

Monitoreo de hormigón estado fresco: aplicación de sensores de bajo coste

Rocío Porras Soriano^a, Zhenquan Liu^b, Behnam Mobaraki^c y Fidel Lozano Galant^d

^a Dra. Ing. Caminos, Canales y Puertos. Profesora Contratado Doctor. Universidad de Castilla-La Mancha. Rocio.Porras@uclm.es

^b Ing. Caminos, Canales y Puertos. ESTEYCO S.A. Ingeniera. zhenquan.liu@hotmail.com

^c Dr. Ing. Civil. Universidad Internacional de Cataluña. Profesor Ayudante Doctor. bmobaraki@uic.es

^d Dr. Arquitecto. Profesor Ayudante. Universidad de Castilla-La Mancha. Fidel.LozanoGalant@uclm.es

RESUMEN

El hormigón en su estado fresco presenta propiedades críticas que afectan su rendimiento a largo plazo, como la consistencia, trabajabilidad y compactabilidad. Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de diversos sensores para medir estas propiedades, desde los más simples basados en resistencia eléctrica hasta los más avanzados como los ultrasónicos. Este estudio analiza la implementación de sensores económicos en elementos de hormigón, utilizando un sistema inalámbrico basado en Arduino para medir temperatura y humedad. Los resultados preliminares indican que el sistema puede mejorar la eficiencia de producción y la calidad de los elementos prefabricados.

ABSTRACT

Fresh concrete exhibits critical properties that affect its long-term performance, such as consistency, workability, and compactability. Technological advancements have enabled the development of various sensors to measure these properties, ranging from simple ones based on electrical resistance to more advanced ones like ultrasonic sensors. This study analyzes the implementation of low-cost sensors in concrete elements, using a wireless system based on Arduino to measure temperature and humidity. Preliminary results indicate that the system can improve production efficiency and the quality of prefabricated elements.

PALABRAS CLAVE: hormigón fresco, sensores de bajo coste, Arduino, temperatura, humedad, monitoreo inalámbrico, calidad del hormigón

KEYWORDS: fresh concrete, low-cost sensors, Arduino, temperature, humidity, wireless monitoring, concrete quality

1. Introducción

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción debido a su versatilidad, resistencia y durabilidad. Sin embargo, durante su estado fresco, el hormigón es susceptible a diversos factores ambientales que pueden afectar sus propiedades y, en consecuencia, su rendimiento a largo plazo. Entre estos factores se encuentran la temperatura, la humedad, el viento y la radiación solar, los cuales influyen en el proceso de

hidratación del cemento, afectando la producción de calor, el aumento de la resistencia y la estabilidad del material [1].

En su estado fresco, el hormigón presenta propiedades críticas como la consistencia, la trabajabilidad, la estabilidad del agregado y la compactabilidad, que son determinantes para su desempeño futuro. Investigaciones previas han explorado diferentes diseños de mezclas para mejorar estas

propiedades [2]. La medición precisa y en tiempo real de estas propiedades es posible gracias al uso de una variedad de sensores [3,4], lo que permite realizar ajustes para optimizar la calidad del producto final [5].

A lo largo de las últimas décadas, la tecnología de sensores para monitorear las propiedades del hormigón fresco y endurecido ha avanzado significativamente. Las primeras tecnologías, como los sensores basados en resistencia eléctrica [6,7], sentaron las bases para métodos más sofisticados, incluidos los sensores de ultrasonido y electromagnéticos [8-10]. Más recientemente, se han desarrollado sistemas avanzados de sensores, como los de fibra óptica [11], piezoeléctricos [12] y magnetostrictivos [13], que permiten mediciones precisas de parámetros como la tensión, la deformación, las grietas y la temperatura. Entre estos, los sensores piezoeléctricos se destacan por su sensibilidad y versatilidad en el monitoreo de la salud estructural [14].

