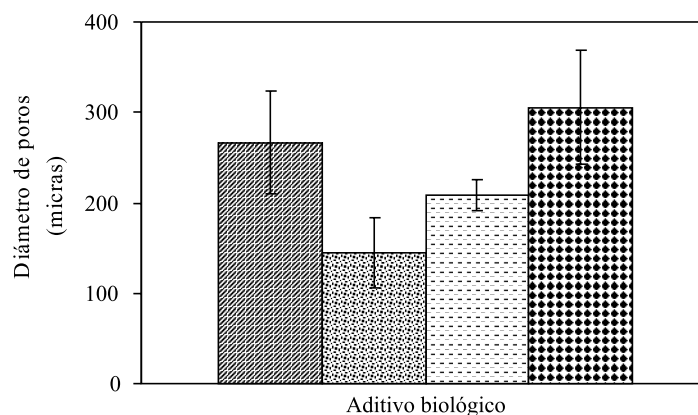


Figura 3 Diámetro de poros de los morteros con diferentes proporciones de aditivo biológico

Conductividad térmica

En todos los morteros que fueron vaciados con el aditivo biológico se obtuvieron conductividades térmicas inferiores al patrón de referencia (véase figura 4). El dato de conductividad térmica $0,76 \text{ W/m K}$, es un valor de referencia para mezcla cemento y agua [21]; el mortero de referencia dio un coeficiente de conductividad térmica de $0,66 \text{ W/m K}$, ya que las lozas fueron vaciadas con cemento, agua y arena, la arena disminuye la conductividad térmica.

La conductividad térmica obtenida con los morteros de 30% es de $0,33 \text{ W/m K}$, fue la menor de todas disminuyendo 50% con respecto a la conductividad térmica de la loza de arena, agua y cemento, que se tomó como patrón. Los morteros con 60% de aditivo biológico presentaron disminución del 33% en la conductividad térmica respecto al patrón y las lozas de 100% disminuyeron 29%.

También se pudo determinar el efecto del coeficiente de conductividad térmica haciendo seguimiento de la temperatura. Se puede observar en las lozas de 30% las temperaturas interiores más altas, es decir que los lados de las lozas que entran en contacto con la placa generadora están más calientes, lo que indica la menor conductividad del calor hacia el otro lado de las lozas. Lo contrario ocurre para las lozas patrón, que

muestran las temperaturas interiores más bajas indicando que son las de mayor conductividad.

El aumento en la conductividad térmica puede estar asociado con la disminución en el diámetro de poro, ya que si los poros son lo suficientemente grandes pueden permitir en su interior, una transferencia de calor por convección natural. Los poros están llenos de aire, el cual es un excelente aislante, otro de los factores que pudo influir en la disminución de la conductividad térmica es que una de las bacterias del aditivo biológico (*Thiobacillus ferrooxidans*) da como subproducto jarosita ($\text{K}_2\text{Fe}_6(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_4$) que tiene propiedades de aislante térmico [21].

Durabilidad

Cambio de pH ante el ataque con ácido sulfúrico y ácido nítrico. El comportamiento de las muestras para ambos ácidos fue similar, como se puede apreciar en las figuras 5 y 6. Se tuvieron cambios de pH apreciables con el tiempo variando desde 2 hasta 10,4. Se manifestó en promedio menor variación de pH en las soluciones que contenían morteros con aditivo biológico, siendo más afectada al ataque ácido la muestra sin aditivo biológico, como se muestra en la figura 5. Las mediciones de los morteros con 100% aditivo biológico, mostraron menor variación del pH indicando mayor resistencia al ataque químico,

tal vez debido a que el aditivo biológico incorporado en esta mezcla era desde el principio el más ácido, influyendo como un ataque químico inicial del aditivo al hormigón. Además, al haber un menor porcentaje de poros en esta mezcla, se evita que la superficie del mortero sea penetrada por los ácidos. Todo lo contrario ocurrió con el mortero de 30% de aditivo, lo cual era de esperarse ya que inicialmente esta mezcla era menos ácida que la del 100%, siendo más vulnerable al ataque químico.

