



(51) Clasificación Internacional de Patentes:
G01N 29/04 (2006.01)

(21) Número de la solicitud internacional:
PCT/ES2012/070439

(22) Fecha de presentación internacional:
14 de junio de 2012 (14.06.2012)

(25) Idioma de presentación: español

(26) Idioma de publicación: español

(30) Datos relativos a la prioridad:
P201131005 15 de junio de 2011 (15.06.2011) ES

(71) Solicitantes (para todos los Estados designados salvo US):
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) [ES/ES]; Serrano, 117, E-28006 Madrid (ES). **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID** [ES/ES]; Avenida Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid (ES). **ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE INDUSTRIAS DE LA CONSTRUCCIÓN- AIDICO- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN** [ES/ES]; Avenida Benjamín Franklin, 17, E-46980 PATERNA (Valencia) (ES).

(72) Inventores; e

(75) Inventores/Solicitantes (para US solamente): **APARICIO SECANELLAS, Sofia** [ES/ES]; Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva, Serrano, 144, E-28006 Madrid (ES). **RANZ GARCÍA, Javier** [ES/ES]; Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva, Serrano, 144, E-28006 Madrid (ES). **GALÁN MORÓN, Raquel** [ES/ES]; Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva, Serrano, 144, E-28006 Madrid (ES). **VILLANUEVA GONZÁLEZ, Eugenio** [ES/ES]; Centro de Automática y Robótica, E-28500 Arganda del Rey (Madrid) (ES). **GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, Margarita** [ES/ES]; Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva, Serrano, 144, E-28006 Madrid (ES). **ANAYA VELAYOS, José Javier** [ES/ES]; Centro de Acústica Aplicada y Evaluación no Destructiva, Serrano, 144, E-28006 Madrid (ES). **GARCÍA IZQUIERDO, Miguel Angel** [ES/ES]; Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Ramiro de Maeztu, 7, E-28040 Madrid (ES). **FUENTE RAMÍREZ, Jose Vicente** [ES/ES]; Asociación de Investigación de Industrias de la Construcción - AIDICO - Instituto Tecnológico de la Construcción, Avenida Benjamín Franklin, 17, E-46980 Paterna (Valencia) (ES). **FERNÁNDEZ DÍAZ, Román** [ES/ES]; Asociación de Investigación de Industrias de la Construcción - AIDICO - Instituto Tecnológico de la

[Continúa en la página siguiente]

(54) Title: METHOD AND WIRELESS SYSTEM FOR MEASURING THE DEGREE OF SETTING AND HARDENING OF CEMENTITIOUS MATERIALS FOR PREDICTING MECHANICAL RESISTANCES

(54) Título : PROCEDIMIENTO Y SISTEMA INALÁMBRICO DE MEDIDA DEL GRADO DE FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO DE MATERIALES CEMENTICIOS PARA LA PREDICCIÓN DE RESISTENCIAS MECÁNICAS

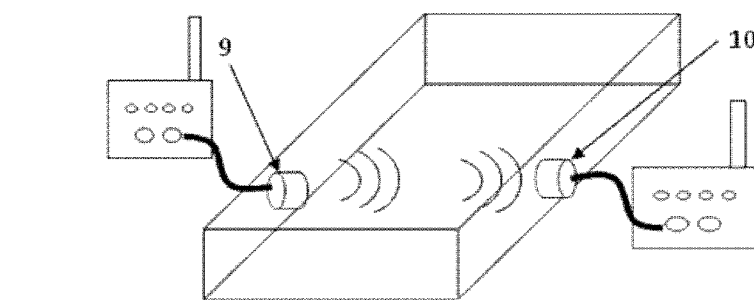


FIG. 8

(57) Abstract: The invention relates to a wireless system for measuring the degree of setting and hardening of cementitious materials, comprising an ultrasonic sensor, a temperature sensor, a relative humidity sensor, a wireless communication network consisting of at least two nodes for the acquisition and processing of electronic signals from sensors, and a computer system, the computer system calculating the mechanical resistance of the cementitious material. The method comprises the following steps: capturing temperature Ty and humidity H data; capturing an ultrasonic signal for the measurement of propagation speed V; capturing an ultrasonic signal for the measurement of the reflection coefficient CR; sending all of the previous records of the sensory signals to the main node; processing the signals in order to obtain the speed V and reflection coefficient CR parameters; sending the data obtained to the computer system; and calculating the minimum mechanical resistance $R_c(V, CR, T, H)$ of the cementitious material.

(57) Resumen:

[Continúa en la página siguiente]





Construcción, Avenida Benjamín Franklin, 17, E-46980 PATERNA (Valencia) (ES). **CISCAR MARTÍNEZ, Vicent** [ES/ES]; Asociación de Investigación de Industrias de la Construcción - AIDICO - Instituto Tecnológico de la Construcción, Avenida Benjamín Franklin, 17, E-46980 Paterna (Valencia) (ES). **ALBERT PÉREZ, Vicente** [ES/ES]; Asociación de Investigación de Industrias de la Construcción - AIDICO - Instituto Tecnológico de la Construcción, Avenida Benjamín Franklin, 17, E-46980 Paterna (Valencia) (ES).

(74) **Mandatario:** **UNGRIA LÓPEZ, Javier**; Avenida Ramón y Cajal, 78, E-28043 Madrid (ES).

(81) **Estados designados** (*a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección nacional admisible*): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,

NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) **Estados designados** (*a menos que se indique otra cosa, para toda clase de protección regional admisible*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

- con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))
- antes de la expiración del plazo para modificar las reivindicaciones y para ser republicada si se reciben modificaciones (Regla 48.2(h))

El sistema inalámbrico de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios comprende un sensor ultrasónico, un sensor de temperatura, un sensor de humedad relativa, una red de comunicación inalámbrica compuesta por al menos dos nodos para la adquisición y procesamiento de señales electrónicas provenientes de sensores y un sistema informático, tal que el sistema informático calcula la resistencia mecánica del material cementicio. Por otro lado, el método comprende los siguientes pasos: capturar unos datos de temperatura Ty humedad H, capturar una señal ultrasónica para la medida de velocidad de propagación V, capturar una señal ultrasónica para la medida del coeficiente de reflexión CR, enviar todos los registros anteriores de las señales sensoriales al nodo principal, procesar las señales para obtener los parámetros velocidad V y coeficiente de reflexión CR, enviarlos datos obtenidos al sistema informático y calcular la resistencia mecánica mínima R_c (V,CR,T,H) del material cementicio.

- 1 -

PROCEDIMIENTO Y SISTEMA INALÁMBRICO DE MEDIDA DEL GRADO
DE FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO DE MATERIALES CEMENTICIOS
PARA LA PREDICCIÓN DE RESISTENCIAS MECÁNICAS.

5 OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un procedimiento y sistema inalámbrico de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios para la predicción de resistencias mecánicas.

10 La invención se encuadra en la Instrumentación para la Medida de las propiedades de los materiales. El sector de aplicación de la invención es la Construcción principalmente el control de calidad, tanto en la industria del prefabricado como en obra.

15 ANTECEDENTES DE LA INVENCION

El primer uso de una tecnología para el control de fraguado-curado se realizó a partir de la monitorización de la temperatura interna en el material cementicio. La temperatura refleja cuando se producen las reacciones de hidratación durante el fraguado [Radjy et al., 94] [Parrot et al., 90]. Esta monitorización resulta incompleta, dado que aunque identifica el tiempo en que se producen las reacciones no permite evaluar la proporción de compuestos hidratados o la cantidad de cemento anhidro sobre el volumen total. Uno de los métodos más usados es el método de maduración, "The Maturity Method", el cual ha sido ampliamente utilizado en la bibliografía para monitorizar el curado. En el método de maduración [Carino, 84], [Pane, 02] se mide la variación de la temperatura durante la hidratación del hormigón para predecir la evolución de la

20

25

30

- 2 -

resistencia a compresión. La mayor limitación de este método se debe a que además de variar la relación con cada composición del material cementicio, esta relación es muy sensible a la temperatura y humedad existentes en el proceso real, variables que pueden ser muy diferentes a las estudiadas en el laboratorio.

Otros métodos que se han utilizado son los basados en la medida mediante penetrómetro o micro-penetrómetro [ASTM 99], con el sistema denominado VICAT. Este sistema permite medir mediante indentaciones la profundidad de indentación y establecer el principio y el final del fraguado. Este método solo puede ser utilizado en pastas de cemento, ya que las probabilidades de pinchar en un árido en un hormigón son muy altas y resultaría medidas que introducirían un error significativo.

Los métodos basados en ultrasonidos son aptos para la monitorización del curado ya que la propagación de estas ondas mecánicas en el material estudiado nos puede aportar un buen conocimiento del medio investigado. Por ejemplo, parámetros tales como el tiempo de vuelo, la atenuación, la variación del coeficiente de reflexión o el contenido en frecuencia de las ondas ultrasónicas están estrechamente relacionados con las propiedades mecánicas del material, en particular en el periodo de formación (setting) y endurecimiento (hardening). Si estos parámetros se monitorizan a lo largo de todo el proceso pueden aportar una información muy útil para comprender la evolución del material. Debido a la potencia de los sistemas informáticos actuales de bajo coste es posible extraer, en tiempo real, de las señales ultrasónicas otros parámetros de interés como energía, relaciones tiempo-frecuencia (wavelets) etc. que necesitan una carga de procesamiento elevada. Por estas

- 3 -

causas el uso de ultrasonidos se presenta como uno de los medios más prometedores para obtener una buena información del periodo de setting y hardening, obteniendo los datos directamente en obra.

5 Los estudios más relevantes en los que se evalúa la capacidad que tienen los ultrasonidos de monitorizar el curado son los que utilizan dispositivos específicos de medidas y que monitorizan parámetros como:

- Velocidades de propagación de ondas longitudinales y transversales, [Reinhardt et al., 04] [Voight et al., 06].
- 10 - Potencia transmitida [Trtnik et al., 09].
- Coeficiente de reflexión [Subramaniam et al., 02], [Acalla et al., 03]

Para las dos primeras se utilizan medidas de transmisión de las ondas ultrasónicas, con los sensores colocados alineados y enfrentados en las paredes de la celda de medida, donde se cura el material, el diseño de estas celdas solo permite medir el curado en pastas de cemento. El tercer parámetro utiliza una configuración en pulso/eco para medir la variación del coeficiente de reflexión de las ondas ultrasónicas cuando éstas se propagan entre dos materiales con diferentes impedancias acústicas. En este caso, se utiliza una pieza de material homogéneo, isótropo, del que se conozca sus propiedades de propagación de las ondas longitudinal y transversal y que una de sus caras esté pulida y plana para que funcione como interfase con el material cementicio.

En la década de los 90 se comenzó la investigación y desarrollo de la tecnología de redes inalámbricas (WSN) que permiten integrar sensores para monitorizar el estado de las estructuras (Structural Health Monitoring, SHM) [Phares et al., 05]. Numerosas publicaciones fueron dedicadas al

- 4 -

estudio de WSN para la evaluación de la integridad estructural [Santana et al., 06- Grosse et al., 06] y un exhaustivo análisis del estado del arte de estas redes para su utilización en la monitorización de estructuras puede encontrarse en [Lynch et al., 06].

En la literatura, muchos trabajos han estudiado el uso de la velocidad ultrasónica para la monitorización del proceso de curado y su relación con las medidas de la temperatura y humedad [Robeyst et al., 08; DelRío et al., 04]. Pero la mayoría de estos trabajos no usan redes inalámbricas. Entre los trabajos que usan redes inalámbricas ninguno se centra en el procedimiento de medición del fraguado [Aparicio et al., 10].

En lo que concierne a publicación de patentes, diferentes publicaciones de sistemas de monitorización usando ultrasonidos han aparecido en los últimos años para su aplicación en diversos campos, como por ejemplo en medicina [Peszynski et al., 10]. En lo que respecta a materiales cementicios, varias patentes han sido publicadas usando WSN [Hines et al., 07; Andrews, 08], pero ninguna se centra en los procesos de fraguado y endurecimiento de dichos materiales.

[Radjy et al., 94] Radjy, F.F. and Douglas, W.V., "Heat signature testing of concrete", in Scandella, R.J. (ed.) Structural Materials Technology: An NDT Conference (CRC Press, 1994).

[ASTM 99] ASTM C403/C403M-99, "Standard test method for time of setting of concrete mixtures by penetration resistance", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1999.

- 5 -

[Carino, 84] Carino, N-J. "The maturithy method: theory and application", Cement, Concrete and Aggregates 6 (2) (1984) 61-73.

[Pane et al, 02] Pane, I., and Hansen, W., "Concrete
5 Hydration and Mechanical Properties Under Nonisothermal Conditions," ACI Materials Journal 99 (6) (2002), 534-542.