Estudios innovadores han explorado aplicaciones como los sensores de nanotubos de carbono basados en cemento para la identificación de frecuencia natural [15] y los sensores piezoeléctricos inteligentes para el monitoreo mecánico [16]. Además, se ha realizado una revisión exhaustiva sobre las propiedades piezoresistivas de los sensores basados en cemento, destacando la importancia del contenido de conductor y los métodos de fabricación [17]. Las capacidades multifuncionales de estos sensores subrayan su potencial para detectar tensiones, deformación, grietas, temperatura y humedad, esenciales para evaluar el rendimiento y la durabilidad de las estructuras de hormigón [18].

La integración de métodos avanzados de análisis de datos, como el Internet de las Cosas (IoT), el aprendizaje automático y la inteligencia artificial, ha mejorado aún más la capacidad de predecir y optimizar el rendimiento del hormigón. Estas técnicas permiten el procesamiento de datos en tiempo real y el

reconocimiento de patrones, mejorando la toma de decisiones en la construcción [19-21].

A pesar de estos avances, persisten desafíos significativos. El alto coste de los sensores especializados y de alta precisión, junto con su durabilidad en entornos de construcción adversos, limita su adopción generalizada [22]. Sin embargo, los esfuerzos para desarrollar alternativas de bajo coste y fiables han mostrado promesa. Por ejemplo, los sensores de bajo coste integrados con protocolos de comunicación Bluetooth han demostrado ser efectivos en el monitoreo en tiempo real de la resistencia del hormigón, reduciendo tanto los costes como el consumo de energía [23]. Además, el uso de microcontroladores y sensores asequibles se ha demostrado en aplicaciones como el curado del hormigón [24], la detección de corrosión [25] y el monitoreo de parámetros térmicos [26].

En este contexto, el presente estudio propone un sistema de monitoreo inalámbrico y rentable utilizando microcontroladores Arduino. Este sistema está diseñado para rastrear parámetros clave como la temperatura y la humedad en el hormigón autocompactante de edad temprana, con el objetivo específico de mejorar la eficiencia y la calidad de los elementos de hormigón prefabricado, particularmente en entornos de producción desafiantes. El sistema se centra en el monitoreo de estos parámetros críticos para proporcionar información sobre la evolución y madurez del hormigón durante el proceso de curado.

2. Sensores de bajo coste empleados y sistema de recopilación de datos.

Para evaluar la viabilidad de utilizar sensores de bajo coste en el monitoreo del hormigón fresco, se llevaron a cabo una serie de ensayos experimentales. Estos ensayos se centraron en medir parámetros críticos como la temperatura y la humedad, utilizando sensores económicos y un sistema de recopilación de datos basado en la plataforma Arduino. A continuación, se

describen los sensores empleados y el sistema de recopilación de datos implementado para estos ensayos.

2.1 Sensores Empleados

Para llevar a cabo los ensayos, se seleccionaron sensores de bajo coste que permitieran medir parámetros críticos del hormigón fresco, como la temperatura y la humedad. Los sensores empleados fueron:

- **Sensor de Temperatura DS18B20:** Este sensor es ampliamente utilizado debido a su precisión y facilidad de uso. Permite medir temperaturas en un rango de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$ con una precisión de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. El DS18B20 es un sensor digital que se comunica mediante el protocolo 1-Wire, lo que facilita su integración con microcontroladores como Arduino.

- **Sensor de Humedad Soil Moisture v1.2:** Este sensor está diseñado para medir la humedad del suelo, pero se adapta bien a la medición de la humedad en el hormigón fresco. Consiste en una sonda que se inserta en el material y un módulo de control que procesa la señal. La sonda mide la humedad en un rango de 0 a 100%, proporcionando una salida analógica que puede ser leída por un microcontrolador.

- **Módulo de Reloj en Tiempo Real (RTC):** Se utilizó un módulo RTC para registrar la marca temporal de los datos recopilados. Este módulo asegura que cada medición de temperatura y humedad esté asociada con una hora y fecha precisas, lo que es crucial para el análisis temporal de los datos.

- **Módulo Bluetooth HC-05:** Para la transferencia de datos entre la placa Arduino y un PC, se empleó el módulo Bluetooth HC-05. Este módulo permite la comunicación inalámbrica, facilitando la recopilación de datos en tiempo real sin necesidad de conexiones físicas.

