

ESTUDIO DEL GRADO DE DETERIORO DEL HORMIGÓN SIMPLE Y ARMADO EMPLEANDO UNA CÁMARA DE ENVEJECIMIENTO

STUDY OF THE DEGREE OF DETERIORATION OF PLAIN AND
REINFORCED CONCRETE USING AN AGING CHAMBER

Karen Bohórquez¹ & José Luis Piñeiros-Mendoza^{1*}

Recibido: 15 de julio 2020 / Aceptado: 15 de diciembre 2020
DOI: 10.26807/ia.v9i1.176

Palabras clave: cámara de simulación climática, espectrofotometría de absorción atómica, hormigón, técnicas gravimétricas, técnicas volumétricas.

Keywords: atomic absorption spectrophotometry, concrete, climate simulation chamber, gravimetric techniques, volumetric techniques.

RESUMEN

El hormigón es uno de los materiales más usados en el área de construcción. Debido al uso diario de este material se realizó el estudio del envejecimiento

¹ Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Escuela de Ciencias Químicas, Quito–Ecuador (karenpamelabohorquez@outlook.com; *correspondencia: jlpineiros@puce.edu.ec., jlpineiros2014@gmail.com)

del hormigón simple y del hormigón armado para prevenir futuras afectaciones a este tipo de materiales. Se ubicaron muestras de hormigón en una cámara de simulación climática en la que se controlaron las condiciones de humedad, temperatura y radiación de acuerdo a un modelo multivariable de los parámetros mencionados para simular el envejecimiento acelerado de los materiales. De esta manera se logró representar la degradación acelerada que sufrirían los materiales en la ciudad de Quito en 0, 5, 10, 15 y 20 años de exposición ambiental. Se emplearon técnicas gravimétricas, técnicas volumétricas, y la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Todos los resultados obtenidos fueron tabulados y graficados para visualizar su variación y tendencia en función del tiempo de exposición. El análisis más destacado fue el de la humedad, ya que presentó una tendencia de aumento y disminución con valores que varían entre 2,17 % y 3,37 % para el hormigón simple y 1,21 % y 2,32 % en el caso del hormigón armado, lo cual se debe a la evaporación del agua por las temperaturas elevadas. Otro análisis importante fue el equilibrio carbonato-bicarbonato debido al paso de iones hidronio (H^+) que provocó un cambio de pH en el medio, y los óxidos de hierro que variaron significativamente por la presencia de un refuerzo de hierro en el hormigón armado con valores de 2,26 % a 7,23 % con respecto al hormigón simple que presentó valores de 0,89 % a 5,48 %. Se concluyó que sí existieron cambios en la composición química del hormigón simple y del hormigón armado al pasar los años.

ABSTRACT

Concrete is one of the most used materials in the construction area, due to this the aging of plain concrete and reinforced concrete was studied. Concrete samples were located in a climate simulation chamber where humidity, temperature and radiation conditions could be controlled. The analyzes were performed for samples that were subjected to 5, 10, 15 and 20 years. Gravimetric techniques, volumetric techniques and the atomic absorption spectrophotometric technique were used. The most prominent analyzes were moisture, since it presented an increasing and decreasing trend with values that vary between 2.17 % and 3.37 % for simple concrete and 1.21 % and 2.32 % in the case of reinforced con-

crete. This is due to the evaporation of water due to high temperatures. Another important analysis was the carbonate-bicarbonate balance due to the passage of hydronium ions (H^+) that caused a change in pH in the medium, and iron oxides that varied significantly due to the presence of an iron reinforcement in the reinforced concrete with values from 2.26 % to 7.23 % with respect to simple concrete, which presented values from 0.89 % to 5.48 %. It was concluded that there were changes in the chemical composition of plain concrete and reinforced concrete over the years.

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad, el material de construcción que se utilizaba era el cemento en bruto, el cual era hecho por la trituración y quema de yeso o piedra caliza. Cuando se agregaron arena y agua a estos cementos se convirtieron en mortero, que era un material similar al yeso, y era usado para adherir piedras entre sí. Durante miles de años el hormigón fue mejorando, se combinó con otros materiales y, en última instancia, se transformó en el hormigón moderno (Gromicko, N., et al, 2016).