[Parrot et al., 90]. Parrott, L.J., et al., D., "Monitoring Portland cement hydration: Comparison of methods", Cement and Concrete Research 20 (6) (1990), 919-926.

10 [Reinhardt et al., 04] Reinhardt H.W. and Grosse C.U., "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete", Construction and Building Materials 18 (3) (2004) 145-154.

[Voight et al., 06] Voigt T., et al., "Green and early age
15 compressive strength of extruded cement mortar monitored with compression tests and ultrasonic techniques", Cement and Concrete Research 36 (5) (2006) 858-867.

[Trtnik et al., 09] G. Trtnik et al. "Comparison between
20 two ultrasonic methods in their ability to monitor the setting process of cement pastes", Cement and Concrete Research 39 (2009) 876-882.

[Subramaniam et al., 02] Subramaniam K. V. et al., "Ultrasonic technique for Monitoring Concrete Strength", ACI Materials Journal 99, (5), (2002) 458-462.

25 [Acalla et al., 03] Y. Akkaya et al. "Nondestructive measurement of concrete strength gain by an ultrasonic wave reflection method", Materials and Structures 36, (2003) 507-514

[Phares et al., 05] Phares B.M., et al., "Health Monitoring
30 of Bridge Structures and Components Using Smart Structure Technology, Wisconsin Highway Research Program" Project #0092-01-14, 257 pp, 2005.

- 6 -

[Santana et al., 06] Santana-Sosa, H., et al., "Validation of a HF Spread Spectrum MultiCarrier Technology through real Link Measurements. European Transactions on Telecommunications (ETT)".17 (6) (2006) 651-657.

- 5 [Grosse et al., 06] Grosse, C.U. and Krüger, M., "Inspection and Monitoring of Structures in Civil Engineering". NDT.net, 11 (1) 2006.

[Lynch et al., 06] Lynch, J.P. and Loh, K.J., "A Summary Review of Wireless Sensors and Sensors Networks for
10 Structural Health Monitoring". The Shock and Vibration Digest, 38 (2), (2006) 91-126.

[Robeyst et al., 08] Robeyst, N., et al., "Monitoring the setting of concrete containing blast-furnace slag by measuring the ultrasonic p-wave velocity", Cement and
15 Concrete Research, 38 (10), (2008) 1169-1176.

[Öztürk et al., 06] Öztürk, T., et al., "Improved ultrasonic wave reflection technique to monitor the setting of cement-based materials", NDT & E International, 39 (4), (2006) 258-263.

- 20 [DelRío et al., 04] Del Río, L.M., et al., "Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing", Ultrasonics, 42 (1-9), (2004) 527-530.

[Aparicio et al., 10] Aparicio, S., et al., "A wireless monitoring system to study the setting and hardening
25 processes of cementitious materials". NDT.net The e-Journal of Nondestructive Testing, 7 (2010) (10th European Conference on NDT, ECNDT 2010, Moscow, Russia, 2010).

[Peszynski et al., 10] Peszynski, M. et al., "Wireless ultrasound monitoring device", WO/2010/020939, 2010.

- 30 [Hines et al., 07] Hines, Jacqueline, H.; "Concrete maturity monitoring system using passive wireless surface acoustic wave temperature sensors", WO/2007/025172, 2007.

- 7 -

[Andrews, 08] Andrews, D. R.; "Hand-held ultrasonic inspection device with wireless communication means", EP20060253785, 2008.

5

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

Para la forma de realización preferida de la invención, el sistema inalámbrico de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios para la predicción de resistencias mecánicas de la presente invención comprende:

- al menos un sensor ultrasónico "SUS" para monitorizar unos parámetros elásticos de un material cementicio;
- 15 • al menos un sensor de temperatura "ST";
- al menos un sensor de humedad relativa "SH" que conjuntamente con el sensor de temperatura monitorizan unos parámetros energéticos/medioambientales;
- 20 • una red de comunicación inalámbrica "RIS" compuesta por al menos dos nodos para la adquisición y procesamiento de señales electrónicas provenientes de sensores;
- un sistema informático conectado al sensor de temperatura, al sensor de humedad relativa y al sensor ultrasónico vía la red de comunicación inalámbrica;
- 25

tal que el sistema informático calcula una resistencia mecánica del material cementicio a partir de los parámetros

- 8 -

elásticos y los parámetros energéticos/medioambientales monitorizados.

En otra realización de la invención el sistema inalámbrico adicionalmente comprende un sistema de acoplamiento "AS" del sensor ultrasónico, del sensor de temperatura y del sensor de humedad relativa al material cementicio.

Para cualquiera de las formas de realización anteriores, el sistema inalámbrico adicionalmente comprende una unidad de calibración que lleva a cabo un procedimiento de calibración para la determinación del estado del fraguado y endurecimiento "CEFE".

Los parámetros elásticos están comprendidos por una velocidad de propagación "V" y un coeficiente de reflexión "CR" y los parámetros energéticos/medioambientales están comprendidos por una temperatura "T" y una humedad "H".

El sistema informático comprende un nodo principal y al menos un nodo secundario tal que el nodo principal recoge todos los datos del nodo secundario y los envía al sistema informático para su almacenamiento y procesamiento.

El sistema informático comprende un microcontrolador por cada nodo comprendido en la red inalámbrica, donde el microcontrolador comprende medios de implementación del sensor ultrasónico, del sensor de temperatura y del sensor de humedad relativa. Los medios de implementación para el sensor ultrasónico adicionalmente comprenden:

- un módulo de potencia para proporcionar la suficiente energía como para soportar dos módulos de emisión-recepción ultrasónica de baja tensión;
- un módulo de sincronización ultrasónica que sincroniza la emisión-recepción ultrasónica,

- 9 -

incluso de manera inalámbrica entre diferentes nodos de la red;

- un sistema de contadores temporales por cada nodo para determinar el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica con precisión mejor que las décimas de milisegundo.

Por otro lado, el procedimiento de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios para la predicción de resistencias mecánicas para el sistema definido en una cualquiera de las formas de realización anteriores, comprende los siguientes pasos:

- capturar unos datos de temperatura T y humedad H mediante el sensor de temperatura "ST" y generar un registro T/H;
- capturar una señal ultrasónica para la medida de velocidad de propagación V mediante el sensor ultrasónico "SUS" y generar un registro V;
- capturar una señal ultrasónica para la medida del coeficiente de reflexión CR mediante el sensor ultrasónico SUS y generar un registro CR;
- enviar todos los registros anteriores de las señales sensoriales al nodo principal;
- procesar las señales para obtener los parámetros velocidad V y coeficiente de reflexión CR.
- enviar los datos obtenidos al sistema informático;
- calcular la resistencia mecánica mínima $R_c(V, CR, T, H)$ del material cementicio mediante la expresión:

$$R_c(V, CR, T, H) = \min(R_c(V), R_c(CR), R_c(T, H))$$

- 10 -

5 donde $R_c(V) = a \cdot \exp(b \cdot V)$, donde a y b son unos parámetros de ajuste; $R_c(CR) = a \cdot \exp(-b \cdot CR)$ donde a y b son unos parámetros de ajuste; y donde $R_c(T, H) = R_{\max}((k_{T,h}(t-t_0)/(1+(k_{T,h}(t-t_0))))$ tal que $R_{\max}$ es la resistencia final, $k_{T,h}$ es la constante de la reacción dependiente de T y h , y t_0 el instante de comienzo de la hidratación.

10 La forma de calcular los parámetros anteriores se encuentra en detalle en el apartado de *descripción de una forma de realización de la invención*.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

15 La figura 1 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 2 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 3 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

20 La figura 4 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 5 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

25 La figura 6 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 7 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 8 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

30 La figura 9 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

- 11 -

La figura 10 muestra un diagrama de bloques de acuerdo con la presente invención.

La figura 11 muestra un dispositivo de forma cónica para acoplar los sensores de temperatura y humedad.

5 La figura 12 muestra una gráfica de la velocidad ultrasónica en m/s frente al tiempo en horas.

La figura 13 muestra una gráfica del coeficiente de reflexión CR frente al tiempo en horas.

10 La figura 14 muestra dos gráficas de la temperatura (°C) y la humedad (%) frente al tiempo en horas.

La figura 15 muestra una gráfica de la resistencia a la compresión (MPa) frente a la velocidad ultrasónica (m/s).

15 La figura 16 muestra una gráfica de la resistencia a la compresión (MPa) frente al tiempo fraguado (horas) para calcular el ajuste de la resistencia a la compresión.

La figura 17 muestra una gráfica de la velocidad ultrasónica (m/s) frente al tiempo fraguado (horas) para calcular el ajuste de la velocidad.

20 La figura 18 muestra una gráfica para el cálculo del CR a partir de la señal tomada con el dispositivo sensor de la figura 5, se obtiene un tipo de señal con ecos claros procedentes del rebote o reflexión con el MR; se realiza la transformada de Fourier de las señales de los ecos
25 adecuadamente inventanados.

La figura 19 muestra una gráfica de la resistencia a la compresión (MPa) frente al coeficiente de reflexión.

La figura 20 muestra un diagrama de bloques donde la RIS está estructurada en una topología lineal.

30 La figura 21 muestra un diagrama de bloques donde la RIS está estructurada en una topología en árbol.

- 12 -

DESCRIPCIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

Con objeto de llegar a una mejor comprensión del objeto y funcionalidad de la presente invención, a continuación se detalla una forma de realización de la presente invención en referencia a las figuras, sin que ello suponga limitación alguna del alcance de la presente invención.

Aquí se presenta un sistema y metodología que permite medir el grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios. Para ello este sistema comprende sensores ultrasónicos (SUS) (1) y sensores de temperatura y humedad relativa (STH) (3,4).

Mediante los sensores ultrasónicos se pueden medir los parámetros elásticos del material a medida que se produce el proceso de fraguado. Los parámetros analizados son la velocidad y el coeficiente de reflexión (en adelante CR) en una interfase con un material de referencia, en adelante (MR). A través de las medidas de velocidad ultrasónica y del CR el sistema es capaz de predecir la resistencia a la compresión del material durante los procesos de fabricación, manipulación y corte. Estos sensores ultrasónicos van dispuestos de un mecanismo que permite acoplar los transductores al material que se desea monitorizar (FIG.1, 2, 3, 4 para la medida de la velocidad y FIG. 5 para el CR).

Mediante los sensores de temperatura (ST) y humedad (SH), se pueden medir tanto los parámetros medioambientales, que son esenciales en este proceso, así como el gradiente existente entre el medio ambiente y el interior del material y que afectan al proceso de fraguado-curado de los materiales cementicios.

- 13 -

Para recoger los datos medidos por los diferentes sensores, el sistema consta de una red inalámbrica de motas o nodos compuesta por dos o más dispositivos (FIG. 6) que se comunican por radio (16) provistas de un microprocesador
5 equipado con los diferentes sensores.

El sistema está especialmente indicado para su funcionamiento "in situ" por lo que puede ser usado para monitorizar los procesos de fraguado y endurecimiento del hormigón tanto en obra como en empresas de prefabricación.

10 En ambos casos uno de los objetivos del sistema es determinar el momento en el que el material ha alcanzado la resistencia suficiente, para ser manipulado en el caso de los prefabricados, o bien para proseguir la construcción en el caso de las obras. Otro objetivo también importante es
15 asegurar la calidad y uniformidad del material a medida que se está fraguando. El cumplimiento del primer objetivo va a redundar en la mejora de la rentabilidad del proceso y el segundo en un control de calidad de los materiales fabricados, con lo que se abrirá una línea de trabajo de
20 desarrollo de normativa específica con la adopción de esta invención, de interés para el sector de aplicación.