2.2 Sistema de Recopilación de Datos

El sistema de recopilación de datos se diseñó utilizando la placa microcontroladora Arduino, que actúa como el núcleo del sistema. A continuación, se describen los componentes y su configuración:

- **Conexión de Sensores:** Los sensores de temperatura DS18B20 y los sensores de humedad Soil Moisture v1.2 se conectaron a la placa Arduino mediante cables. Los sensores de temperatura se conectaron a través del protocolo 1-Wire, mientras que los sensores de humedad se conectaron a las entradas analógicas de la placa.

- **Calibración de Sensores:** Cada sensor se sometió a un proceso de calibración capacitiva para asegurar la precisión de las mediciones. Se tomaron muestras iniciales para determinar la colocación óptima de los sensores en las probetas de ensayo.

- **Impermeabilización de Sensores:** Dado que los sensores de humedad están expuestos a diversos agentes atmosféricos, se realizaron tres pruebas de impermeabilización: con adhesivo de silicona de uso general, con adhesivo de silicona neutra y con tubo de PVC y adhesivo de silicona neutra. La efectividad de estas pruebas se evaluó comparando los datos de medición obtenidos de los sensores sin y con impermeabilización.

- **Transmisión de Datos:** Las mediciones tomadas por los sensores incrustados se transmitieron a la placa Arduino a través de una conexión por cable. La placa Arduino recibió estos datos y los transmitió de forma inalámbrica a un PC mediante el módulo Bluetooth HC-05. En el PC, los datos se registraron utilizando el programa Tera Term para su posterior análisis.

- **Código de Control:** Se desarrolló un código de programación personalizado utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. Este código se encargó de controlar los sensores, gestionar la transmisión de datos y

registrar las marcas temporales proporcionadas por el módulo RTC.

Este sistema de recopilación de datos permitió monitorear en tiempo real las variaciones de temperatura y humedad en el hormigón fresco, proporcionando información valiosa para evaluar su comportamiento y optimizar su calidad.

3. Pruebas de Impermeabilización

Para asegurar la durabilidad y precisión de los sensores de humedad utilizados en el monitoreo del hormigón fresco, se llevaron a cabo diversas pruebas de impermeabilización. Estas pruebas fueron esenciales para proteger los componentes electrónicos de los sensores de los agentes atmosféricos y del entorno húmedo del hormigón fresco. A continuación, se describen las pruebas de impermeabilización realizadas y sus resultados.

3.1 Métodos de Impermeabilización

Se evaluaron tres métodos diferentes de impermeabilización para los sensores de humedad:

- **Adhesivo de Silicona de Uso General:**

Este método consistió en aplicar una capa de adhesivo de silicona de uso general sobre los componentes electrónicos del sensor de humedad. La silicona se aplicó de manera uniforme para asegurar una cobertura completa y se dejó secar durante 24 horas antes de su uso en las pruebas. (ver Figura 1.a)

- **Adhesivo de Silicona Neutra:** Similar al método anterior, se utilizó adhesivo de silicona neutra para cubrir los componentes electrónicos del sensor. La silicona neutra se eligió por sus propiedades de baja acidez, lo que reduce el riesgo de corrosión de los componentes electrónicos. La aplicación y el tiempo de secado fueron los mismos que en el primer método.

- **Tubo de PVC y Adhesivo de Silicona**

Neutra: En este método, los componentes electrónicos del sensor se colocaron dentro de un tubo de PVC, que luego se selló con adhesivo de silicona neutra. Este enfoque proporcionó una doble capa de protección, combinando la barrera física del tubo de PVC con la impermeabilización adicional de la silicona.



Figura 1. Impermeabilización del sensor de humedad con: a) cola silicona de uso general, b) con cola de silicona neutra y c) tubo PVC.

3.2 Evaluación de la Efectividad

Para evaluar la efectividad de los métodos de impermeabilización, se compararon los datos de medición obtenidos de los sensores sin impermeabilización y con impermeabilización. Los sensores se sometieron a condiciones controladas de humedad y temperatura para simular el entorno del hormigón fresco.

