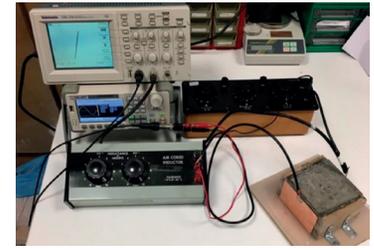


Ensayos alternativos para la determinación del tiempo de fraguado. Métodos capacitivo y resistivo



Alternative tests for the determination of the setting time. Capacitive and resistive methods



¹Daniel Ferrández, ²Engerst Yedra, ²Carlos Morón y ²Alberto Morón

¹ Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística. Calle de los Ciruelos - 28660 Boadilla del Monte, Madrid (España).

² Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Tecnología de la Edificación. Grupo de Sensores y Actuadores. Av. Juan de Herrera, 6 - 28040 Madrid (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9741> | Recibido: 17/03/2020 • Inicio Evaluación: 16/01/2020 • Aceptado: 18/03/2020

ABSTRACT

- The hardening of the conglomerates' materials is characterized by the change in the state of the paste, from a fluid state -after mixing- to its solid-state. At present, the well-known Vicat Needle Method is used to determine the hardening times, following the UNE-EN 13279-2 and UNE-EN 196-3 standards, depending on whether they are gypsum, plaster or cement. In this work, two alternative low-cost methods and easily applicable are proposed, based on capacitive and resistive sensors, which can help to improve the production process of prefabricated construction. The results show how it is possible to relate the setting times conventionally measured with the variations in the response of the sensors implemented. On the other hand, the behavior of the material can be monitored in real-time without having to rely on a manual test. This work, therefore, validates two alternative methods for the testing of conglomerates' materials.
- **Keywords:** hardening time, Vicat needle, capacitive sensor, Arduino.

RESUMEN

El fraguado de los materiales conglomerantes se caracteriza por el cambio de estado de la pasta, de un estado fluido -después del amasado-, a su estado sólido. En la actualidad se emplea el conocido Método de la Aguja de Vicat para la determinación de los tiempos de fraguado, de acuerdo con las normas UNE-EN 13279-2 y UNE-EN 196-3, según se trate de yesos y escayolas o de cementos. En este trabajo se proponen dos métodos alternativos de bajo coste y fácilmente aplicables, basados en un sensor capacitivo y en un sensor resistivo, los cuales pueden ayudar a mejorar el proceso de producción de prefabricados de construcción. Los resultados muestran cómo es posible relacionar los tiempos de fraguado medidos convencionalmente con las variaciones en la respuesta de los sensores implementados. Por otra parte, se consigue monitorizar en tiempo real el comportamiento del material sin tener que depender de un ensayo manual. Este trabajo muestra la viabilidad de ambos métodos alternativos para la determinación del tiempo de fraguado en materiales conglomerantes.

Palabras clave: tiempo de fraguado, aguja de Vicat, sensor capacitivo, Arduino.

1. INTRODUCCIÓN

El yeso, la escayola y el cemento son materiales conglomerantes hidráulicos que al entrar en contacto con el agua comienzan a

hidratarse durante un proceso continuo y que se prolonga en el tiempo [1]. Este proceso de hidratación se divide en dos fases: fraguado y endurecimiento. En este trabajo se presentan dos métodos alternativos para la determinación del primero de estos dos fenómenos, caracterizado por el paso de la pasta del material del estado fluido en el que se amasa al estado sólido, en el que conservará su forma hasta ir alcanzando progresivamente sus resistencias mecánicas exigidas [2].

Los fenómenos químicos que intervienen en el fraguado de yesos y escayolas, así como de los cementos, han sido ampliamente estudiados por diversos autores que han tratado de controlar tanto el calor de hidratación de las distintas reacciones implicadas [3], como los tiempos de fraguado desde el inicio del amasado [4]. El objeto de esta investigación no hace referencia tanto a las propiedades químicas de los materiales estudiados, sino a las técnicas de medida empleadas en la determinación del fraguado.