Por tanto, el problema técnico a resolver es monitorizar el proceso de fraguado de materiales cementicios ya sea "en obra" o en las empresas de
25 prefabricados. Existe suficiente conocimiento científico, aunque todavía incompleto, para determinar el estado del material en este proceso mediante técnicas no destructivas, pero la principal problemática a resolver viene determinada por las duras y cambiantes condiciones a las que están
30 expuestas estos materiales y donde tiene lugar la monitorización. En la fabricación de los materiales cementicios interviene agua, cemento, polvo, piedras,

- 14 -

hierro, soldaduras, cortes, movimiento de pequeña y gran maquinaria, etc., además normalmente se realiza a la intemperie y una mayoría de las veces interviene personal con poca cualificación. Difícilmente se encontrará un
5 ambiente donde las condiciones de operación sean tan duras y cambiantes. Aunque existen múltiples formas de fabricar este tipo de materiales se pueden distinguir dos procesos de fabricación con requerimientos diferentes, en obra y en empresas de prefabricado. En el primero, se buscan
10 monitorizar grandes estructuras, con formas y condiciones muy diferentes, pero que una vez situados los sistemas de monitorización permanecen fijos hasta que acaba el proceso de fraguado. En las empresas de prefabricado las estructuras a monitorizar son generalmente de menor tamaño
15 que en obra y con formas más limitadas, pero a menudo no se encuentran en un sitio fijo sino que se mueven y manipulan para optimizar el proceso de fabricación. En el primer caso todavía es posible utilizar sistemas de monitorización cableados, pero es en la práctica inviable utilizarlos en
20 el segundo. Por ejemplo, para fabricar un tubo o marco de hormigón para grandes caudales, primero se vierte el material en fresco en una zona de la fábrica donde se encuentran las mezcladoras y los encofrados con su correspondiente sistemas de vibración. Una vez desmoldados
25 se trasladan a una zona próxima y resguardada de la intemperie, aunque en ambiente no controlado donde permanecen durante al menos 24 horas, tiempo en principio suficiente para que alcancen la resistencia necesaria para ser manipulados con garantía. Pasado ese tiempo los marcos
30 son transportados a otro lugar, normalmente a la intemperie donde permanecerán el tiempo suficiente hasta alcanzar la resistencia necesaria para su traslado e instalación en

- 15 -

servicio. Sin embargo, en ocasiones, el hormigón no alcanza la resistencia esperada en cada una de las etapas, ya sea por defecto de fabricación o por un cambio en las condiciones medioambientales, y al mover o manipular los marcos se parten o agrietan. En el mejor de los casos estas deficiencias se detectan rápidamente, con lo que únicamente se pierde una parte de la producción y en el peor cuando ya se encuentra instalado y funcionando con lo que la pérdida puede llegar a ser considerable. Esta problemática se puede evitar con el sistema y procedimiento objeto de esta patente, pues la monitorización permite estudiar cuáles son las condiciones que hacen que esto ocurra y detectar este problema antes de mover los elementos prefabricados en cuestión. En el caso de las obras, el problema es equivalente, pues el sistema detecta cuando la estructura ha alcanzado la resistencia necesaria, pero como ya hemos comentado las condiciones de utilización no son las mismas.

El sistema está compuesto por tres tipos de sensores (SUS, ST, SH), los sistemas de acoplamiento de los sensores al material (AS), el procedimiento de calibración para la determinación del estado del fraguado y endurecimiento (CEFE) y por una red de comunicación inalámbrica compuesta por nodos que permiten adquirir y procesar señales electrónicas provenientes de sensores (RIS).

1. Sensores:

- a) Ultrasónicos: Adecuados a la transmisión de ondas ultrasónicas en el material cementicio, en principio las frecuencias válidas para este tipo de materiales se encuentran en el rango 40-500 kHz en el caso de medidas en transmisión para la medida de velocidad y

- 16 -

en el rango de 400-1000 kHz para el caso de pulso/eco para la determinación del CR. Para la medida de la velocidad se utilizan transductores de ondas longitudinales y para el CR transductores de ondas transversales. No obstante, estos rangos dependerán del material analizado. El diámetro de los sensores puede ser también variable pero lo ideal es que estén entre 25 y 50 mm.

Para la medida del CR se utiliza un dispositivo formado por los transductores ultrasónicos y el MR. En el caso del hormigón, el dispositivo consiste en un cilindro de 8 cm de eje axial y 6 cm de diámetro con un corte de 3 mm de profundidad y 1 mm de espesor a modo de hendidura en la base superior. La base superior consta de dos planos inclinados con ángulos de 2°, en los cuáles se colocan los SUS, actuando uno de emisor y otro de receptor para recoger las reflexiones directas en la interfase entre el MR y el hormigón. En el caso de la medida del CR en pastas de cemento y morteros bastará con utilizar un SUS colocado en un cubo de MR de 3 cm de arista.

b) Temperatura: El rango de temperaturas es el necesario para el medio ambiente entre -20°C y 70°C. Los sensores deberán ser de tamaño reducido y que se puedan acoplar a los microcontroladores de los nodos de las redes.

c) Humedad: Se necesitan sensores de medida de humedad relativa de tamaño reducido y que se puedan acoplar a los microcontroladores de los nodos de las redes.

2. Acoplamiento:

- 17 -

a) Sensores ultrasónicos: Se utilizan dos tipos de acoplamiento:

- Acoplamiento seco directo (FIG.7): Los transductores ultrasónicos (1) tienen una capa adaptadora (7) compuesta de silicona sólida con pequeñas protuberancias semiesféricas (8) de modo que permite un buen acoplamiento en superficies rugosas como las de hormigón. Además se requiere de un sistema mecánico que permite sujetar firmemente los transductores al hormigón con una presión constante. El sistema de sujeción varía según la forma de la estructura y la posición deseada del sensor ultrasónico. Para zonas con apoyo horizontal bastará con que el sistema de acoplamiento tenga un peso determinado para generar la presión deseada (5). En zonas donde no sea posible tener un apoyo horizontal (FIG.1) la presión sobre los transductores (1) la ejercerá un muelle precargado (2) de tal manera que se ejerza la presión suficiente para obtener un correcto acoplamiento independientemente de la posible retracción del material. La presión ejercida deberá estar calibrada para que no deforme el material en el momento que se aplique. También es posible acoplar el sensor en las piezas de encofrado en vez de directamente en el material. En este caso solo será válido en las primeras horas del proceso ya que la retracción del material lo separará del encofrado del hormigón impidiendo que la señal ultrasónica llegue al material. Para elementos estructurales que se construyen en pista en continuo, como por ejemplo viguetas o placas alveolares, se puede usar un mecanismo fijado a la pista por cada lado y con los transductores a ambos lados de la pieza (FIG.2, FIG.8). También se puede usar un sistema donde uno de los transductores usa la pista para transmitir/recibir la señal mientras el otro se encuentra

- 18 -

en contacto con el material (FIG.3). En este caso, los transductores son acoplados al material y a la pista usando un peso determinado para generar la presión deseada (5). La energía emitida por el transductor (9) se transmitirá a la pista y esta energía será a su vez transmitida a través del material a caracterizar hasta el transductor receptor (10) (FIG.9). Para probetas de hormigón se puede usar un sistema en forma de U con un tornillo en un lateral (6) con el que se ajustan los transductores al material (FIG.4).

Para el caso de CR se utilizará un acoplamiento directo que consiste en introducir ligeramente el dispositivo en el material cementicio inmediatamente después de su fabricación, habrá que garantizar que transcurra el menor tiempo posible entre la fabricación y la colocación del dispositivo.

- Acoplamiento húmedo (FIG.10): Este tipo de acoplamiento se utilizará cuando se quiera utilizar la armadura de acero (11) de la estructura como sistema emisor. Para ello se utilizará un depósito de forma troncocónica (12) con un líquido viscoso, que no ataque a la armadura, y, produzca una inmersión local de la armadura y además actúe como guía de ondas de manera que la mayor parte de la energía emitida por el transductor (9) se transmita a la armadura. Esta energía se transmitirá a través del material a caracterizar hasta el transductor receptor (10). Los nodos de la RIS, emisor (13) y receptor (14), deberán estar convenientemente sincronizados para que la señal emitida sea adecuadamente recibida y se pueda medir su tiempo de vuelo con precisión suficiente.

b) Sensores de Temperatura y Humedad.

- 19 -

Para acoplar los sensores de temperatura y humedad se utilizará un dispositivo de forma cónica (FIG.11) que permita crear una pequeña cámara en el interior del material de manera que tenga prácticamente la misma humedad y temperatura del material pero que no tenga contacto directo con el sensor. De esta manera se pueden recuperar los sensores y evitamos que el agua presente en el material sature e inutilice el sensor de humedad. Esta pequeña cámara puede permanecer en la estructura ya que su pequeño tamaño no compromete su integridad (3). El material del que está compuesta la cámara puede ser plástico o metálico y tendrá una o más cavidades selladas (15) con un tejido hidrófugo de manera que permita pasar la humedad pero no el agua. La profundidad a la que se introduce la cámara es variable dependiendo del grosor de la estructura pero en principio bastará con escasos centímetros (2 o 3) para obtener una buena referencia del proceso de fraguado. Para medir la temperatura y humedad ambiente se utilizará una cámara análoga (4) a la introducida en el material para que las medidas sean comparables.

3. Procedimiento de calibración para la determinación del estado del fraguado y endurecimiento (CEFE).

El procedimiento de calibración de los sistemas objeto de esta patente se basará en una experimentación inicial donde se fabricarán varias probetas cúbicas para monitorizar y adquirir las curvas de variación de la velocidad ultrasónica (FIG.12), del CR (FIG.13) y de la temperatura y humedad del material y ambiental durante el proceso de fraguado (FIG.14). A la vez que se monitoriza se realizarán ensayos de resistencia obteniendo por tanto una

- 20 -

correlación entre las curvas de fraguado y las resistencias del hormigón (FIG.15).

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN (V)

5 No existe una fórmula general y única entre la velocidad de propagación y la resistencia a compresión de los materiales cementicios. Las diferentes expresiones empíricas que hay disponible en la literatura son válidas solo para el material a partir del cual se extrajeron. Otra
10 forma de extraer esta relación es a partir de las reacciones de hidratación del cemento, una de las formulaciones más utilizadas es la desarrollada por Knudsen la cual describe el desarrollo de la hidratación con el tiempo mediante una relación exponencial.

15 El procedimiento de calibración considerado en este sistema relacionará la velocidad y la resistencia para un material determinado usando diferentes versiones de la ecuación de Knudsen para el ajuste inicial de la resistencia y de la velocidad. Primero se mide la velocidad
20 ultrasónica y la resistencia durante el tiempo de puesta en servicio (T_s), tiempo necesario para que el material tenga la resistencia suficiente para que pueda ponerse en obra. Una vez obtenidos estos datos, se ajusta la resistencia con la siguiente fórmula:

25
$$R_c(t) = \exp\left(\frac{b \cdot t^2}{a + t^2 + t} + c\right) \quad (1)$$

con los datos recogidos hasta el tiempo T_s (FIG.16) y donde a , b y c son parámetros de ajuste. Después se ajusta la velocidad con la siguiente fórmula:

- 21 -

$$V(t) = \frac{b \cdot t^2}{a + t^2 + t} + c \quad (2)$$

con los datos recogidos hasta el tiempo de manipulación (Tm), tiempo necesario para que el material haya alcanzado una resistencia suficiente para que se pueda desencostrar, destensar las armaduras, cortar, trasladar, etc. (FIG.17). Finalmente se despeja el tiempo en función de la velocidad y se calcula la resistencia en función de la velocidad (FIG.15). Así obtenemos la relación entre resistencia y velocidad.

$$R_c(V) = a \cdot e^{b \cdot V} \quad (3)$$

COEFICIENTE DE REFLEXION (CR)

El parámetro CR precisa de una calibración previa del dispositivo sensor al aire, considerando el aire como reflector ultrasónico perfecto y estable se obtiene el valor de CR₀ o de referencia, que habrá que corregir en la medida de monitorización real sobre el material. Este valor será muy próximo a 1. Para el cálculo del CR a partir de la señal tomada con el dispositivo sensor de FIG.5, se obtiene un tipo de señal con ecos claros procedentes del rebote o reflexión con el MR; se realiza la transformada de Fourier de las señales de los ecos adecuadamente inventanados, FIG.18, según la ecuación:

$$CR(t) = \frac{|FFT(Eco2(t))|}{|FFT(Eco1(t))|} \quad (4)$$

La ecuación que describe la variación del CR en función del tiempo t muestra un ajuste exponencial decreciente descrito a partir de la siguiente ecuación:

- 22 -

$$CR(t) = a \cdot e^{-b \cdot t} + c \cdot e^{-d \cdot t} \quad (5)$$

Donde a, b, c y d son parámetros de ajuste (FIG.13).

El cálculo se realizará para la primera y segunda reflexión y entre la segunda y tercera reflexión, tomando, finalmente, la curva que mejor coeficiente de regresión muestra. A partir de dicha curva de ajuste se obtiene una relación final entre la resistencia y el CR de tipo exponencial decreciente

$$R_c(CR) = a \cdot e^{-b \cdot CR} \quad (6)$$

donde a y b son parámetros de ajuste (FIG.19).

TEMPERATURA Y HUMEDAD (T/H)

La monitorización de la temperatura y la humedad permiten determinar cuando ha finalizado el proceso de fraguado y empieza el de endurecimiento y predecir la resistencia, mediante el método de maduración, Carino y Liao. La ganancia de resistencia es un efecto combinado del tiempo, la temperatura y la humedad. Además, las curvas de humedad permiten determinar si el fraguado se está realizando con una cantidad de agua suficiente para que adquiera las propiedades de resistencia en el tiempo necesario.

Para obtener las curvas R(t) es necesario:

- Tres temperaturas diferentes, utilizando una de ellas como temperatura de referencia, la cual será de 20°C. (Tr=20°C).
- Para cada temperatura se deberá obtener dicha curva R(t) para 3 condiciones de humedad distintas, tomando

- 23 -

como humedad de referencia el 100% de humedad relativa. ($h_r=100$).