4. Ensayos en probetas cilíndricas

4.1 Probetas de hormigón convencional

En esta prueba, se verificó el sistema de monitoreo diseñado mediante la observación del comportamiento del hormigón bajo condiciones de temperatura estable, con la humedad monitoreada pero no controlada activamente debido a la mínima variación climática. Para ello, se implantaron sensores de temperatura y humedad en dos probetas cilíndricas de hormigón convencional, fabricadas con cemento Portland ordinario. Estas probetas tienen un diámetro de 15 cm y una altura de 30 cm, cumpliendo con las especificaciones de la norma UNE-EN 12390-1.

Durante el periodo de prueba (46 días), las probetas se colocaron en un entorno estable con control climático regulado. Se utilizaron tres sensores de temperatura y tres sensores de humedad en cada probeta. Los sensores de temperatura se colocaron a diferentes profundidades en cada probeta para observar las variaciones de datos según la profundidad. Dado que los sensores de humedad consisten en dos partes: una sonda que puede incrustarse en el hormigón y un módulo de control que no puede, los sensores se colocaron cerca de la superficie de ambas probetas, asegurando que la sonda estuviera incrustada en el hormigón mientras que el módulo de control permanecía accesible al aire.

Para la probeta A, se colocaron tres pares de sensores equidistantes del borde de la probeta, siguiendo una distribución uniforme en toda su superficie, como puede verse en la Figura 1. Todos los sensores se ubicaron cerca de la superficie de la probeta. Para la probeta B, se insertaron tres pares de sensores equidistantes a lo largo del borde de la probeta, siguiendo una distribución uniforme como puede verse en la Figura 1A. A diferencia de la probeta A, en la probeta B, los tres sensores de temperatura se colocaron a una mayor profundidad, alcanzando el núcleo de la probeta a una profundidad de aproximadamente 15 cm.

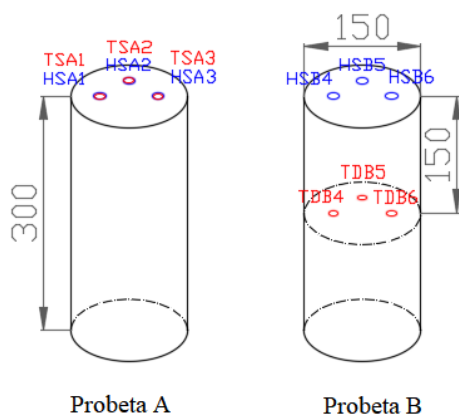


Figura 2. Disposición de los sensores en las probetas tipo A y tipo B fabricadas con hormigón convencional. Unidades en mm.

4.2 *Probetas de Hormigón Autocompactante*

En esta prueba, se realizó un segundo ensayo para verificar la funcionalidad del sistema diseñado. Esta prueba se llevó a cabo en una probeta cilíndrica de hormigón autocompactante en una fábrica de prefabricados de hormigón. En este ensayo, se implantaron un sensor de temperatura y un sensor de humedad en una probeta cilíndrica, cerca de la superficie superior plana.

La misma mezcla de hormigón autocompactante se utilizó para producir otras cuatro probetas sin sensores. Estas probetas, incluida la que contenía los sensores, se utilizaron posteriormente para realizar pruebas de resistencia. La instalación donde se fabricaron las probetas no cuenta con sistemas de control climático para ajustar la temperatura y la humedad; sin embargo, debido a sus condiciones, el entorno se mantiene estable.

5. Resultados

5.1 *Resultados de las Pruebas de Impermeabilización*

Los resultados mostraron que todos los métodos de impermeabilización mejoraron la durabilidad y precisión de los sensores de humedad en comparación con los sensores sin impermeabilización. Sin embargo, hubo diferencias en la efectividad de cada método.

El adhesivo de silicona de uso general proporcionó una protección adecuada, pero se observaron algunas pequeñas variaciones en las mediciones de humedad, lo que sugiere que la cobertura de silicona no era completamente uniforme en todos los sensores.

Por otro lado, los sensores impermeabilizados con silicona neutra mostraron una mayor consistencia en las mediciones de humedad en comparación con los sensores tratados con silicona de uso general. La

baja acidez de la silicona neutra reduce el riesgo de corrosión, mejorando la precisión de los sensores.