El método actualmente recogido en la normativa y más ampliamente extendido para la determinación de los tiempos de fraguado es el denominado Método de la Aguja de Vicat [5]. No obstante, diversos autores han desarrollado equipos de medida alternativos para la determinación del inicio y final de fraguado. Tal es el caso de las técnicas de ultrasonidos, mediante las cuales puede estimarse el fraguado inicial de una pasta de cemento en el momento en que aparece el punto de inflexión en la curva de velocidad del pulso ultrasónico [6]. Estos cambios en la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonidos se deben a las transformaciones morfológicas que se producen a nivel microscópico en la matriz del conglomerante [7].

No obstante, estos métodos alternativos suelen ser costosos y requerir de ensayos de caracterización química complementarios para validar su funcionamiento [8]. Es por este motivo, que cada vez más se están desarrollando sistemas de medida basados en sensores de bajo coste, pero con un nivel de precisión cada vez más elevado. Entre estos métodos podemos destacar varios que por su versatilidad se pueden considerar eficientes para este tipo de ensayos. El método capacitivo basa su funcionamiento en la respuesta de un condensador. Los condensadores más extendidos para este tipo de ensayos son los de placas plano-paralelas, cuyas variaciones en la señal se recogen gracias a la variación en la capacidad del dieléctrico colocado entre sus placas [9]. El método inductivo, se fundamenta en la variación en la inducción magnética producida en el seno de un solenoide conforme varía permitividad magnética del material ubicado en su interior. Estos

sensores inductivos son muy útiles cuando solo se tiene acceso a una de las caras del material [10].

Finalmente, se deben incluir los sensores resistivos, cuya respuesta en voltaje depende de la mayor o menor oposición con la que se encuentra la corriente eléctrica al pasar a través del material estudiado [11]. En el caso de las escayolas, así como, en morteros y hormigones, el agua libre de amasado se va combinando progresivamente hasta ir disminuyendo la conductividad eléctrica del material, propiedad que puede relacionarse con la evolución de las propiedades mecánicas [12].

El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad de dos nuevos sistemas de medida, basados en un sensor capacitivo y en un sensor resistivo, como métodos alternativos para determinar los tiempos de fraguado de los materiales conglomerantes más extendidos en el sector de la construcción. La importancia de encontrar nuevos sistemas alternativos al ensayo ya existente de la aguja de Vicat, se fundamenta en la escasa versatilidad de este método concebido fundamentalmente para ensayos de laboratorio y con una aplicación muy limitada en la ejecución de obras o procesos productivos, donde los tiempos de fraguado son un factor limitante para el amasado y aplicación de materiales conglomerantes de construcción.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES Y DOSIFICACIONES EMPLEADAS

Para este estudio se eligieron cuatro tipos diferentes de conglomerantes, dos de ellos de velocidad rápida de fraguado como son el yeso grueso y la escayola, y dos tipos diferentes de cemento como materiales de fraguado más lento.

De una parte, se empleó una tipología de yeso grueso B1 –sulfato de calcio hemihidrato– con un contenido en conglomerante de yeso superior al 50 %, este material fue suministrado por la empresa Placo® Saint Gobain. Además, se empleó también como conglomerante de fraguado rápido, una escayola de construcción tipo E35 de mayor módulo de finura y resistencia mecánica más elevada.

Para el caso de los cementos se eligieron dos series distintas de entre las recogidas en la instrucción RC-16 [13]. Por un lado, se ensayó un cemento comúnmente empleado en obra, CEM II/B-L 32,5 N, el cual se corresponde con un cemento portland con bajo contenido en Clinker y un contenido en escorias de horno alto entre el 21-35 % en masa, de clase resistente 32,5 y resistencia inicial normal, Y por otro lado, se estudió un cemento tipo CEM IV/A (V-S) 32,5 N-LH, correspondiente a un cemento puzolánico, con un contenido entre 11-35 % en masa de ceniza volante silícea y escoria de horno alto, con clase resistente 32,5, resistencia inicial normal y bajo calor de hidratación.

Las dosificaciones empleadas fueron realizadas según las recomendaciones del fabricante para el caso de yesos y escayolas,

y según el resultado del ensayo de consistencia normal para las pastas de cemento, tal y como se indica en la Tabla 1. El amasado se realizó con ayuda de una amasadora planetaria de la serie IBERTEST, teniendo en consideración la velocidad de la pala para no interrumpir la formación de las estructuras cristalinas que se desarrollan en los momentos iniciales de la hidratación.