El comportamiento de la resistencia en función del tiempo viene dado por la siguiente ecuación:

$$R = R_{\max} \frac{k_{T,h}(t-t_0)}{1+k_{T,h}(t-t_0)} \quad (7)$$

Donde, $R_{\max}$ es la resistencia final, $k_{T,H}$ es la constante de la reacción dependiente de T y h y t_0 es el instante en el que comienza la hidratación.

- 10 Además debe realizarse el siguiente ajuste, para obtener los valores de h_0 y J_u :

$$\frac{k_{Tc,h}}{k_{Tc,h_r}} = J_u \frac{k_h(100-h-h_0)}{1+k_h(100-h-h_0)} \quad (8)$$

Donde, J_u es el factor de humedad final, k_H es la constante de la reacción dependiente de h y h_0 es la humedad inicial.

- 15 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DEL PROCESO FRAGUADO Y PREDICIÓN DE PROPIEDADES FINALES.

- Una vez realizado los ensayos de calibración se obtienen 3 funciones que permiten determinar la resistencia mecánica del material a partir de la monitorización en las primeras horas del proceso. Dos de ellas (V y CR) son función de los parámetros elásticos del material y la otra (T/H) en función de parámetros energéticos y medioambientales del proceso. La determinación final de la resistencia a partir de las resistencias obtenidas con estos parámetros se determinará por las siguientes funciones, dependiendo de la necesidad de cada aplicación:

- 24 -

$$R_c(V, CR, T, H) = \min(R_c(V), R_c(CR), R_c(T, H)) \quad (9)$$

La función (9) permitirá garantizar la resistencia mínima que tendrá el material.

Mientras que la función (10) pondera linealmente los resultados de los parámetros medidos dependiendo de la calidad de los mismos

$$R_c(V, CR, T, H) = x_V \cdot R_c(V) + x_{CR} \cdot R_c(CR) + x_{TH} \cdot R_c(T, H) \quad (10)$$

siendo x_V , x_{CR} y x_{TH} los coeficientes de ponderación que por una parte deben cumplir que

10 $1 = x_V + x_{CR} + x_{TH}$; y por otra deben ser inversamente proporcionales al error cuadrático medio de las diferentes funciones en el intervalo de tiempo considerado.

Para la predicción de propiedades finales se utilizarán las funciones anteriores pero los coeficientes de ponderación podrán cambiar si el error de las diferentes funciones cambia a tiempos más largos.

4. Procedimiento de Medida mediante la Red Inalámbrica de Sensores (RIS):

20 La RIS, debe permitir incorporar tanto el "hardware" como el software para tres tipos de sensores (FIG.6): sensores ultrasónicos (SUS) (17) adecuados para la inspección de hormigón, sensores de temperatura (ST) y sensores de humedad (SH) (18). La RIS debe permitir al menos estructurarla en una topología lineal (FIG.20), y
25 preferiblemente en árbol (FIG.21). En todas las redes existe un nodo principal (19), que recoge todos los datos de los nodos secundarios (20) y lo envía a un sistema

- 25 -

informático (21) para su almacenamiento y procesamiento. Dado que el proceso de fraguado es un proceso relativamente lento, la adquisición de las señales sensoriales debe permitir una frecuencia de toma de datos de al menos 1 toma
5 por cada 2 minutos.

Cada nodo de la red inalámbrica está formado por un microcontrolador que debe tener disponibles los recursos necesarios para poder implementar el procesamiento de señal necesario para los diferentes sensores incorporados.

10 Actualmente casi todas las redes comerciales de sensores tienen la posibilidad de incorporar sensores de humedad y temperatura. Sin embargo la posibilidad de incorporar sensores ultrasónicos aptos para la inspección de hormigón requiere de una serie de características especiales:

- 15 a) Proporcionar la suficiente energía para soportar dos módulos de emisión-recepción ultrasónica de baja tensión.
- b) Que se pueda sincronizar la emisión-recepción ultrasónica, incluso de manera inalámbrica entre
20 diferentes nodos de la red.
- c) Que cada nodo tenga un sistema de contadores temporales para determinar el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica con precisión mejor que las décimas de milisegundo.

25

El procedimiento de Medida con la RIS se describe a continuación:

1. Captura de datos de temperatura y humedad.
2. Captura de señal ultrasónica para la medida de
30 velocidad de propagación.
3. Captura de señal ultrasónica para la medida de CR.

- 26 -

4. Envío de los registros de las señales sensoriales al nodo principal.
5. Procesamiento de señales para obtención de los parámetros velocidad y CR.
- 5 6. Envío de los datos obtenidos al sistema informático.
7. Aplicación de la metodología de análisis descrita en el apartado anterior para la medida de propiedades mecánicas.
8. Aplicación de la metodología de análisis para la
- 10 predicción de resistencias mecánicas finales.

El sistema está compuesto por una red de comunicación inalámbrica compuesta por 5 nodos sensorizados y un nodo conectado a un ordenador portátil (nodo base). Éste último

15 se encarga de recoger todos los datos de la red. El sistema se usa para monitorizar los procesos de fraguado y endurecimiento de varios elementos de hormigón, siendo necesario un nodo por cada punto de medida a monitorizar.

1. Sensores:

- 20 a. Ultrasónicos:
 - i. Para la medida de Velocidad de Propagación: cada 2 minutos se calcula la mediana de la velocidad de transmisión a través del material de 5 pulsos consecutivos de 40 kHz
 - 25 con una ganancia de recepción de 70 dB. Para ello cada nodo usa 2 transductores de la marca Proceq, uno de emisión y otro de recepción, de frecuencia central de 54 kHz. El diámetro de los sensores es de 50 mm.
 - 30 ii. Para la medida del CR: cada 2 minutos se realiza un promediado de 3 señales adquiridas que elimina posible ruido, con

- 27 -

una frecuencia central de inspección de 500 kHz. La tensión de ataque será pequeña, de unos 5V para transductores de banda estrecha/ancha indistintamente, como los utilizados de la marca Panametrics V151 con un diámetro de 2,54 cm y con una ganancia de 40 dB.

b. Temperatura: Cada 2 minutos se mide la temperatura en el interior del material usando 2 sensores SHT75 (Sensirion) y la temperatura ambiente.

c. Humedad: Cada 2 minutos se mide la humedad en el interior del material usando 2 sensores SHT75 (Sensirion) y la humedad ambiente.

2. Acoplamiento:

a) Sensores ultrasónicos.

Se usa un acoplamiento seco directo: Los transductores ultrasónicos tienen una capa adaptadora compuesta de silicona sólida con pequeñas protuberancias semiesféricas de 50 mm de diámetro. Con unas mordazas de dimensiones 530 x 530 mm compuestas de un muelle precargado se sujetan firmemente los transductores a la estructura marco de hormigón, con una presión constante (FIG.1).

Se usa acoplamiento directo al material para el caso de la medida CR (FIG.5).

b) Sensores de Temperatura y Humedad.

Para acoplar los sensores de temperatura en el interior del material se utiliza un dispositivo de forma cónica de plástico de medidas 50 x 10 mm (FIG.11) de manera que tenga

- 28 -

prácticamente la misma humedad y temperatura del material pero que no tenga contacto directo. Este dispositivo se introduce unos 30 mm en el hormigón recién fabricado. Cada sensor se conecta con un cable hasta el nodo inalámbrico.

5 Para medir la temperatura y humedad ambiente se utiliza una cámara análoga a la introducida en el material para que las medidas sean comparables.

3. Procedimiento de calibración para la determinación del estado del fraguado y endurecimiento (CEFE).

El nodo base se encarga de recoger todas las medidas de velocidad ultrasónica, CR, temperatura y humedad tomadas por los diferentes nodos que componen la red. Este nodo se conecta al ordenador, por el puerto serie, donde se almacenan en un fichero. Después se analizan y se construyen las curvas de variación de la velocidad ultrasónica y del diferencial entre la temperatura y humedad del material y la temperatura y humedad ambiental a medida que se produce el proceso de fraguado.

Para relacionar la resistencia con la velocidad y el CR se ha procedido de la siguiente manera. Primero se han fabricado probetas de hormigón de 15 x 15 x 15 cm, las cuales se han monitorizado durante 120 horas (=Ts) con sensores ultrasónicos, de temperatura y humedad y además se ha medido la resistencia a compresión a 4, 8, 12, 16, 20, 24, 30, 50.5 y 119 horas.

Se ha ajustado la resistencia y la velocidad usando las ecuaciones (1) y (2) respectivamente y considerando los datos de las 120 horas en el caso de la resistencia y de las primeras 24 horas (=Tm) en el caso de la velocidad. A partir de estos datos se ha obtenido la relación entre la

- 29 -

velocidad y la resistencia usando la ecuación (3) y el error cometido.

A partir de las señales tomadas con el dispositivo sensor, FIG.5, se calculo el CR según ecuación (4). Se ha
5 ajustado el CR usando la ecuación (5) y considerando los datos hasta 48 horas ya que, posteriormente, el parámetro CR varía más lentamente. A partir de estos datos se ha obtenido la relación entre el CR y la resistencia usando la ecuación (6).

10 Para la calibración de la temperatura y la humedad se han utilizado 3 temperaturas, 12°C, 20°C y 40°C, y 3 humedades relativas, 100%, 60% y 40%, y unos tiempos de rotura para la resistencia a compresión de 24h, 48h, 7 días y 28 días. Se ha ajustado la resistencia usando las
15 ecuaciones 7 y 8.

4. Procedimiento de medida mediante la Red Inalámbrica de Sensores (RIS):

Cada nodo de la red inalámbrica tiene unas dimensiones
20 de 100 x 20 x 40 mm y está compuesto por un microcontrolador Atmega128, un chip de radio CC1000 a 433 MHz de frecuencia, un sensor ultrasónico de emisión y otro de recepción, un puerto serie y 1 conector de 51 pines. Una tarjeta de adquisición de datos es usada con cada nodo para
25 conectar los sensores de temperatura y humedad. Para obtener un mayor rango de cobertura, cada nodo dispone de una antena de dimensiones 143 x 10 mm. Estos dispositivos funcionan con 2 baterías AA. Para proteger los nodos que componen la red se encapsulan en cajas de dimensiones 120 x
30 40 x 60 mm

- 30 -

La adquisición de las señales sensoriales se realiza cada 2 minutos. Cada nodo actuará como emisor y receptor del pulso ultrasónico a través del material.

5 Se coloca un nodo en cada marco de hormigón monitorizado y el nodo base tiene que estar dentro del rango de cobertura de al menos 1 de los nodos. Usando una topología de árbol, FIG.21, la información de cada nodo es recibida por la base.

10 DETERMINACIÓN DEL ESTADO DEL PROCESO FRAGUADO Y PREDICIÓN DE PROPIEDADES FINALES

Para la determinación del estado de proceso de fraguado se utilizarán las funciones 9 o 10. En el caso de
15 la monitorización de los marcos de hormigón se utilizo la función 9 para determinar la resistencia mínima para mover el marco de la zona de fabricación a la zona de almacenaje.

REIVINDICACIONES

5 1.- Sistema inalámbrico de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios para la predicción de resistencias mecánicas que comprende:

- al menos un sensor ultrasónico "SUS" para monitorizar unos parámetros elásticos de un material cementicio;

- al menos un sensor de temperatura "ST";
- al menos un sensor de humedad relativa "SH" que conjuntamente con el sensor de temperatura monitorizan unos parámetros energéticos/medioambientales;

- una red de comunicación inalámbrica "RIS" compuesta por al menos dos nodos para la adquisición y procesamiento de señales electrónicas provenientes de sensores;

- un sistema informático (21) conectado al sensor de temperatura, al sensor de humedad relativa y al sensor ultrasónico vía la red de comunicación inalámbrica;

tal que el sistema informático (21) calcula una resistencia mecánica del material cementicio a partir de los parámetros elásticos y los parámetros energéticos/medioambientales monitorizados.

2.- Sistema inalámbrico según la reivindicación 1, caracterizado porque adicionalmente comprende un sistema de acoplamiento "AS" del sensor ultrasónico, del sensor de

- 32 -

temperatura y del sensor de humedad relativa al material cementicio.

3.- Sistema inalámbrico según la reivindicación 1 o 2,
5 caracterizado porque adicionalmente comprende una unidad de calibración que lleva a cabo un procedimiento de calibración para la determinación del estado del fraguado y endurecimiento "CEFE".

10 4.- Sistema inalámbrico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque los parámetros elásticos están comprendidos por una velocidad de propagación "V" y un coeficiente de reflexión "CR" y porque los parámetros energéticos/medioambientales están
15 comprendidos por una temperatura "T" y una humedad "H".