El hormigón empleado en construcción está conformado principalmente de cemento, agregados gruesos y fi-

nos de piedra, arena y agua. En el momento de su amasado se pueden añadir otros productos o materiales para mejorar alguna de sus características determinadas (Nistal, 2012).

El hormigón es considerado uno de los materiales más usados en el área de construcción por ser un sólido compacto, denso y poroso (Arredondo, 1972). Para preservar las estructuras hechas a base de hormigón es necesario estudiar el deterioro químico y físico que sufren debido a las variables atmosféricas. Con esta información se pueden evitar futuras grietas o rupturas en este tipo de materiales de construcción.

El término envejecimiento hace referencia para cambios en el desempeño de los materiales con el pasar del tiempo. El envejecimiento acelerado simula las variaciones del clima a las que están sometidas las diferentes muestras de materiales de construcción en un periodo de tiempo determinado (Pazos, 2018). El envejecimiento artificial trata de reproducir el clima de una zona, en condiciones controladas, para analizar lo que le sucede a un material en función del tiempo.

En un estudio se evaluó la influencia de la atmósfera de la ciudad de Esmeraldas en cuatro sistemas de pintura de poliuretano formulados con pigmentos amarillos de cromo. Se realizaron ensayos acelerados para reproducir la degradación medioambiental de las pinturas. Los estudios acelerados en una cámara de arco de Xenón reprodujeron la degradación de pinturas en la intemperie y se pudo determinar que la radiación UV es la principal causa de degradación en las pinturas (Chico, 2012).

METODOLOGÍA

Se tomaron 5 cilindros hechos de hormigón simple y 5 de hormigón armado de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro cada uno, estos fueron obtenidos en el marco del proyecto “Definición de los principales impactos ambientales generados por el cambio climático que afectarían los materiales de construcción en proyectos de Ingeniería Civil, aplicación piloto en la ciudad de Quito, Ecuador” el cual fue realizado en la Facultad de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (Pazos, 2018).

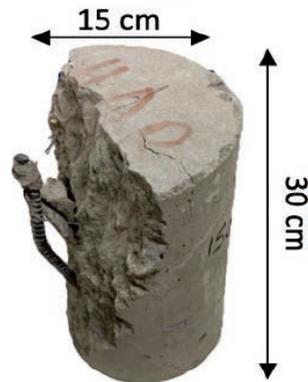


Figura 1. Muestra de cilindro de hormigón armado

Se empleó una cámara de simulación climática BIOBASE BJPX-A450 en la cual se realizaron variaciones de pa-

rámetros climáticos en lapsos de tiempos definidos. La cámara cuenta con un humidificador ultrasónico YADU. El control climático dio resultados en periodos de tiempo cortos ya que 5 años simulados equivalen a 19,25 días, y se realizó la investigación hasta simular 20 años (Pazos, 2018). Se procede en base a ciclos, cada ciclo está conformado de subrutinas en las que se simulan valores de humedad, temperatura, radiación y tiempo deseado.

El ciclo está conformado por tres subrutinas con temperaturas y humedades constantes durante un periodo de tiempo. En la primera subrutina la cámara de envejecimiento se encuentra a 25 °C, con humedad relativa de 70 % por 1200 minutos; en la segunda subrutina la temperatura aumenta a 35 °C con humedad relativa de 50 % por 800 minutos; y la última subrutina a una temperatura de 20 °C con humedad de 50 % por 1250 minutos (Pazos, 2018).

La programación multivariables fue desarrollada mediante un programa SOLVER para visualizar la interrelación de las variables climáticas cuando una de ellas es modificada

en un ambiente controlado. El SOLVER registra valores históricos de las variables climáticas (radiación solar, temperatura, Heliofanía y partículas menores a 2,5 mm) y mediante fórmulas establecidas genera los posibles valores proyectados en el tiempo. El software tiene como referencias datos de tres estaciones del INHAMI y del Municipio de Quito con la estación del Camal, Belisario y Carapungo. Se escogieron estas estaciones debido a la confiabilidad y cantidad que proporcionaban los datos (Alarcón, 2017).