2.2. MÉTODO TRADICIONAL

La determinación de los tiempos de fraguado emplea como utensilio principal la Aguja de Vicat, aunque existen algunas diferencias en el procedimiento en función del tipo de conglomerante empleado.

Por un lado, para pastas de yeso y escayola, se emplea el método recogido en la norma UNE-EN 13279-2 [14]. Para ello, se elabora previamente la pasta de yeso o escayola según la relación agua/conglomerante requerida, para posteriormente verterla en un molde troncocónico de caucho de dimensiones normalizadas (diámetro inferior de 75 mm, diámetro superior de 65 mm y altura de 40 mm), que se encuentre apoyado sobre una placa de vidrio y se pueda enrasar por la cara superior con ayuda de una espátula. Una vez obtenida la mezcla, esta se sitúa debajo de la Aguja de Vicat, previamente nivelada, y se deja caer la aguja sucesivamente, pinchando a distancias separadas entre sí al menos 12 mm y alejadas del borde del cono. El tiempo de inicio de fraguado se determina cuando la aguja penetra hasta una profundidad de $(22 \pm 2 \text{ mm})$.

$$T_i = t_i - t_0 \quad (1)$$

donde t_i es el tiempo en minutos, en que la penetración de la aguja dentro del cono llega a los $(22 \pm 2 \text{ mm})$, y t_0 es el tiempo en que el yeso se pone en contacto con el agua, también en minutos.

Por otro lado, para el caso del cemento, se emplea el método recogido por la norma UNE-EN 196-3 [15]. En este caso, previamente a la determinación del tiempo de fraguado, se debe obtener la consistencia normal del cemento. La consecución de dicha consistencia se realiza con ayuda de una sonda normalizada, que se deja caer sobre un molde troncocónico de caucho de altura $(40,0 \pm 0,2 \text{ mm})$, y cuyo diámetro interno debe ser de $(75 \pm 10 \text{ mm})$. En dicho molde se contiene la pasta de cemento previamente enrasada, cuya relación agua/cemento se debe determinar experimentalmente hasta que la distancia entre la sonda una vez soltada y la placa base sea de $(6 \pm 2 \text{ mm})$.

Una vez determinada la consistencia normal, y manteniendo la relación agua/cemento anterior se realiza el ensayo de la aguja de Vicat. Determinando el inicio de fraguado con ayuda de una aguja de diámetro $(1,13 \pm 0,05 \text{ mm})$ y longitud mínima de 45 mm, hasta que la distancia entre esta y la placa base sea de $(6 \pm 3 \text{ mm})$. Anotando el tiempo de final de fraguado cuando la aguja penetra, por primera vez, sólo 0,5 mm en la pasta (probando al menos en

| Ensayos para escayola y yeso | | | |
|------------------------------|-------------------|----------|--------------------------|
| Nomenclatura | Conglomerante (g) | Agua (g) | Relación (a/c) |
| E35 - 0,8 | 1000 g | 800 g | 0,8 |
| YG - 0,7 | 1000 g | 700 g | 0,7 |
| Ensayos para cementos | | | |
| Nomenclatura | Conglomerante (g) | Agua (g) | Consistencia Normal (mm) |
| CEM II | 500 g | 150 | 5,6 |
| CEM IV | 500 g | 153 | 4,8 |

Tabla 1: Dosificaciones empleadas para la elaboración de las pastas ensayadas

dos posiciones). Cabe destacar que se debe ser constante en las medidas, teniendo en cuenta el elevado tiempo de fraguado de los cementos y pinchando siempre con una distancia mínima de 10 mm entre posiciones.

2.3. MÉTODO CAPACITIVO

Para la realización de este ensayo se diseñó el equipo de medida que se muestra en la Figura 1. El sistema implementado se basa en encontrar la frecuencia fundamental de resonancia del circuito RLC, donde R y L (resistencia e inductancia) son constantes y C (elemento capacitivo) es la incógnita del sistema, tal y como se indica en la siguiente ecuación:

$$X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

donde f es la frecuencia de resonancia en Hz, L , es la inducción de la bobina en H, y C , es la capacidad del condensador en F.