5.- Sistema inalámbrico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el sistema informático (21) comprende un nodo principal (19) y
20 al menos un nodo secundario (20) tal que el nodo principal (19) recoge todos los datos del nodo secundario y los envía al sistema informático (21) para su almacenamiento y procesamiento.

25 6.- Sistema inalámbrico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el sistema informático (21) comprende un microcontrolador por cada nodo comprendido en la red inalámbrica, donde el microcontrolador comprende medios de implementación del
30 sensor ultrasónico, del sensor de temperatura y del sensor de humedad relativa.

- 33 -

7.- Sistema inalámbrico según la reivindicación 6, caracterizado porque los medios de implementación para el sensor ultrasónico adicionalmente comprenden:

- un módulo de potencia para proporcionar la suficiente energía como para soportar dos módulos de emisión-recepción ultrasónica de baja tensión;
- un módulo de sincronización ultrasónica que sincroniza la emisión-recepción ultrasónica, incluso de manera inalámbrica entre diferentes nodos de la red;
- un sistema de contadores temporales por cada nodo para determinar el tiempo de vuelo de la señal ultrasónica con precisión mejor que las décimas de milisegundo.

8.- Procedimiento de medida del grado de fraguado y endurecimiento de materiales cementicios para la predicción de resistencias mecánicas para el sistema definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizado porque comprende los siguientes pasos:

- capturar unos datos de temperatura T y humedad H mediante el sensor de temperatura "ST" y generar un registro T/H;
- capturar una señal ultrasónica para la medida de velocidad de propagación V mediante el sensor ultrasónico "SUS" y generar un registro V;
- capturar una señal ultrasónica para la medida del coeficiente de reflexión CR mediante el sensor ultrasónico SUS y generar un registro CR;
- enviar todos los registros anteriores de las señales sensoriales al nodo principal;

- 34 -

- procesar las señales para obtener los parámetros velocidad V y coeficiente de reflexión CR.
- enviar los datos obtenidos al sistema informático;
- calcular la resistencia mecánica mínima $R_c(V, CR, T, H)$ del material cementicio mediante la expresión:

$$R_c(V, CR, T, H) = \min(R_c(V), R_c(CR), R_c(T, H))$$

donde $R_c(V) = a \cdot \exp(b \cdot V)$, donde a y b son unos parámetros de ajuste; $R_c(CR) = a \cdot \exp(-b \cdot CR)$ donde a y b son unos parámetros de ajuste; y donde $R_c(T, H) = R_{\max}((k_{T,h}(t-t_0)/(1+(k_{T,h}(t-t_0))))$ tal que $R_{\max}$ es la resistencia final, $k_{T,h}$ es la constante de la reacción dependiente de T y h, y t_0 el instante de comienzo de la hidratación.