Las muestras de hormigón simple y hormigón armado tenían forma cilíndrica, se fragmentaron con una lima de metal y se procedió a pulverizar las muestras usando un molino de bolas, luego se las homogenizó y cuartearon manualmente con el fin de tener resultados representativos, se las etiquetó y finalmente se las guardó en tubos cónicos Falcon en un lugar seco y fresco. Los análisis fueron realizados por triplicado para cada parámetro.

Los análisis realizados fueron: humedad (secado en estufa Memmert Modelo SM 200), silicatos (ASTM

C144-07-06), óxido de hierro (ASTM C114-07-15), óxido de calcio (ASTM C114-07-13), óxido de magnesio (ASTM C114-07-14). En el caso de las determinaciones volumétricas se realizaron carbonatos y bicarbonatos por medio del método de Vogel. Finalmente, se empleó un Espectrofotómetro de Absorción Perkin Elmer, AAnalyst 400, para la identificación y cuantificación de los siguientes ca-

lones: hierro, sodio, potasio, calcio y magnesio. Para la realización de las curvas de calibración se utilizaron las pipetas de 10-100 μL CAPP, 100-1000 μL Pipette, y de 1-5 mL CAPP y, los estándares empleados fueron de 1000 $\mu\text{g/mL}$ marca AccuStandard, Inc. Adicionalmente se realizaron muestras por triplicado para asegurar resultados.

RESULTADOS

Con los resultados de los estudios, se graficaron las líneas de tendencia entre los parámetros analizados y el tiempo de exposición simulado en la cámara de simulación climática, adicionalmente se aplicó la prueba estadística ANOVA (análisis de varianza con un factor) para así poder determinar si existían diferencias significativas entre los promedios de concentración de cada componente en cada clase de hormigón y en los diferentes tiempos de envejecimiento. La hipótesis nula estableció que el promedio del porcentaje o concentración de determinado componente no varía significativamente con el paso del tiempo, mientras que la hipótesis alternativa estableció que el valor del

promedio del porcentaje o concentración de determinado componente sí varía significativamente con el paso del tiempo.