Las condiciones para localizar dicha frecuencia de resonancia son que la impedancia debe ser mínima, y a su vez, dicha impedancia depende de la capacidad del condensador de placas plano-paralelas acoplado en los laterales del molde. Esta capacidad variará según se modifique la permitividad dieléctrica del material ensayado, y conforme evolucione el fraguado de la pasta, ya que la superficie y la distancia entre placas se mantiene constante.

Este sistema tiene la ventaja frente al método tradicional recogido por la normativa actual de no ser intrusivo, es decir, se puede monitorizar en tiempo real la variación de frecuencia conforme se produce el fraguado del material conglomerante. Además de ser un equipo de bajo coste y capaz de adaptarse a materiales puestos en obra y procesos de producción de prefabricados de construcción.

2.4. MÉTODO RESISTIVO

El otro método alternativo diseñado consiste en un sensor resistivo que emplea la tecnología Arduino para la captura y grabado de datos. Este sistema está basado en la medida de la variación del contenido en agua de amasado en el interior del material conforme se produce el fraguado, ya que esta variación produce cambios en la conductividad eléctrica del material en estudio. En la Figura 2, se pueden apreciar los componentes que conforman el equipo implementado, estos son: puntas de prueba de material conductor, conectores, Arduino Nano V3.0, placa de montaje electrónica, sensor de humedad FC-28 y, al igual que en método capacitivo, molde cúbico de 6 cm de arista.

Existe una relación entre la disminución de la resistividad y el aumento de la resistencia en materiales de fraguado hidráulico, y esto es debido a la combinación del agua de amasado con el material conglomerante que inicialmente se encuentra seco [16]. En este trabajo, a través de la plataforma de hardware libre de Arduino, que fue concebida para facilitar el uso de la electrónica en

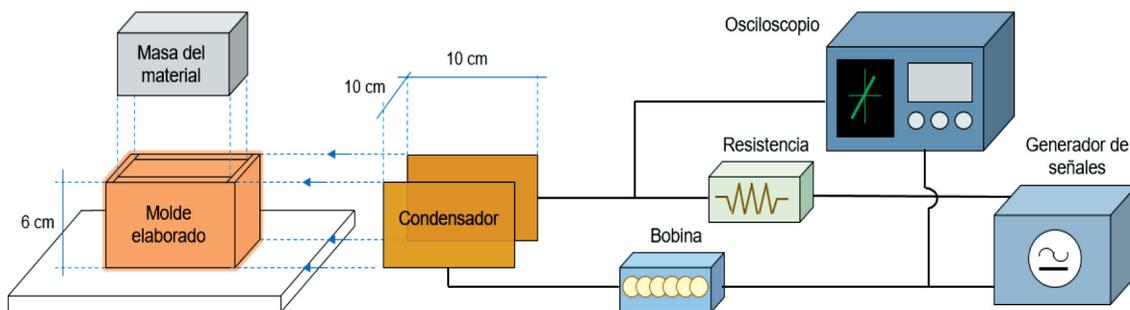


Figura 1: Esquema del equipo empleado para la medida de la frecuencia de resonancia