Finalmente, el método que utilizó un tubo de PVC y adhesivo de silicona neutra resultó ser el más efectivo, proporcionando la mayor protección contra la humedad y las condiciones ambientales adversas. Los sensores tratados con este método mostraron las mediciones más consistentes y precisas, con una desviación mínima en los datos recopilados.

5.2 Resultados de los ensayos en el Laboratorio de la UCLM

Esta sección presenta los resultados de las pruebas preliminares realizadas en el laboratorio de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) con probetas cilíndricas de hormigón. El objetivo principal fue evaluar si los datos registrados se alineaban con los valores teóricos esperados. La precisión de los datos se evaluó mediante un análisis comparativo de las mediciones de temperatura a diferentes profundidades y las variaciones de temperatura entre la superficie y la profundidad.

Los datos recopilados por los sensores de temperatura en la superficie mostraron una alta consistencia como se puede ver en la gráfica de la Figura 3, con diferencias mínimas entre las mediciones. Las temperaturas comenzaron alrededor de 20°C, aumentaron aproximadamente a 23°C a las 8 horas y luego disminuyeron gradualmente hasta alrededor de 15°C después de 33 horas. Las curvas fluctuaron posteriormente dentro del rango de 18-24°C, estabilizándose hacia el final de la prueba. La desviación estándar máxima fue de 0.18°C, lo que indica un alto grado de fiabilidad de los datos.

De manera similar a los datos de la superficie, los sensores de profundidad mostraron tendencias de temperatura homogéneas, con una desviación estándar máxima de 0.16°C. Esto sugiere que las variaciones de temperatura en las zonas más

profundas son más uniformes en comparación con las zonas superficiales.

Las medias de las curvas de temperatura en las zonas superficial y de profundidad del hormigón indicaron una distribución de temperatura relativamente uniforme en toda la probeta. Se observaron cambios significativos de temperatura durante la fase inicial de fraguado del hormigón, después de lo cual la influencia de la temperatura ambiente se volvió más dominante.

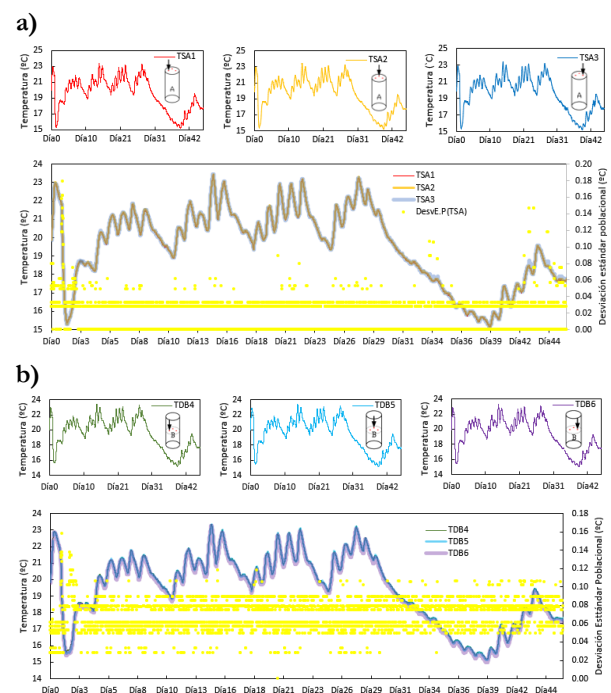


Figura 3. a) Variaciones de temperatura en la zona superficial de la probeta A y desviación estándar de los datos y b) Variaciones de temperatura en la zona de profundidad de la probeta B y desviación estándar de los datos.

Las curvas de humedad relativa recopiladas por los sensores de humedad en la zona superficial de la probeta A mostraron una tendencia decreciente exponencial a lo largo del tiempo, alcanzando aproximadamente el 45% al final del experimento. Las pequeñas diferencias entre los sensores sugieren variaciones menores en la pérdida de humedad a lo largo de la superficie. La desviación estándar máxima fue de 2.94%.