Pérdida de peso ante el ataque de ácido sulfúrico: La probeta más estable fue la que contenía 30% de aditivo biológico, donde la pérdida de peso promedio fue menor (0,320 g). Posiblemente por tener menor diámetro y porcentaje de poros, fue lo que no permitió que los ácidos penetraran en el hormigón haciendo agresión superficial. La varianza y la desviación estándar obtenidos en los datos fueron muy pequeños, lo que da una gran confiabilidad y reproducibilidad de los datos [22].

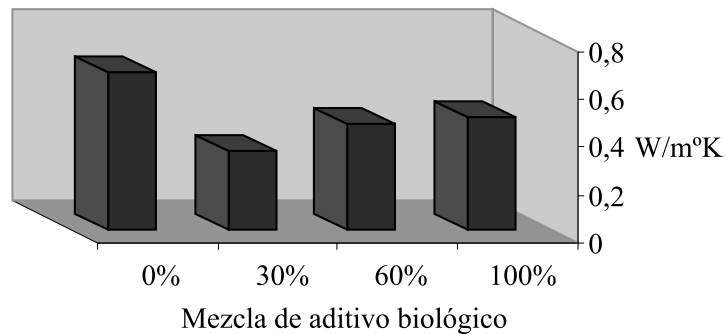


Figura 4 Influencia de las concentraciones de aditivo biológico sobre la conductividad térmica

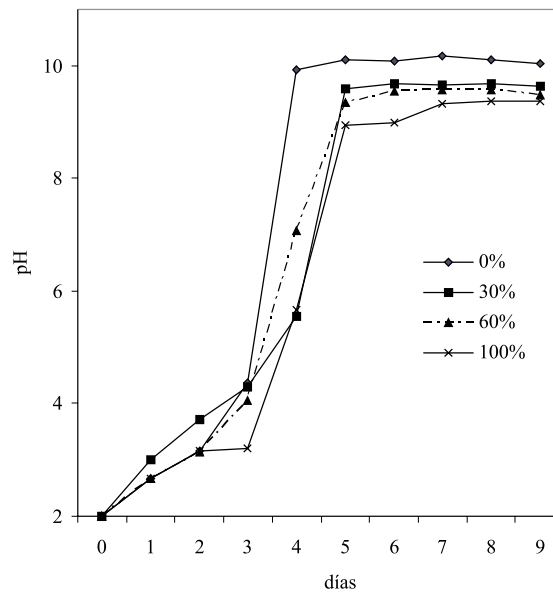


Figura 5 Cambio de pH de los morteros ante el ataque de ácido sulfúrico

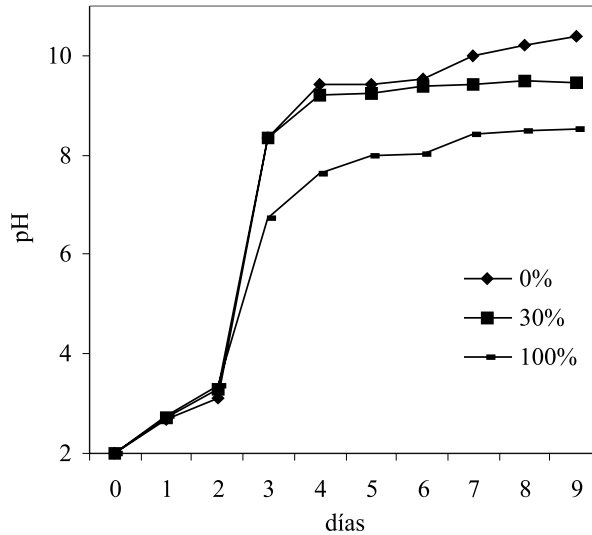


Figura 6 Cambio de pH de los morteros ante el ataque de ácido nítrico

Pérdida de peso ante el ataque de ácido nítrico. Ante este ácido la probeta patrón 0% fue desfavorable, presentando mayor pérdida de peso promedio (0,464 g). La probeta con 30% de aditivo biológico siguió mostrando mejores resultados que el resto de las muestras, perdiendo

0,326 g en promedio, revelándonos su mayor capacidad ante las condiciones adversas. Al igual que con el ataque de ácido sulfúrico, la varianza y la desviación estándar fueron muy bajas, lo que demuestra el grado de control en esta prueba [22].