5

10

15

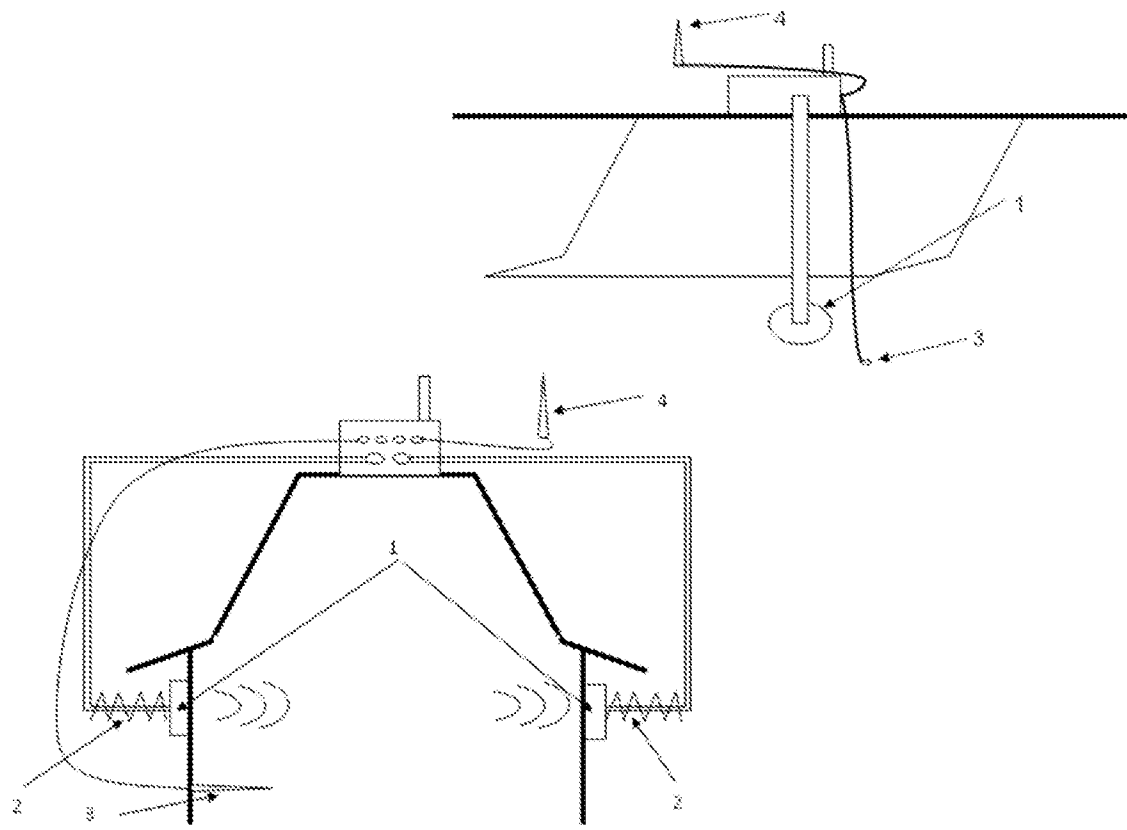


FIG. 1

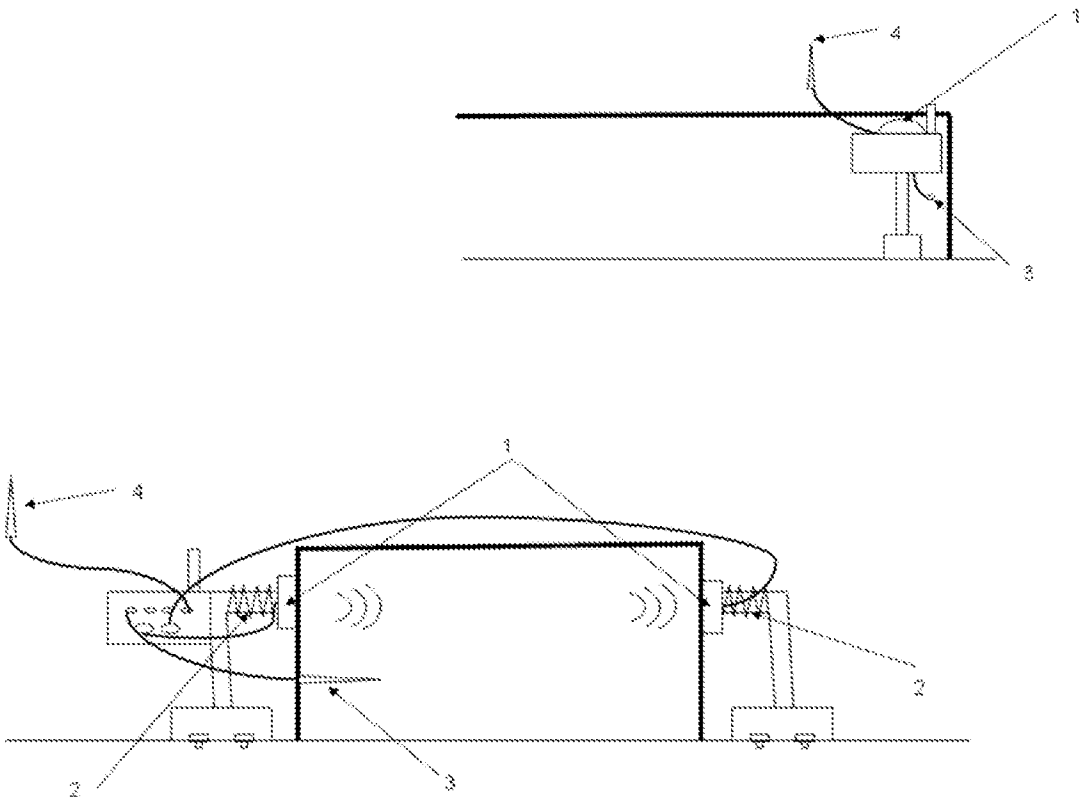


FIG. 2

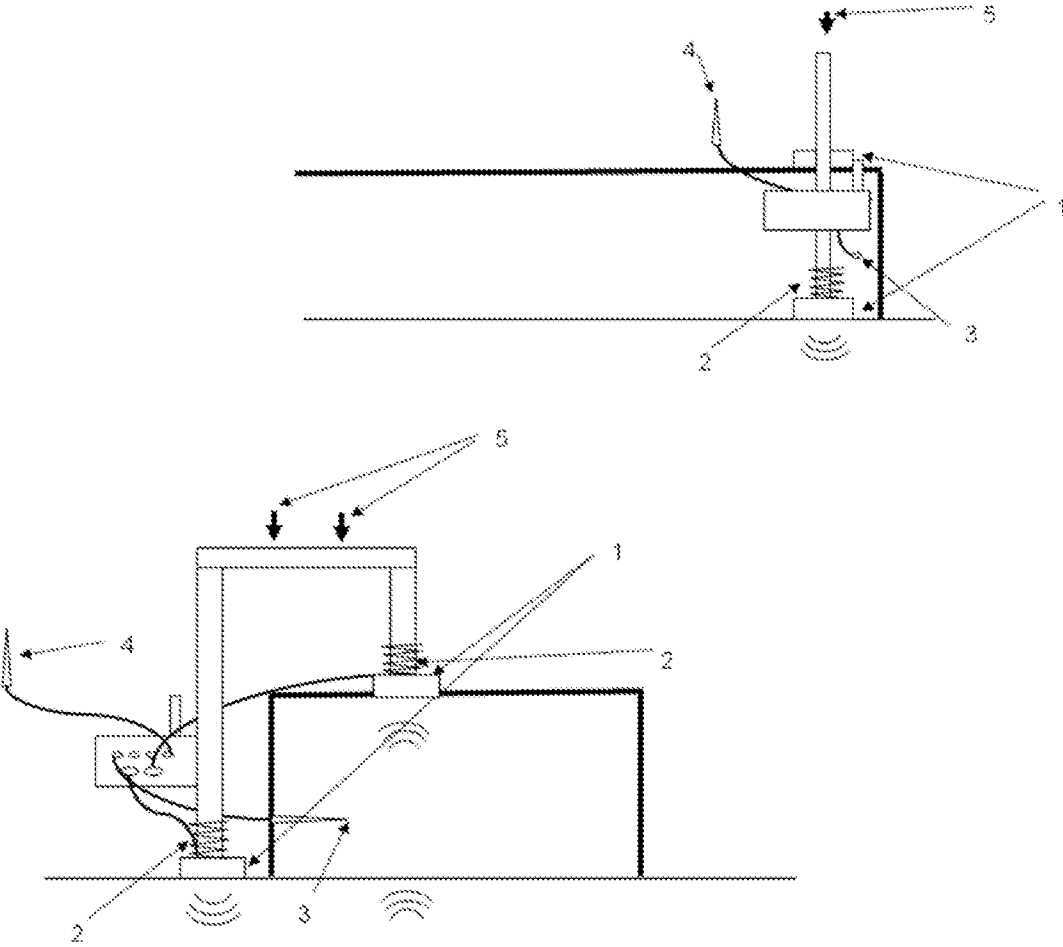


FIG. 3

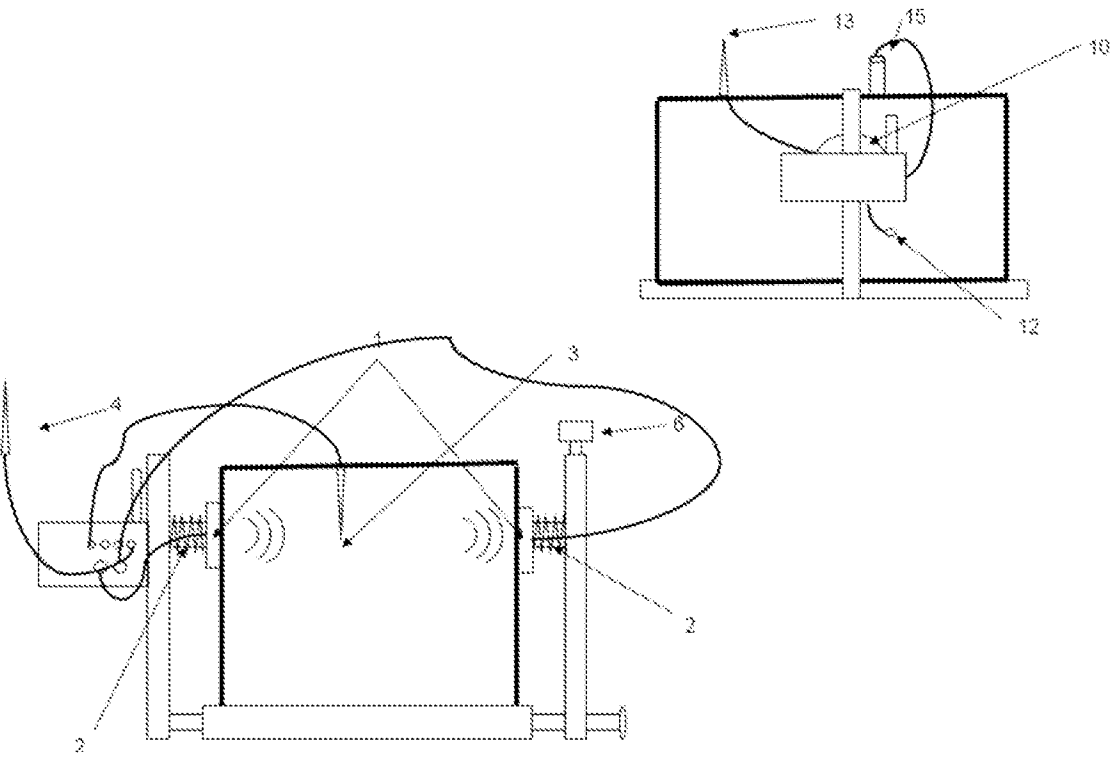


FIG. 4

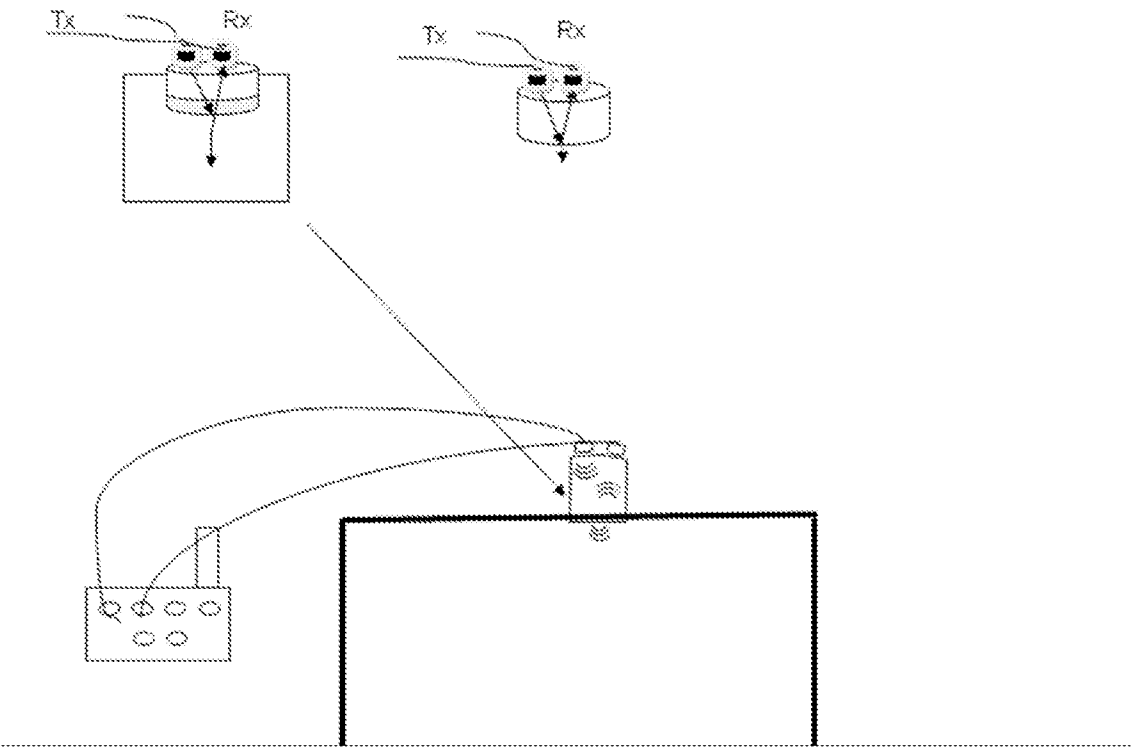


FIG. 5

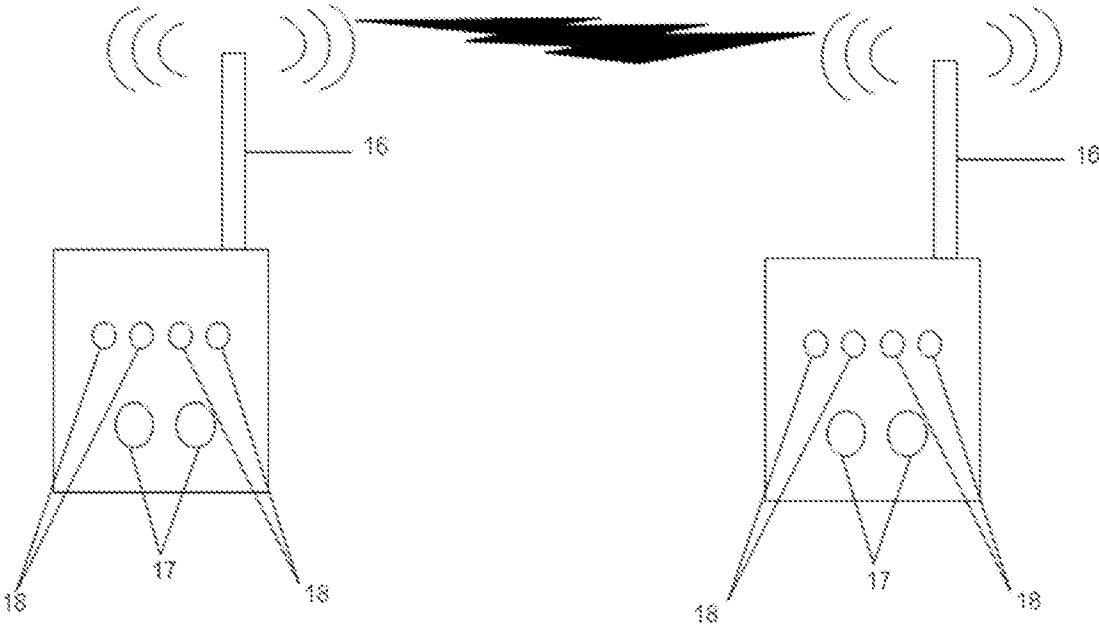


FIG. 6

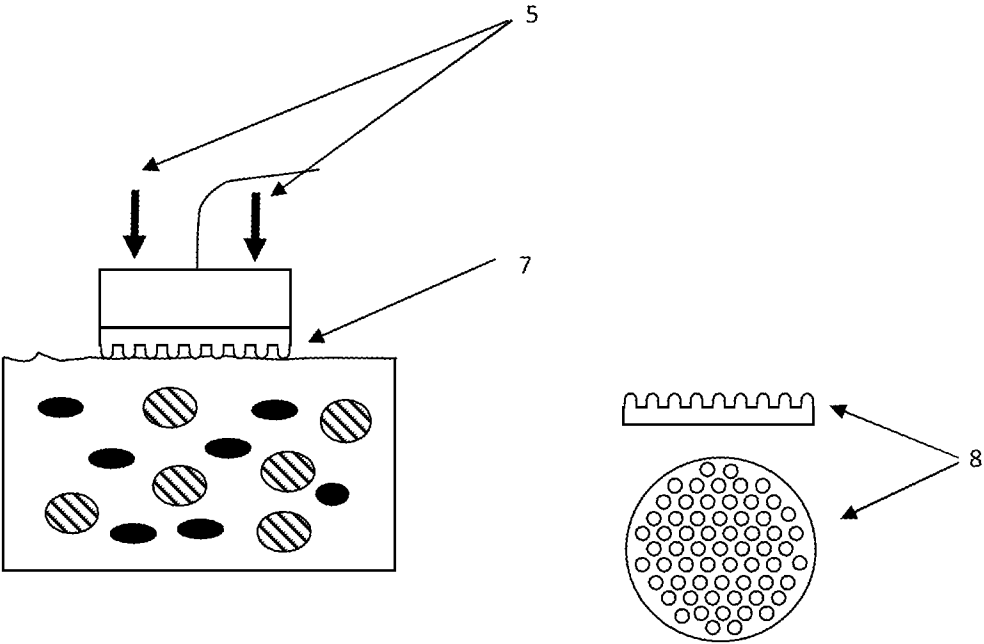


FIG. 7

8/15

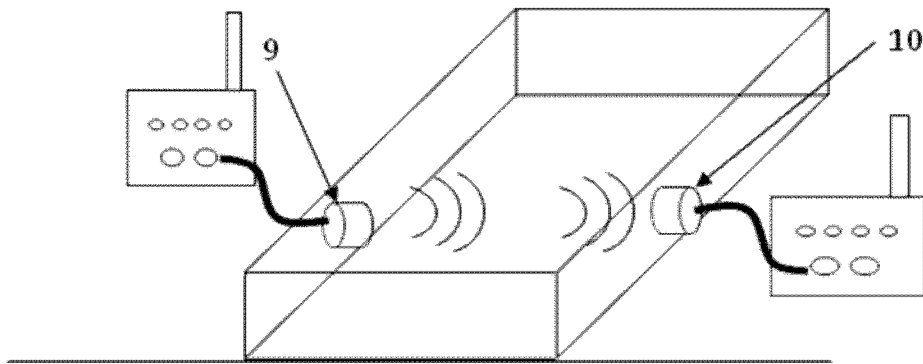


FIG. 8

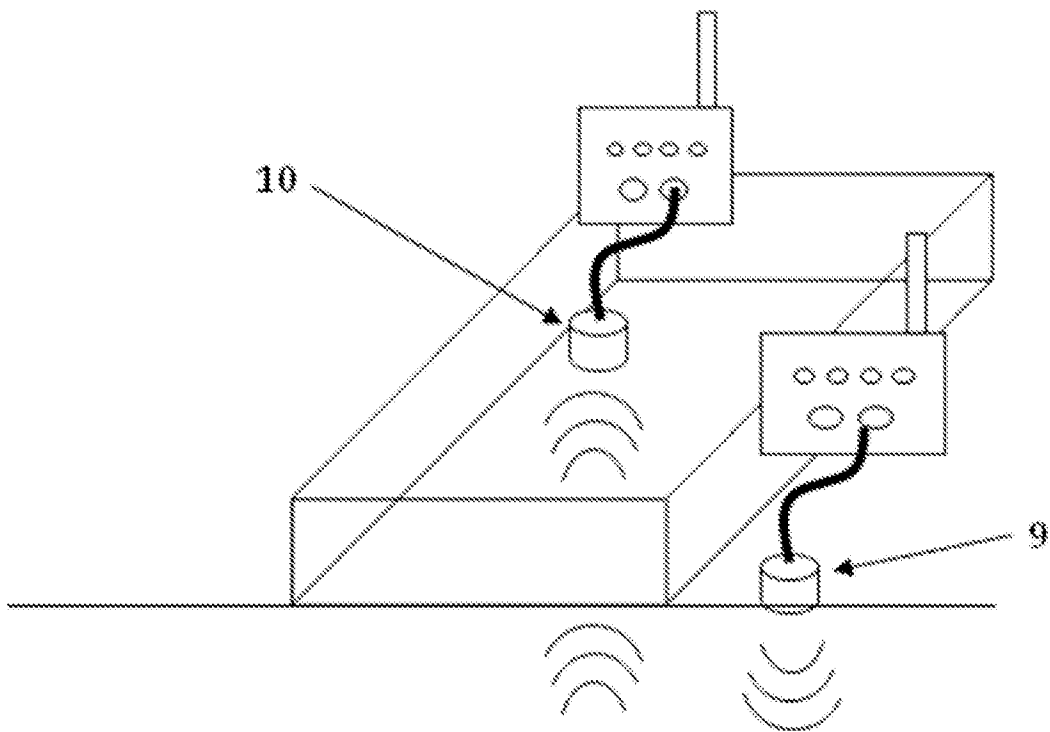


FIG. 9

9/15

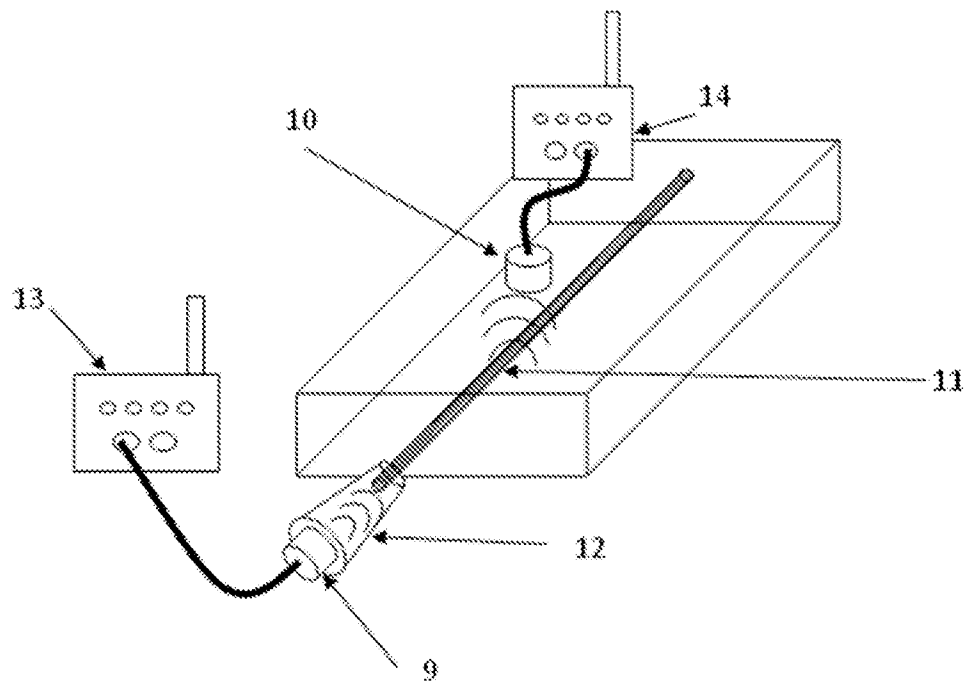


FIG. 10

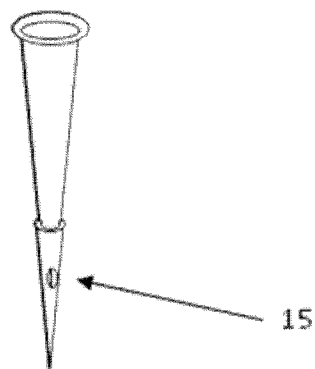


FIG. 11

10/15

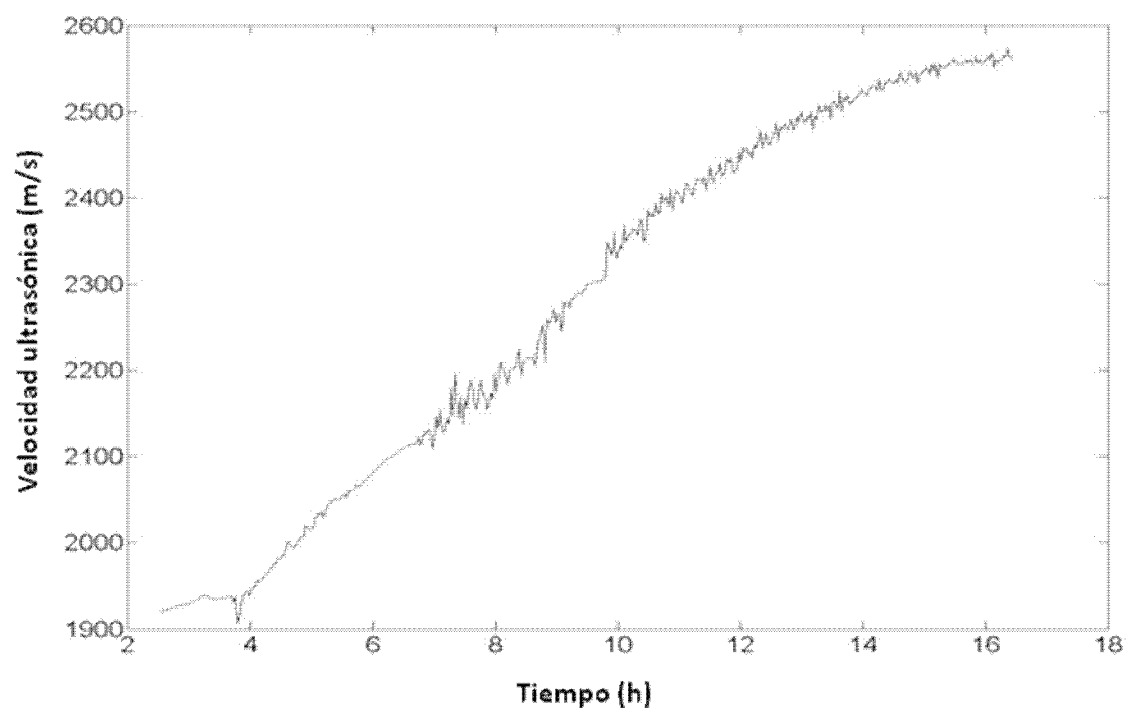


FIG. 12

11/15

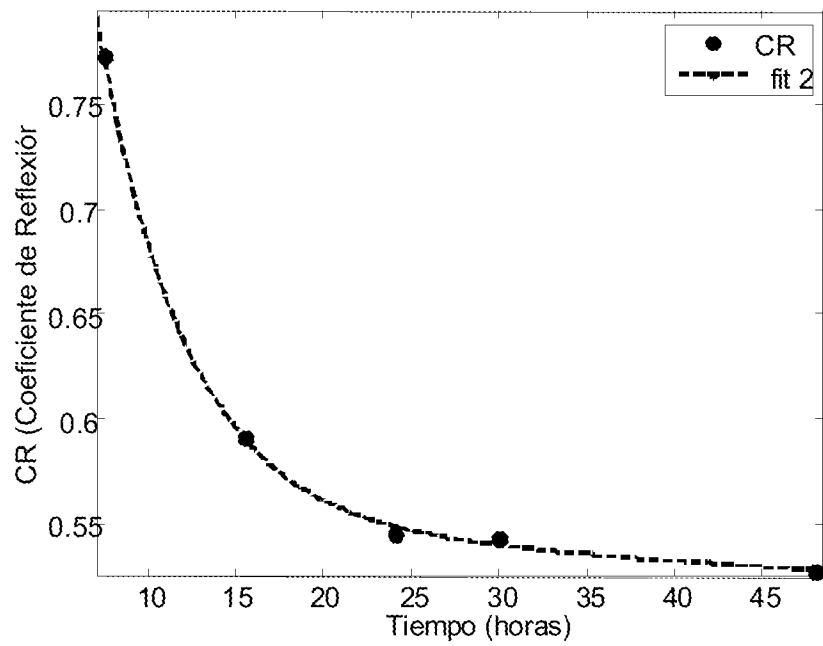


FIG. 13

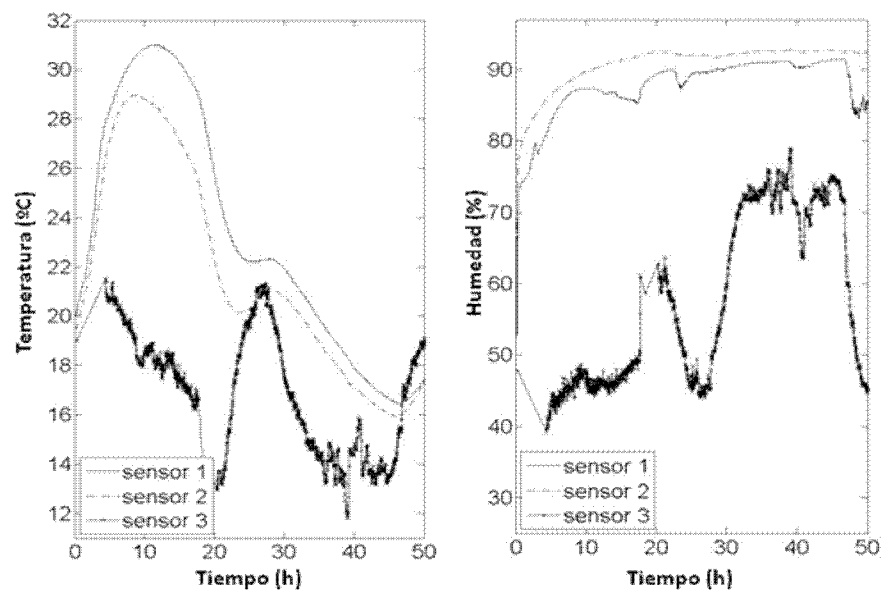


FIG. 14

12/15

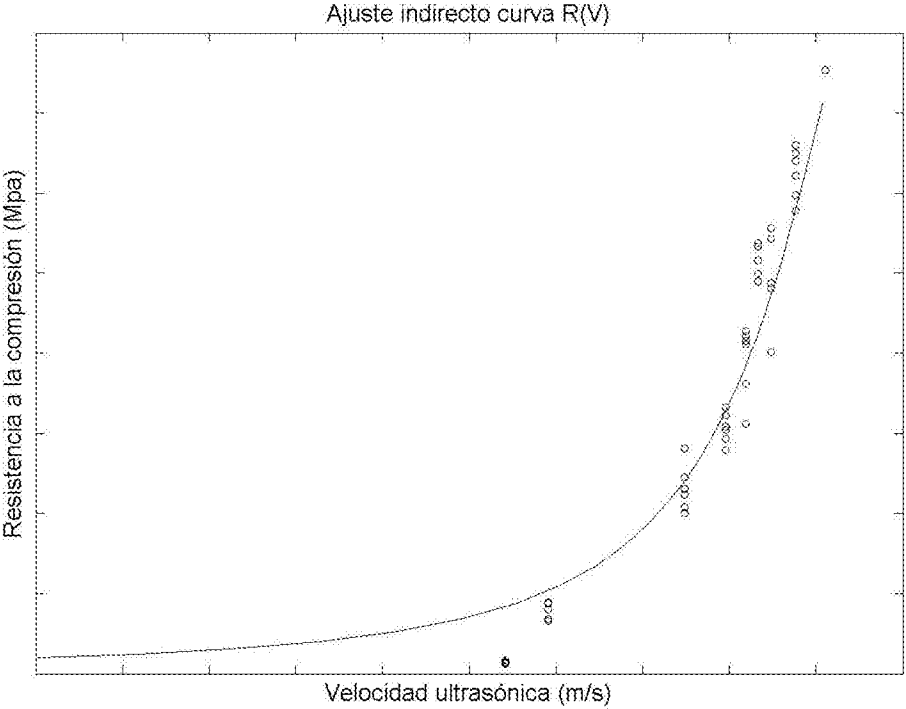


FIG. 15

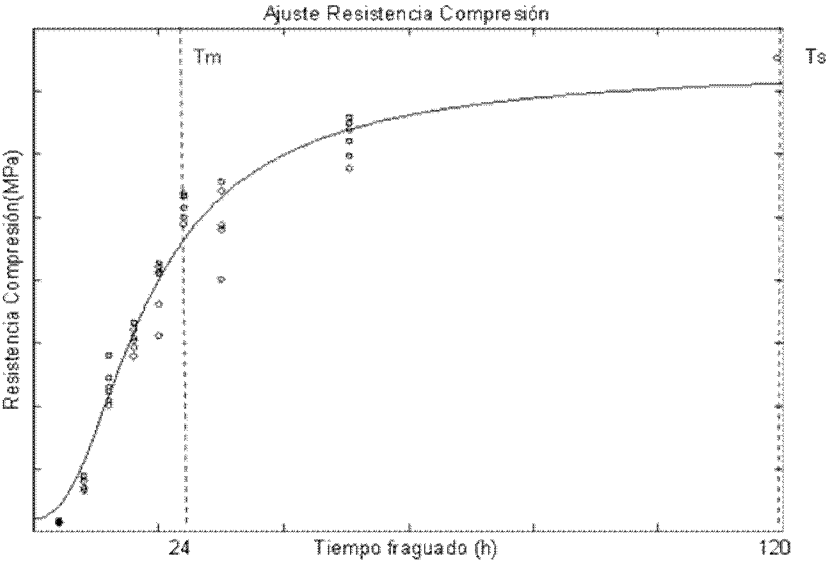


FIG. 16

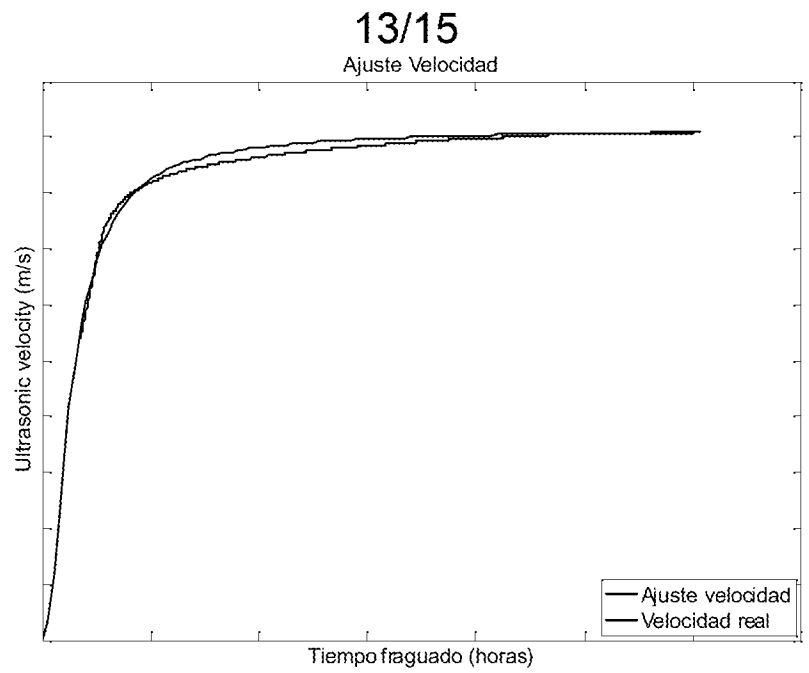


FIG. 17

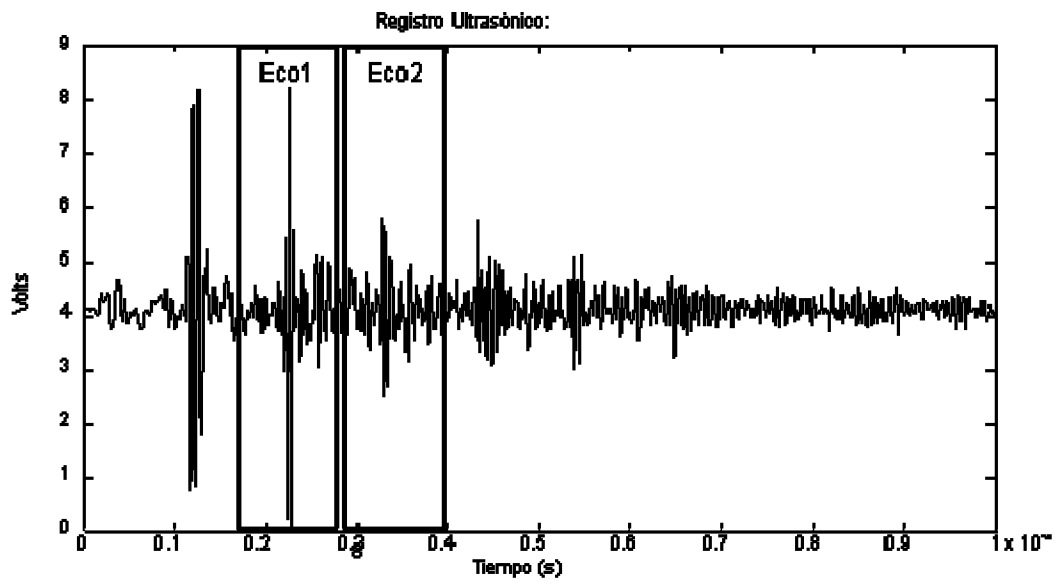


FIG. 18

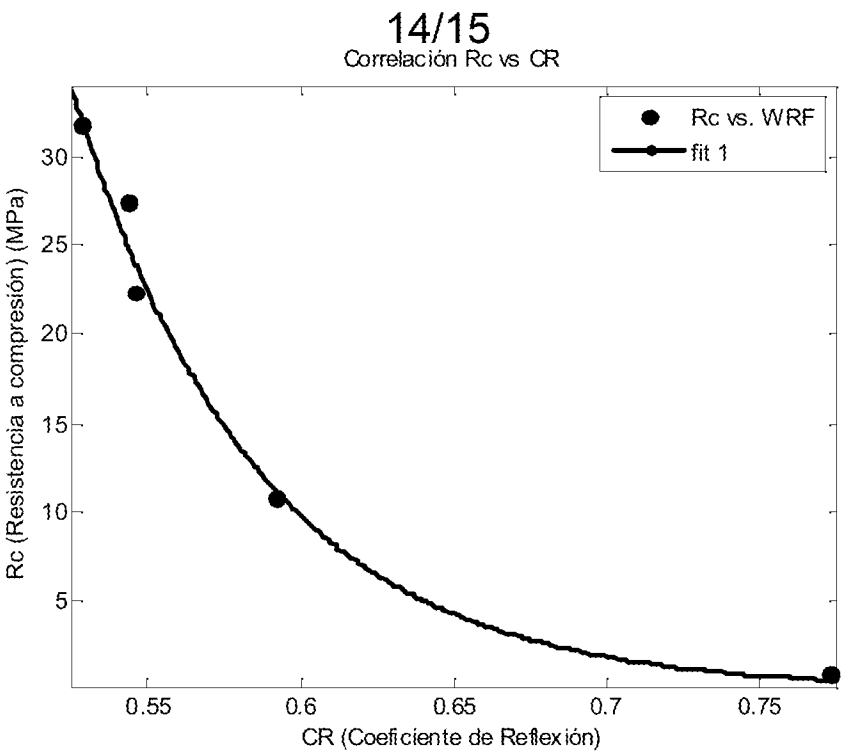


FIG. 19

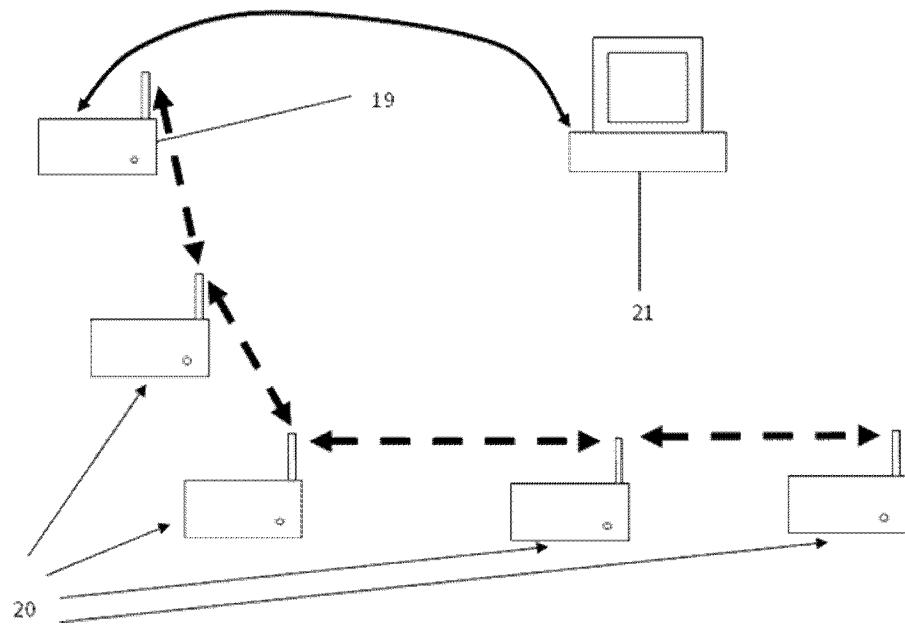


FIG. 20

15/15

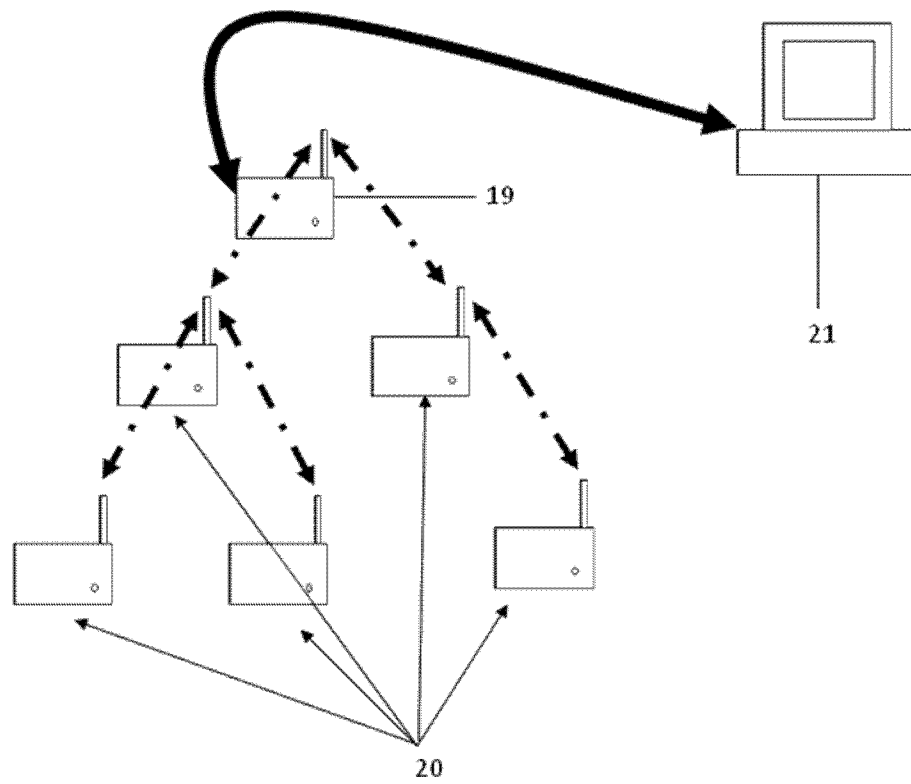


FIG. 21

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2012/070439

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01N29/04 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01N

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, WPI, NPL, XPESP, XPIEE, XPAIP, INTERNET

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	07/06/2010, S. APARICIO et al. "A wireless monitoring system to study the setting and hardening processes of cementitious materials". 10th European Conference on NDT, ECNDT 2010, Moscow, Russia. Moscow, Russia. 07/06/2010.	1-8
Y	23/05/2001, N.J. CARINO, H.S. LEW. "The maturity method: from theory to application". Proceedings of the 2011 Structures Congress & Exposition, May 21-23 2001, Washington D.C. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, editor, 2001, 19 p. NIST.	1-8