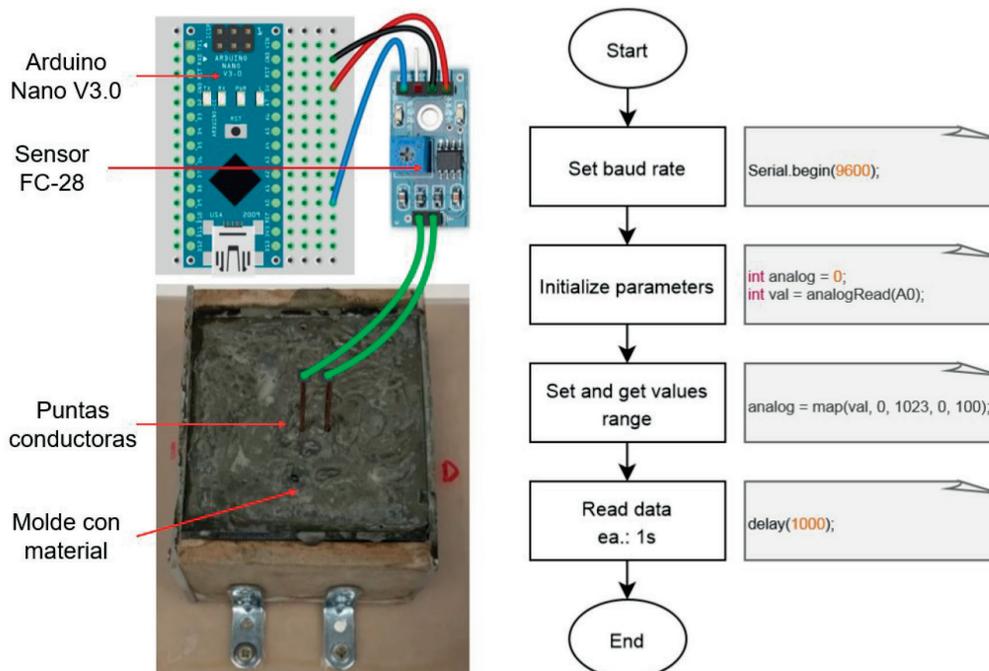


Figura 2: Esquema de montaje del sensor resistivo en Fritzing y diagrama de flujo de la programación realizada

proyectos multidisciplinares, se ha podido monitorizar con ayuda del sensor de humedad FC – 28 y las puntas metálicas conductoras el proceso de fraguado del material. El modelo Nano V3.0 empleado en este estudio tiene en la placa el microcontrolador ATmega328P, siendo este uno de los más versátiles y con mayores capacidades.

Se trata de un equipo económico, con una alta velocidad de captura de datos que permite obtener resultados fiables y en tiempo real del interior de la muestra.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS DEL MÉTODO CAPACITIVO

En la Figura 3 se presenta el equipo de medida empleado para la medida de la frecuencia de resonancia y su relación con los tiempos de fraguado. En dicha figura, se puede apreciar el sensor capacitivo que monitoriza en tiempo real el material conglomerante vertido en el molde, la bobina, la resistencia, el generador de señales y la figura de Lissajous buscada en el osciloscopio para determinar la resonancia en el circuito.

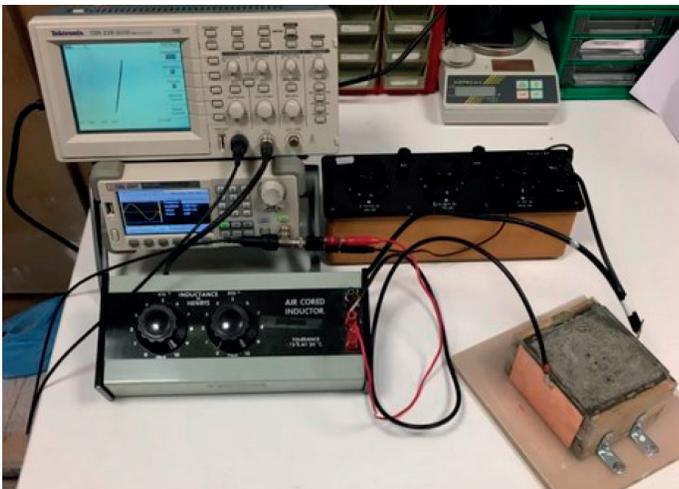


Figura 3: Equipo de medida desarrollado con sensor capacitivo

De esta forma, se obtuvieron las frecuencias de resonancia correspondientes a los tiempos de inicio y final de fraguado, en relación con el método tradicional de la aguja de Vicat. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 2.

En todo momento, las condiciones temperatura y humedad del laboratorio fueron reguladas para que los factores ambientales no fueran un factor determinante a la hora de recoger los resultados del ensayo [17]. En la Tabla 2 se puede apreciar como las frecuencias de resonancia son bien diferenciadas para cada tipo de material y dosificación empleada, siendo el yeso grueso y el CEM IV los que presentan valores más elevadas en sus respectivos ensayos.