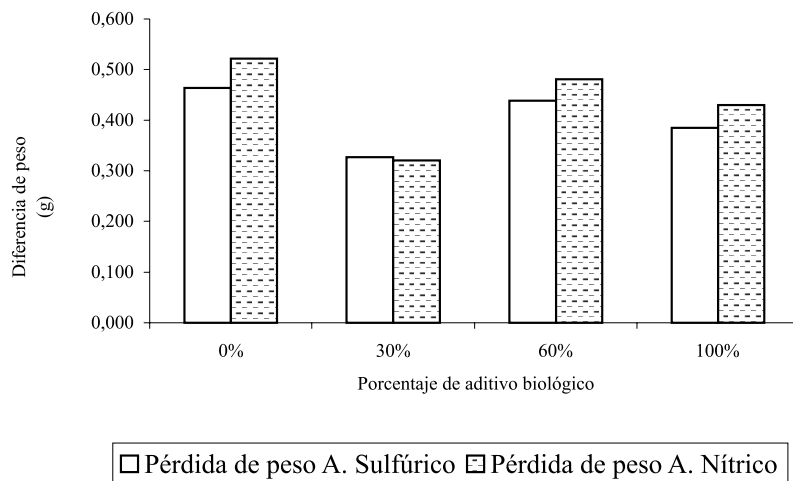


Figura 7 Comparación de la pérdida de peso de los morteros con diferentes proporciones de aditivo biológico ante el ataque de ácido sulfúrico y ácido nítrico

Conclusiones

La dosis de aditivo biológico que condujo a los mejores resultados de resistencia fue la de 30%, aumentando en 17,2%. Los valores obtenidos fueron: $14,63 \pm 2,11$ MPa y $15,17 \pm 0,85$ MPa a los 7 y 28 días respectivamente.

El porcentaje y el diámetro de poros disminuyen en 39 y 46%, respectivamente para 30% de aditivo biológico (0,91% de poros y diámetro de poro de $144,7 \mu\text{m}$).

Todas las muestras con aditivo biológico disminuyeron significativamente el coeficiente de conductividad térmica, siendo la más notable la muestra con 30% de aditivo biológico que la disminuyó en un 50% ($0,33 \text{ W/m K}$). Con la disminución de la conductividad térmica en el hormigón con aditivo biológico, se evita la pérdida o ganancia excesiva de calor, logrando que los espacios sean más confortables.

Ante el ácido nítrico, la probeta patrón fue desfavorable, presentando mayor pérdida de peso promedio ($0,464 \pm 0,012$ g), la probeta con 30% de aditivo biológico presenta mejores resultados, pierde en peso $0,326 \pm 0,028$ g. En las pruebas de durabilidad se obtuvo un mejor comportamiento ante el ataque químico en las muestras con aditivo biológico. Por tal motivo la utilización de este aditivo en la elaboración de materiales de construcción usado en recubrimiento de fachadas, cubiertas, muros exteriores sería de gran importancia para evitar deterioros.

La proporción de 30% aditivo biológico logró mejorar las propiedades físico-mecánicas y térmicas del hormigón de manera significativa.