En la probeta B, las curvas de humedad mostraron una discrepancia más notable entre los sensores, con hasta un 20% de diferencia en la humedad relativa al final. La desviación estándar máxima fue de 7.04%, lo que indica una mayor variabilidad en la distribución de la humedad en profundidad. A pesar de estas variaciones, ambas probetas mostraron tendencias generales de humedad consistentes, lo que respalda la necesidad de múltiples sensores de humedad para mejorar la precisión de los datos.

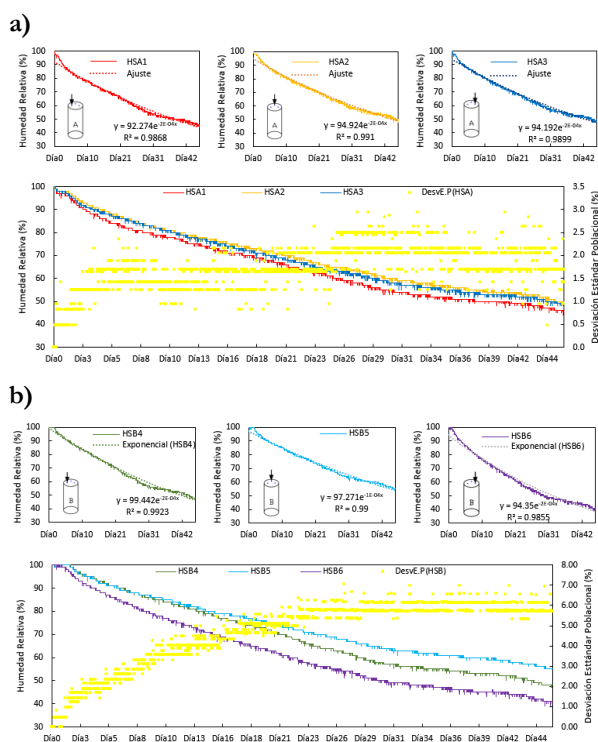


Figura 4. Variaciones de humedad relativa: a) en la zona superficial de la probeta A y desviación estándar de datos y b) en la zona superficial de la probeta B y desviación estándar de datos.

Se observó una clara relación entre las fluctuaciones de temperatura y la pérdida de humedad, especialmente durante las primeras horas de la prueba, cuando los cambios rápidos de temperatura correspondieron a una disminución más pronunciada de la humedad.

5.3 Resultados de los ensayos en fábrica

En esta sección se presenta un análisis de los resultados obtenidos de las probetas cilíndricas utilizadas para validar el sistema diseñado en la fábrica prefabricados de hormigón. La prueba en la fábrica se vio afectada por un problema inesperado, lo que resultó en una recopilación de datos incompleta. No obstante, los datos de temperatura recopilados durante la primera hora mostraron que la temperatura del hormigón se mantuvo relativamente estable alrededor de 35°C, con una ligera disminución. Esto sugiere que la fase de liberación de calor de la hidratación del cemento aún no había comenzado.

La curva de variación de la humedad relativa en la probeta cilíndrica de hormigón autocompactante mostró fluctuaciones antes de que se interrumpiera la prueba. La humedad relativa comenzó aproximadamente en 98%, con una tendencia descendente que alcanzó el 71%, alineándose con los patrones esperados de pérdida de humedad en el hormigón.

Se realizó además una prueba de resistencia a los 21 días después de la fabricación de las probetas para obtener información sobre la posible influencia de los sensores en la resistencia del hormigón. Los resultados de las pruebas de resistencia mostraron que las probetas con sensores incrustados pueden experimentar una disminución de hasta el 37.5% en su resistencia a la tracción en comparación con las probetas sin sensores. Esto sugiere que la presencia de sensores puede influir negativamente en el comportamiento de resistencia a la tracción del hormigón, resultando en una disminución de la resistencia. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este efecto puede ser más significativo en probetas cilíndricas de menor tamaño y puede disminuir a medida que aumenta el tamaño del hormigón en el que se aplican los sensores. Además, se debe considerar que la ubicación de los sensores en la probeta puede ejercer una mayor influencia

negativa en los resultados de la prueba de resistencia a la tracción.