A	WO 2007025172 A2 (APPLIED SENSOR RES & DEV CORP ET AL.) 01/03/2007, pages 1 - 12.	1-8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.	
"E" earlier document but published on or after the international filing date	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
02/10/2012

Date of mailing of the international search report
(08/10/2012)

Name and mailing address of the ISA/

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Authorized officer
B. Tejedor Miralles

Telephone No. 91 3496879

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2012/070439

C (continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of documents, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2008221815 A1 (TROST STEVEN M ET AL.) 11/09/2008, paragraph [0007], [0016] - [0049]; [0070] - [0215].	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

Information on patent family members

PCT/ES2012/070439

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO2007025172 A	01.03.2007	US2007046479 A	01.03.2007
-----	-----	-----	-----
US2008221815 A	11.09.2008	US2004083057 A	29.04.2004
		US2006058904 A	16.03.2006
		US2007179653 A	02.08.2007
		US7398131 B	08.07.2008
		US8032244 B	04.10.2011
-----	-----	-----	-----

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2012/070439

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

G01N29/04 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01N

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES, WPI, NPL, XPESP, XPIEE, XPAIP, INTERNET

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
Y	07/06/2010, S. APARICIO et al. "A wireless monitoring system to study the setting and hardening processes of cementitious materials". 10th European Conference on NDT, ECNDT 2010, Moscow, Russia. Moscow, Russia. 07/06/2010.	1-8