Agradecimientos

Al personal de los laboratorios de Metalografía y al personal del laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Referencias

1. R. Santhosh K. et al. "Remediation of concrete using micro-organisms". *ACI Materials Journal*. Vol. 98. N.º 1. 2001. pp. 3-9.
2. P. Lanoy. "Bacterias en las rocas". *Revista Muy Interesante*. Vol. 9. N.º 99. 1993. pp. 60-63.
3. F. Lemarchand. "Un 'lifting' bacteriano contra el envejecimiento de las piedras". *Revista Mundo Científico*. Vol. 15. N.º 160. 1995. p. 779.
4. Programa integrado para la mejora de los suburbios, Medellín, Colombia, Germán D. Gómez V. En: <http://habitat.aq.upm.es/dubai/00/bp540.html>. Consultada el 5 de junio de 2005.
5. M. González M., N. Ben O. and M. Arias J. "Biomineralización: revisión de algunos de sus aspectos mas destacados". *Ars Pharmaceutica. Granada*. Vol. 37. N.º 3. 1996. pp. 483-518.
6. Instituto Colombiano de Normas Técnicas. *N.ºs 32, 78, 110, 112, 117, 118, 119, 120, 121, 184, 220, 221, 224, 225, 385, 396, 397, 454, 489, 490, 491, 550, 663, 861, 890, 1.085, 1.299, 1.377, 1.513, 1.977, 4.025*. Bogotá D. C. 1992.
7. American Society for Testing and Materials. *N.ºs C-177, C-217, C-241, C-457, C-642*. Philadelphia. 1987.p.
8. K. Simkiss and K. M. Wilbur. *Biomineralization, cell biology and mineral deposition*. Academic press, Inc. San Diego, California. 1989. p.
9. H. A. Lowenstan and S. Weiner. *Biomineralization*. Oxford University Press. New York. 1989. p. 324.
10. D. Jones and M. J. Wilson. *Biomineralization in crustose lichens*. Clarendon Press Oxford. 1986. pp. 91-105.
11. *Propiedades mecánicas del hormigón*. <http://www.construir.com/CIRSOC/DOCUMENT/datos3.htm>. Consultada el 8 de octubre 2003.
12. J. F. Mesa H. *Caracterización de poros en carbones tratados térmicamente empleando técnicas de procesamiento digital de imágenes y microscopia asistida por computador*. Notas del profesor. Laboratorio de metalografía. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Medellín. 2000.
13. B.V. Karlekar. *Transferencia de Calor*. Madrid. 2.ª ed. McGraw-Hill. 1994. p. 10.
14. G. W. DePuy. "Chapter 26: Chemical Resistance of Concrete". *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM STP 169C. American Society for Testing and Materials. Philadelphia, PA. 1994. pp. 263-281.

15. E. Hincapié Atehortúa y S. Moreno Rojas. *Patologías de las fachadas revestidas en piedra arenisca, esquisto y mármol en la ciudad de Medellín*. Trabajo Dirigido de Grado Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Medellín. 2001. p. 80.
16. O. Giraldo Bolívar. *Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón*. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Medellín. 1993. p. 30.
17. J. C. Pérez R. y Juan F. Ramírez. *Biolixiviación aplicada a un material aurífero refractario*. Trabajo de Grado para optar al título de ingeniero químico. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Facultad de Ingeniería. Medellín. 1998. p. 50.
18. C. R. López. *Características mecánicas del hormigón armado*. En: http://fing.uncu.edu.ar/catedras/archivos/hormigon_i/MATERIALES.pdf. Consultada el 10 de enero de 2002.
19. A. Demain y N. Solomon. "Manual of Industrial Microbiology and Biotechnology". *American Society for Microbiology*. Washington D. C. 1986. pp. 18-20.
20. *Vitrocerámicos*. <http://www.unan.mx/publicaciones/ciencia-unan algoritmo.pdf>. Consultada el 6 de enero de 2003.
21. *Jarosita, Thiobacillus Ferroxidans*. <http://www.unmsm.edu.pe/biology/reunion/7r-bt01.htm>. Consultada el 10 de enero 2002.
22. J. I. Ruiz M. y D. A. Jiménez C. Bio-refuerzo de hormigón. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero químico. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Química. Medellín. 2003. p. 45.