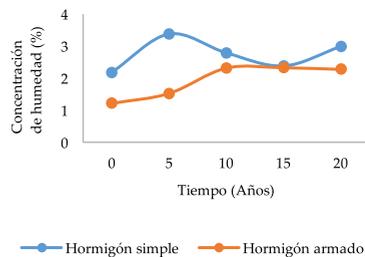


Figura 2. Líneas de tendencia de los resultados de humedad

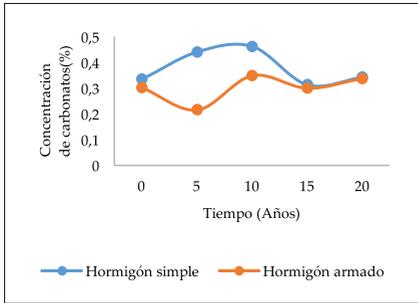


Figura 3. Líneas de tendencia de los resultados de carbonatos

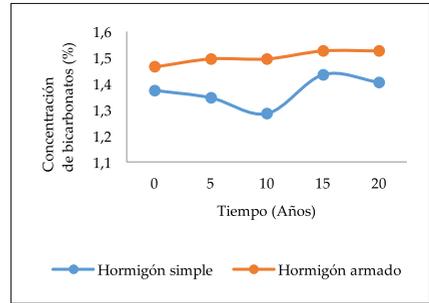


Figura 4. Líneas de tendencia de los resultados de bicarbonatos

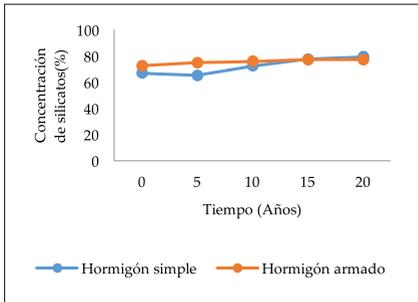


Figura 5. Líneas de tendencia de los resultados de silicatos

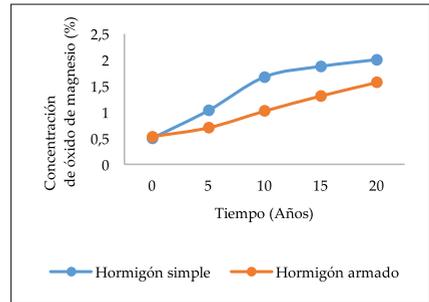


Figura 6. Líneas de tendencia de los resultados de óxido de hierro

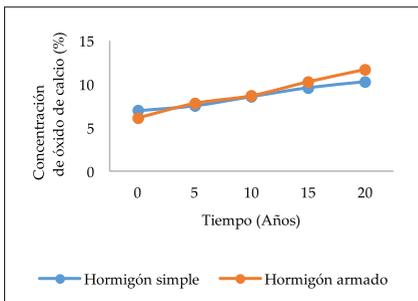


Figura 7. Líneas de tendencia de los resultados de óxido de calcio

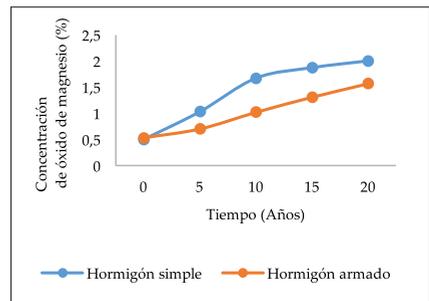


Figura 8. Líneas de tendencia de los resultados de óxido de magnesio

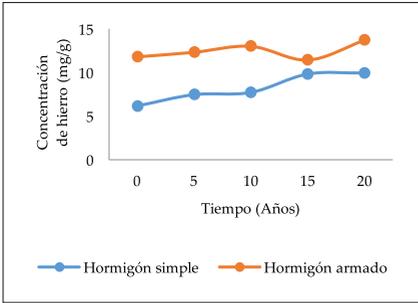


Figura 9. Líneas de tendencia de los resultados de hierro

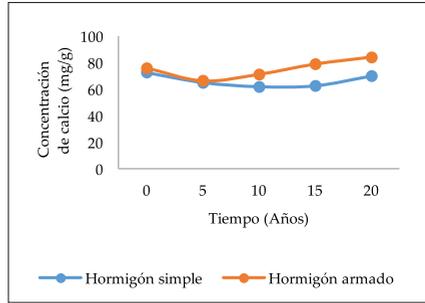


Figura 10. Líneas de tendencia de los resultados de calcio

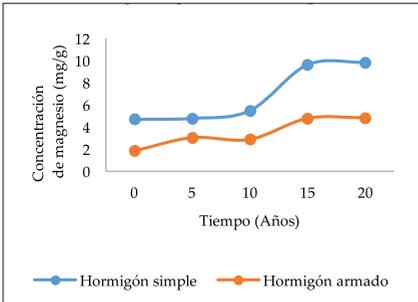


Figura 11. Líneas de tendencia de los resultados de magnesio

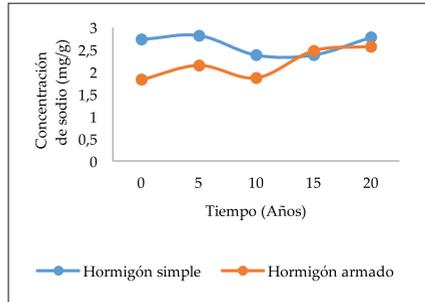


Figura 12. Líneas de tendencia de los resultados de sodio

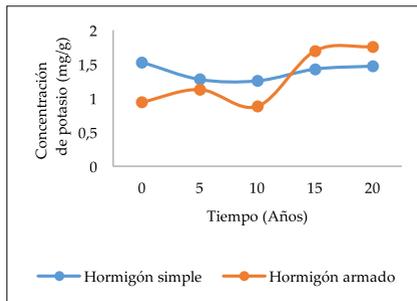


Figura 13. Líneas de tendencia de los resultados de potasio

DISCUSIÓN

Para reproducir y acelerar las condiciones climáticas de un material determinado se necesita un software que pueda relacionar matemáticamente cada variable; además, se requiere un gran número de datos meteorológicos obtenidos a lo largo de los años para desarrollar predicciones. Esta investigación exploratoria se pudo realizar gracias a los datos de tres estaciones meteorológicas: Carapungo, Belisario y El Camal, adicionalmente por el uso del software SOLVER.

Para una mayor comprensión, a continuación se analizarán las tendencias de variación de cada parámetro en ambos tipos de hormigones.