6. Conclusiones

Los ensayos realizados tanto en el laboratorio de la Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM) como en la fábrica de prefabricados de hormigón han proporcionado información valiosa sobre la viabilidad y efectividad del sistema de monitoreo propuesto utilizando sensores de bajo coste. Los resultados obtenidos de los sensores de temperatura y humedad mostraron una alta consistencia y fiabilidad. Las mediciones de temperatura en las probetas cilíndricas de hormigón ordinario y autocompactante se alinearon con los valores teóricos esperados, indicando una distribución uniforme de la temperatura tanto en la superficie como en la profundidad del hormigón.

Las curvas de humedad también mostraron tendencias consistentes, aunque con variaciones menores entre los sensores, lo que resalta la importancia de utilizar múltiples sensores para mejorar la precisión de los datos.

Las pruebas de resistencia realizadas a los 21 días después de la fabricación de las probetas indicaron que la presencia de sensores incrustados puede influir negativamente en la resistencia a la tracción del hormigón, resultando en una disminución de hasta el 37.5% en comparación con las probetas sin sensores. Este efecto puede ser más significativo en probetas de menor tamaño y puede disminuir a medida que aumenta el tamaño del hormigón en el que se aplican los sensores.

El sistema de monitoreo basado en la plataforma Arduino demostró ser efectivo para recopilar datos en tiempo real sobre las variaciones de temperatura y humedad en el hormigón fresco. La transmisión inalámbrica de datos mediante el módulo Bluetooth HC-05 facilitó la recopilación de datos sin necesidad de conexiones físicas, lo que es especialmente útil en entornos de producción.

Las pruebas de impermeabilización realizadas con adhesivo de silicona de uso general, adhesivo de silicona neutra y tubo de PVC y adhesivo de silicona neutra mostraron que es posible proteger los sensores de humedad de los agentes atmosféricos, mejorando su durabilidad y precisión en la medición de la humedad en el hormigón fresco.

Los resultados preliminares sugieren que el sistema de monitoreo propuesto tiene el potencial de mejorar la calidad del hormigón mediante el monitoreo en tiempo real de parámetros críticos. Sin embargo, se recomienda realizar investigaciones adicionales para evaluar la influencia de los sensores en la resistencia del hormigón en probetas de mayor tamaño y en diferentes condiciones ambientales. Además, se sugiere explorar métodos adicionales de impermeabilización y protección de los sensores para garantizar su durabilidad a largo plazo.

Agradecimientos

Los autores de este documento desean expresar su más sincero agradecimiento a todo el personal de Industrias COTUBO Prefabricados SL, por su colaboración y la ayuda brindadas en la parte experimental de ensayo, gracias a ellos se hizo posible llevar a cabo esta investigación. Su disposición y profesionalidad han sido fundamentales para el éxito de nuestras pruebas.

También queremos agradecer al personal del laboratorio de materiales de la Universidad de Castilla-La Mancha por su ayuda en la preparación y ejecución de los ensayos.

Finalmente, extendemos nuestra gratitud al catedrático José Antonio Lozano por su valiosa orientación y asesoramiento a lo largo de este proyecto. Su experiencia y conocimientos han sido de gran ayuda para superar los desafíos encontrados.