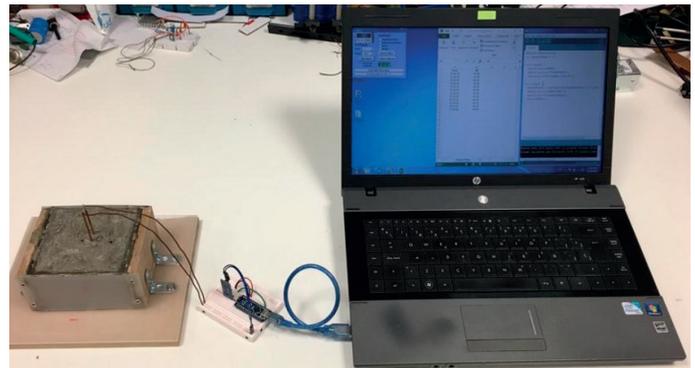


Figura 4: Equipo de medida desarrollado mediante sensor resistivo

Asimismo, los valores obtenidos dependen de la composición del material y de la red de poros interna que se genera al combinarse y evaporarse el agua de amasado.

De esta forma, conociendo las frecuencias de inicio y final de fraguado, este método de medida puede ser empleado en la elaboración de materiales prefabricados o para la monitorización de sistemas constructivos puestos en obra, siempre y cuando se tenga acceso a dos laterales opuestos de la masa del material estudiado y el tamaño de la superficie de las placas se aumente conforme se incrementa la separación entre ellas para evitar efectos de borde.

3.2. RESULTADOS DEL MÉTODO RESISTIVO

En la Figura 4, se muestra el equipo de monitorización con Arduino empleado para el control de los tiempos de fraguado, que está conectado a un ordenador HP-620 para su seguimiento en tiempo real. Este sistema permite visualizar tanto los datos numéricos obtenidos de la toma de medidas, como la gráfica que se genera representando los eventos exotérmicos que tienen lugar en el interior del material desde su vertido en el molde.

En la Figura 5, se muestran los resultados obtenidos tras la monitorización del fraguado en los materiales recogidos en la norma UNE – EN 13279 – 2. Tanto para el caso del yeso grueso, como para el caso de la escayola, se aprecia la relación con los tiempos de inicio de fraguado medidos con la Aguja de Vicat, con un descenso en el porcentaje de agua libre de amasado existente en el interior del material. Esta variación es mayor para el caso de la escayola E35, lo cual es debido al mayor carácter exotérmico del proceso de fraguado en este material, generando poros en su interior y aumentando la resistividad de la muestra con el tiempo.

En la Figura 6, se muestran los resultados correspondientes al fraguado de las dos tipologías de cemento empleadas en este estudio y su relación con los tiempos recogidos según el método UNE – EN 196 – 3. Para esta tipología de conglomerante hidráulico se aprecia durante la primera hora del fraguado un descenso rápido del contenido en agua libre de amasado, para,

| Relación Método UNE-EN 13279-2 y Método Capacitivo | | | | | | |
|--|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
| Denominación | t (min) | | d (mm) | f (kHz) | | |
| E35 – 0,8 | 11 | | 20 | 1,70 | | |
| YG – 0,7 | 14 | | 21 | 61,20 | | |
| Relación Método UNE-EN 196-3 y Método Capacitivo | | | | | | |
| Denominación | (min) | d (mm) | f (kHz) | (min) | d (mm) | f (kHz) |
| CEM II | 110 | 7 | 1,00 | 175 | 0,5 | 1,11 |
| CEM IV | 320 | 6,8 | 60,20 | 445 | 61,30 | |

Tabla 2: Frecuencias obtenidas en los tiempos de fraguado y su relación con la penetración de la aguja de Vicat