Humedad

El contenido de humedad es uno de los parámetros más importantes con respecto al comportamiento del hormigón simple y armado. Se expresa en porcentaje, y se realiza en la mayoría de los hormigones por la determinación de la pérdida de masa que sufre el material cuando se somete a una combinación tiempo-temperatura adecuada.

Se utilizó un humidificador ultrasónico que provocaba vapor de agua dentro de la cámara de simulación climática. Al estar los hormigones sometidos a estas condiciones se esperaba un aumento en el porcentaje de agua en las muestras. Y en efecto, como se puede observar en la Figura 2, hay valores que variaron entre 2,17 % y 3,37 %, para el hormigón simple y 1,21 % y 2,32 % en el caso del hormigón armado. Hay un crecimiento en los primeros 10 años ya que la alta temperatura y radiación pudieron provocar la evaporación del agua absorbida, esta pérdida de humedad pudo haber ocasionado crecimiento de poros y rupturas. En los siguientes años pudo existir una reintroducción capilar, y se puede decir que este crecimiento continuará debido a que el hormigón es un material poroso que almacena agua y el aumento tiene que llegar hasta saturación. Se debe tomar en cuenta que la radiación y la temperatura elevada son las causantes de la evaporación del agua ocluida en los hormigones; esto puede provocar el crecimiento de poros y rupturas (Joisel, 1981).

Carbonatos y Bicarbonatos

Para la determinación se empleó el método de Vogel, en el cual se debe calcular la alcalinidad total y la cantidad de bicarbonatos, luego por la diferencia de ambos se obtiene el contenido de carbonatos. Como se puede observar en la Figura 3, los valores obtenidos para carbonatos varían entre 0,31 % y 0,46 % en el caso del hormigón simple, mientras que para el hormigón armado en la Figura 4 los valores varían entre 0,22 % y 0,35 %. Los valores para bicarbonatos aumentaron en comparación con los valores de carbonatos, los porcentajes obtenidos para el hormigón simple fueron entre 1,40 % y 1,28 %, y los porcentajes para las muestras de hormigón armado variaron entre 1,52 % y 1,46 %. En la Figura 3 se puede observar que para estos aniones se tienen diferentes tendencias. En el carbonato se visualiza una disminución a partir del año 10 y, debido a esto, el análisis estadístico ANOVA muestra que no existen diferencias significativas a medida que pasa el tiempo. En cuanto a los bicarbonatos, éstos aumentan de manera imperceptible en cada año para el hormigón armado; en el caso del hormigón simple también tiene una

tendencia de aumento a excepción del año 10 en el que se disminuyó muy poco y, por esta razón, el análisis estadístico ANOVA no considera que haya diferencias significativas importantes con el pasar de los años en las muestras de hormigón simple y hormigón armado.

Al tener una disminución de carbonatos y un aumento de bicarbonatos se puede interpretar que hubo un cambio en el pH del medio. Esto ocurre debido a que los iones hidronio (H^+) se impregnaron al hormigón por la absorción del dióxido de carbono y, al juntarse con la humedad, se puede solubilizar y formar el ácido carbónico (Mook, 2002). El ácido carbónico libera iones hidronio y iones bicarbonato, y es así que se obtiene la formación de más bicarbonatos.

Silicatos

En el área de las construcciones, la presencia de silicatos se atribuye a los cuarzos y feldespatos que provienen de los materiales de partida. Cabe mencionar que aumentan la calidad y estabilidad en ladrillos y cementos (De Castrillo, 2017). Los resultados expresados en la Figura 5

indican que los valores para el hormigón simple varían entre 66,81 % y 79,32 %, mientras que para el hormigón armado están entre 72,54 % y 77,31 %, usando el método gravimétrico por precipitación. Los datos obtenidos para cada año se mantienen constantes debido a que los hormigones presentan gran resistencia en presencia de elevadas temperaturas y de radiación. Los silicatos tienen un gran impacto en la composición de los hormigones, así que cualquier tipo de variación puede afectar de manera significativa el porcentaje de los demás componentes. Debido a esto, el análisis estadístico ANOVA indicó que sí hay diferencias significativas en el transcurso del envejecimiento.