Referencias

- [1] Otsuka, K. & Wayman, C.M. (1998) *Shape Memory Materials*, United Kingdom, Cambridge University Press,.
- [2] Frenzel, M., Ortlepp, R., Scheerer, S. & Curbach, M. (2013) Hormigón armado con textiles. Un material innovador, ligero y moldeable, *Hormigón y Acero*, 64 (268): 47–74.
- [3] Comisión Permanente del Hormigón (2008) *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008*, Madrid, Ministerio de Fomento.
- [4] Monteiro, P. J. M. & Mehta, P. K. (1986) *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, United Kingdom, McGraw-Hill.
- [5] Hosseinzadehfard, M. & Mobaraki, B. (2024) Investigating concrete durability: The impact of natural pozzolan as a partial substitute for microsilica in concrete mixtures, *Construction and Building Materials*, 419: 135491.
- [6] Taheri, F. (2019) Diverse array of sensors for concrete behavior monitoring, *Sensors*, 19 (3): 567.
- [7] Barroca, N., Faria, P., Ferreira, D., Lima, J. & Martins, A. (2013) Monitoring of concrete structures using electrical resistance sensors, *Construction and Building Materials*, 47: 1230-1238.
- [8] Hassani, S. & Dackermann, U. (2023) Real-time monitoring of concrete behavior using advanced sensors, *Sensors*, 23 (4): 567.
- [9] González-López, J. & Martínez, A. (2020) Electrical resistance sensors for concrete monitoring, *Sensors*, 20 (9): 2345.
- [10] Sun, Z. & Zhang, Y. (2014) Electrical resistance sensors for concrete monitoring, *Sensors*, 14 (5): 1234.
- [11] Cao, M., Zhang, Q. & Li, H. (2020) Ultrasonic monitoring of concrete structures: A review, *Ultrasonics*, 104: 106-115.
- [12] Chakraborty, S. & Katunin, A. (2019) Electromagnetic sensors for structural health monitoring of concrete structures, *Sensors*, 19 (12): 2678.
- [13] Kairu, J. & Mwangi, P. (2023) Electromagnetic sensors for concrete monitoring, *Sensors*, 23 (3): 678.
- [14] Jayawickrema, U. & Zhang, Y. (2022) Fiber optic sensors for concrete structure monitoring, *Sensors*, 22 (6): 789.
- [15] Gomasa, M. & Kinoshita, H. (2023) Piezoelectric sensors for concrete health monitoring, *Sensors*, 23 (1): 123.
- [16] Eslamlou, A. & Ghaffari, M. (2023) Magnetostrictive sensors for concrete structure monitoring, *Sensors*, 23 (2): 456.
- [17] Dragašius, E. & Kvedaras, A. (2021) Piezoelectric sensors for structural health monitoring of concrete structures, *Sensors*, 21 (3): 789.
- [18] Ubertini, F. & Laflamme, S. (2014) Cement-based carbon nanotube sensors for natural frequency identification, *Sensors*, 14 (10): 1234.
- [19] Nauman, M. (2021) Smart piezoelectric sensors for mechanical monitoring of concrete structures, *Sensors*, 21 (9): 2345.
- [20] Dong, B., Han, B. & Yu, X. (2019) Piezoresistive properties of cement-based sensors: A review, *Sensors*, 19 (5): 1100.
- [21] Jin, Z. & Li, H. (2020) Durability assessment of concrete structures using multifunctional sensors, *Sensors*, 20 (12): 3456.
- [22] Chen, J., Zhang, Y. & Li, X. (2016) Internet of Things-based concrete monitoring system for smart cities, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22 (7): 856-864.
- [23] Cosoli, G., Scalise, L. & Cerri, G. (2024) Machine learning techniques for concrete performance prediction, *Journal of Building Engineering*, 35: 102-110.
- [24] Mohtasham Moein, M. & Zhang, Y. (2023) Artificial intelligence for concrete

performance optimization, *Journal of Building Engineering*, 35: 102-110.

- [25] Mobaraki, B., Lozano-Galant, F., Soriano, R.P., Pascual, F.J.C. (2021) Application of low-cost sensors for building monitoring: A systematic literature review, *Buildings* 11.
- [23] Gong, M., Li, H. & Zhang, Y. (2015) Bluetooth communication protocols for real-time concrete monitoring, *Sensors*, 23 (8): 3456.
- [24] Cabezas, J., Fernández, J. & Martínez, A. (2018) Low-cost wireless sensor network for concrete curing monitoring, *Sensors*, 18 (10): 3456.
- [25] Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Lozano-Galant, J.A., Turmo, J. (2020) Evaluation of low-cost angular measuring sensors, *Int. Conf. Recent Trends Geotech. Geo-Environmental Eng. Educ.* 1–6.
- [26] Mobaraki, B., Komarizadehasl, S., Castilla Pascual, F.J., Lozano-Galant, J.A. (2019) Open source platforms for monitoring thermal parameters of structures, in: *Bridg. Maintenance, Safety, Manag. Life-Cycle Sustain. Innov.*, pp. 3892–3896.