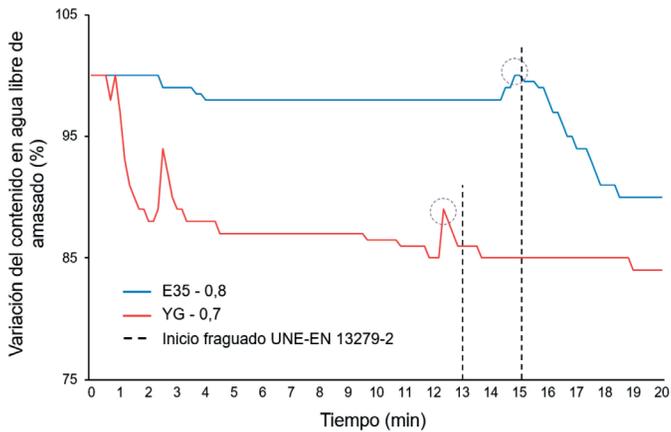


Figura 5: E-35 08 y YG - 07: Variación del contenido en agua libre de amasado frente al tiempo recogida por el sensor desarrollado y tiempos de inicio de fraguado según UNE-EN 13279-2

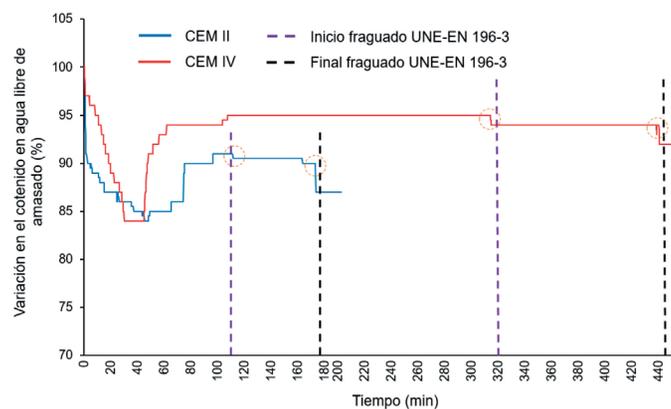


Figura 6: CEM II y CEM IV: Variación del contenido en agua libre de amasado frente al tiempo recogida por el sensor desarrollado y tiempos de inicio y final de fraguado según UNE-EN 196-3

posteriormente, producirse una subida y estabilización de la medida en el interior de la pasta de cemento. Los tiempos de fraguado son bien diferenciados entre ambos materiales, siendo más elevados en el caso del CEM IV/A (V-S) 32,5 N-LH debido a su contenido en puzolanas. En ambos materiales, se aprecia un escalón decreciente en el contenido en agua libre de amasado, producido a las edades de inicio y final de fraguado que fueron determinadas por el método tradicional.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado dos métodos de ensayo alternativos al método tradicional de medida de la Aguja de Vicat para la determinación del tiempo de fraguado en materiales conglomerantes. Tanto el equipo de medida capacitivo, como el sensor resistivo implementados, son capaces de proporcionar medidas fiables y en tiempo real del proceso de fraguado en relación a la combinación del agua de amasado con el material en estudio, pudiéndose calibrar los sensores implementados para diferentes relaciones agua/conglomerante sin más que fijar el valor del 100% de conductividad eléctrica o capacitancia inicial con la medida tomada tras el vertido del material en el molde.

Para el caso del método capacitivo, el conocimiento de la frecuencia fundamental de resonancia a la que se produce el inicio (y final) de fraguado de los materiales ensayados, puede ser aplicado para el seguimiento de materiales prefabricados de construcción. Además, se trata de un equipo de medida que puede ser parametrizado para otras relaciones agua/conglomerante

diferentes, y que, teniendo acceso a dos caras opuestas del material, permite conocer la evolución del fraguado siendo un método no intrusivo.

El sensor de bajo coste de Arduino presentado en este trabajo, ha demostrado que es capaz de recoger en tiempo real las variaciones en el contenido en agua libre de amasado que se producen en el material. Con la ayuda de este sensor, solo es necesario introducir las puntas conductoras del material a la distancia de un centímetro al inicio del ensayo, evitando así el posible error humano derivado del tradicional ensayo manual y tomando como zona de control el centro de la probeta, evitando así posibles efectos de borde derivados de un secado acelerado por convección en los laterales. Además, este método es capaz de recoger mayor número de medidas que el tradicional método UNE, y permite apreciar los eventos exotérmicos ligados al proceso de fraguado.