Óxido de Hierro

En la Figura 6 se puede observar que los valores obtenidos para el hormigón simple van de 0,89 % a 5,48 % y tiende a incrementar a medida que pasan los años. En cambio, los valores que se obtuvieron para el hormigón armado fueron de 2,26 % a 7,23 % y, de igual forma, la línea de tendencia sube al transcurrir los años. Se observa el incremento de óxido de hierro en el caso del hor-

migón armado debido a que posee un refuerzo de acero. Se debe tomar en cuenta que dicha ganancia es considerable y por esto se obtuvo diferencias significativas para los dos tipos de muestras. Es importante mencionar que la pérdida de óxidos de hierro puede ocasionar una disminución en la resistencia y dureza del hormigón; esto ocurre debido a que óxido férrico se encuentra en ocasiones en polvo, al tener partículas tan pequeñas se pueden dispersar en el aire (Kozicki, 2019).

Óxido de Calcio

En la determinación de óxido de calcio la precipitación del calcio ocurre como oxalato distribuido como ácido oxálico $H_2C_2O_4$ y oxalato monobásico $HC_2O_2^{2-}$ que saturan total o parcialmente al anion oxalato y al aumentar el pH neutralizan lentamente el ácido y su especie monobásica hasta alcanzar la especie precipitante, oxalato (C_2O_4), en su máxima concentración y mínima solubilidad de la sal (Brown, 1977). En la Figura 7 se observan los porcentajes de óxido de calcio en el hormigón simple que van entre los valores de 6,96 % y 10,26 %, y se puede visualizar una tendencia en aumento. En el

caso del hormigón armado los valores varían entre 6,13 % y 11,67 %. Se puede visualizar en la Figura 7 que el hormigón armado posee más cantidad de óxido de calcio en relación con el hormigón simple; esto puede ocurrir debido a que este óxido también se presenta en forma de polvo y se puede dispersar. En el análisis estadístico ANOVA se observa que sí existió diferencia significativa.

Óxido de Magnesio

Se analizó el óxido de magnesio, el cual precipita como pirofosfato, y el óxido se determina por cálculos estequiométricos. Los porcentajes obtenidos se presentan en la Figura 8, los valores para el hormigón simple varían entre 0,50 % y 2,00 % y para el hormigón armado 0,53 % y 1,53 %. Los resultados a medida que pasan los años difieren debido a pérdidas en el precipitado o en la filtración. El óxido de magnesio en presencia de humedad puede formar el hidróxido de magnesio y éste puede absorber dióxido de carbono; esto puede explicar el porqué de la diferencia entre los datos obtenidos. Otro motivo por el cual los valores son distintos entre sí es el error experimental al no remover totalmente las interfe-

rencias provenientes de los óxidos de hierro y de calcio.

Metales

Finalmente, se analizaron los cationes empleando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Se confirmó que es una técnica que utiliza la mínima cantidad de reactivos y los análisis se realizan en menos tiempo.

Se realizaron curvas de calibración para las cuales se utilizaron estándares con certificados confiables. Los análisis se hicieron por triplicado para obtener resultados que permitan estimar su precisión. Se obtuvieron coeficientes de correlación próximos a 1, en el caso del hierro fue de 0,9998, en el calcio fue de 0,9979, en el magnesio fue de 0,9906, en el sodio fue de 0,9994 y en el potasio 0,9964. Esto significa que se pudo comprobar que la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las muestras, cumpliéndose así la Ley de Lambert Beer. Una vez obtenidas las funciones lineales se pudo determinar la concentración de las muestras de hormigón simple y hormigón armado.

En el caso de las curvas y muestras de calcio y magnesio se utilizó óxido de lantano para eliminar interferencias de ionización. Para las curvas de sodio y potasio se añadió cloruro de cesio con el mismo fin de descartar interferencias. Los análisis de hierro, calcio y magnesio, como se visualiza en las Figuras 9-11, tienen tendencias muy parecidas a los análisis gravimétricos ya que estos cationes pueden haber estado en forma de óxido. Se

puede explicar que el hierro como óxido se presenta en forma de polvo y se puede desprender con facilidad. En el caso del sodio y del potasio solo se realizaron análisis espectrofotométricos, ambos valores se mantienen en su mayoría constantes, como se observa en las Figuras 12 y 13. Los cationes se pudieron haber encontrado en forma de óxidos o cloruros, los cuales tienen bastante afinidad con el agua.