Y	23/05/2001, N.J. CARINO, H.S. LEW. "The maturity method: from theory to application". Proceedings of the 2011 Structures Congress & Exposition, May 21-23 2001, Washington D.C. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, Peter C. Chang, editor, 2001, 19 p. NIST.	1-8
A	WO 2007025172 A2 (APPLIED SENSOR RES & DEV CORP ET AL.) 01/03/2007, páginas 1 - 12.	1-8

☒ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos ☒ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T" documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	"X" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	"Y" documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"&" documento que forma parte de la misma familia de patentes.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.	
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.	

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
02/10/2012

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
08 de octubre de 2012 (08/10/2012)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
B. Tejedor Miralles
Nº de teléfono 91 3496879

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional n°

PCT/ES2012/070439

C (Continuación). DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES		
Categoría *	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones n°
A	US 2008221815 A1 (TROST STEVEN M ET AL.) 11/09/2008, párrafo [0007], [0016] - [0049]; [0070] - [0215].	1-8

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

Solicitud internacional nº

PCT/ES2012/070439

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
WO2007025172 A	01.03.2007	US2007046479 A	01.03.2007
-----	-----	-----	-----
US2008221815 A	11.09.2008	US2004083057 A	29.04.2004
		US2006058904 A	16.03.2006
		US2007179653 A	02.08.2007
		US7398131 B	08.07.2008
		US8032244 B	04.10.2011
-----	-----	-----	-----