Se trata, por tanto, de dos métodos alternativos que pueden ser utilizados en obra o en proceso industrializados para el control de materiales de construcción, ya que, a diferencia del tradicional método de la aguja de Vicat, los sistemas desarrollados son más flexibles y se pueden aplicar a otras geometrías y tamaños relacionando sus medidas con las del ensayo tradicional.

REFERENCIAS

- [1] Camuñas, A. (1974). *Materiales de Construcción*. Editorial Guadiana Publicaciones, ISBN 13: 9788425100611.
- [2] Yaphary, Y.L.; Yu, Z.; Lam, R.H.W.; Lau, D. (2017). Effect of triethanolamine on cement hydration toward initial setting time. *Construction and Building Materials*, 141, 94–103, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.072.
- [3] Moghadam, H.A.; Mirzaei, A. (2020). Comparing the effects of a retarder and accelerator on properties of gypsum building plaster. *Journal of Building Engineering*, 28, 101075, DOI: 10.1016/j.jobe.2019.101075.
- [4] Zhang, M.H.; Sisomphom, K.; Siang, T.; Jun Sun, D. (2010). Effect of superplasticizers on workability retention and initial setting time of cement pastes. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1700–1707, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.021
- [5] Sleiman, H.; Perrot, A.; Amziane, S. (2010). A new look at the measurement of cementitious paste setting by Vicat test. *Cement and Concrete Research*, 40 (5), 681 – 686, DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.12.001.
- [6] Trtnik, G.; Turk, G.; Kavcic, F.; Bokan, V. (2008). Possibilities of using the ultrasonic wave transmission method to estimate initial setting time of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 38 (11), 1336 – 1342, DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.08.003.
- [7] Smith, A.; Chotard, T.; Gimet, N.; Fargeot, D. (2002). Correlation between hydration mechanism and ultrasonic measurements in an aluminous cement: effect of setting time and temperature on the early hydration. *Journal of the European Ceramic Society*, 22 (12), 1947 – 1958, DOI: 10.1016/S0955-2219(01)00530-1.
- [8] Rajzer, I.; Piekarczyk, W.; Castaño, O. (2016). An ultrasonic through-transmission technique for monitoring the setting of injectable calcium phosphate cement. *Materials Science and Engineering: C*, 67, 20 – 25. DOI: 10.1016/j.msec.2016.04.083.
- [9] Morón, C. Saiz, P. Ferrández, D. García-Fuentevilla, L. (2017). New System of Shrinkage Measurement through Cement Mortars Drying. *Sensors*, 17(3), 522, DOI: 10.3390/s17030522.
- [10] Ferrández, D.; Saiz, P.; Morón, C.; Dorado, M.G.; Morón, A. (2019). Inductive method for the orientation of steel fibers in recycled mortars. *Construction and Building Materials*, 222, 243 – 253, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.113.
- [11] Yim, H.J.; Lee, H.; Hong, J. (2017). Evaluation of mortar setting time by using electrical resistivity measurements. *Construction and Building Materials*, 146, 679 – 686, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.088.
- [12] Vipulanandan, C.; Amani, N. (2018). Characterizing the pulse velocity and electrical resistivity changes in concrete with piezoresistive smart cement binder using Vipulanandan models. *Construction and Building Materials*, 175, 519 – 530, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.196.
- [13] Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, por el que se aprueba la Instrucción para la recepción de cementos (RC-16). «BOE», 153, de 25 de junio de 2016, pp. 45755 – 45824.
- [14] UNE-EN 13279-2:2014. Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo. 28 de mayo de 2014.
- [15] UNE-EN 196-3: 2017. Métodos de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la estabilidad de volumen. 22 de marzo de 2017.
- [16] Dong, B.; Zhang, J.; Wang, Y.; Fang, G.; Liu, Y.; Xing, F. (2016). Evolutionary trace for early hydration of cement paste using electrical resistivity method. *Construction and Building Materials*, 119, 16–20. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.127.
- [17] Luo, D.; Ismail, Z.; Ibrahim, Z. (2013). Added advantages in using a fiber Bragg grating sensor in the determination of early age setting time for cement pastes. *Measurement*, 46 (10), 4313 – 4320, DOI: 10.1016/j.measurement.2013.06.036.