CONCLUSIÓN

Las condiciones climáticas a las que se vieron expuestas las muestras de hormigón armado y hormigón simple tienen una incidencia directa en el deterioro de estas.

De los resultados obtenidos se observa que sí hay un impacto en los análisis, ya que los factores climáticos llegaron a producir cambios en la composición química.

Se identificaron las afectaciones que sufrieron tanto el hormigón simple como el hormigón armado por medio del uso de una cámara de simulación climática que brindó resultados cercanos a la realidad. Entre los

cambios más importantes es preciso mencionar el aumento y disminución del porcentaje de humedad con valores que variaron entre 2,17 % y 3,37 %, para el hormigón simple y 1,21 % y 2,32 % en el caso del hormigón armado. El desplazamiento del equilibrio carbonato-bicarbonato. Y el aumento de óxido de hierro con valores entre 2,26 % a 7,23 % en las muestras de hormigón armado en comparación con el hormigón simple con variaciones de 0,89 % a 5,48 %. Por medio de los análisis gravimétricos, volumétricos y espectrofotométricos se pudo determinar que el envejecimiento del hormigón simple varió de una manera imperceptible

en la mayoría de parámetros analizados con respecto al hormigón armado. El análisis que más variación tuvo fue el del óxido de hierro debido a la presencia de un refuerzo de hierro en el hormigón armado.

Se logró comparar el comportamiento de ambos hormigones, para

esto se observó que el hormigón simple sufre menos variaciones en su composición química a medida que pasan los años. Con los valores experimentales obtenidos en las muestras de hormigón simple se pudo observar que, en la mayoría de los análisis, se reportaron porcentajes menores en comparación al hormigón armado.

LISTA DE REFERENCIAS

- Arredondo, F. (1972). Estudio de materiales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. Madrid.
- Alarcón, J. Análisis, diseño y desarrollo de un Solver para variables climáticas. Undergraduate Thesis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador; Quito, Ecuador, (2017).
- Brown, G., Salle, E. (1977). Química Cuantitativa. Editorial Reverté. Barcelona-España.
- Chico, A. Estudio del comportamiento de sistemas de pinturas automotriz de base poliuretano en las condiciones atmosféricas de la ciudad de Esmeraldas (2012). Escuela Politécnica Nacional. Tesis de pregrado. Quito – Ecuador.
- De Castrillo, M. C., Philokyrou, M., & Ioannou, I. (2017). Comparison of adobes from pre-history to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports*, Volumen (12), Pp. 437-448
- Gromicko, N., & Shepard, K. The History of Concrete. International Association of Certified Home Inspectors.

- Joisel, A. (1981). *Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios*. Editores Técnicos Asociados, S. A. Quinta Edición. Barcelona – España.
- Kozicki, C. & Carlson, C. (2019). *Granulating Iron Oxide Pigments For Use in Concrete*. FEECO INTERNATIONAL, Recuperado de: <https://feeco.com/granulating-iron-oxide-pigments-for-use-in-concrete/>
- Mook, W. (2002). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Instituto Geológico y Minero de España, Primera edición. Madrid-España.
- Nistal, A., Retana, M., & Ruiz, T. (2012). El Hormigón: Historia, Antecedentes en obras, y factores indicativos de su resistencia. *Tecnología y Desarrollo*, 12(2), 3-16.
- Guillem de Vera, A. (2000). *Ingreso de cloruros en hormigón. Métodos de análisis, detección no destructiva y modelización del transporte tras un aporte inicial limitado* (Tesis Doctoral). Universidad de Alicante. España.
- Gutiérrez de López, L. (1983). *Análisis de las características de los agregados para concretos y morteros en Manizales*. Universidad Nacional de Colombia. Colombia Sciences and Space Research. Proceedings of the Open Meeting of the Working Group on Space Biology of the Twenty-First Plenary Meeting of COSPAR, Innsbruck, Austria.
- Pazos, C. (2018). *Determinación del grado de deterioro producido por la acción del clima en diferentes materiales de construcción utilizados en edificaciones de la ciudad de Quito*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Tesis de pregrado. Quito – Ecuador.