

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 555 542**

21 Número de solicitud: 201430787

51 Int. Cl.:

**G01N 27/04** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**27.05.2014**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**04.01.2016**

Fecha de la concesión:

**11.10.2016**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**19.10.2016**

56 Se remite a la solicitud internacional:

**PCT/ES2015/070410**

73 Titular/es:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES  
CIENTÍFICAS (CSIC) (70.0%)  
SERRANO, 117  
28006 MADRID (Valencia) ES;  
PAVOL JOZEF SAFÁRIK UNIVERSITY IN KOSICE  
(10.0%);  
THE TECHNICAL UNIVERSITY OF KOSICE  
(10.0%) y  
ASOCIACIÓN DE INVESTIGACIÓN DE  
INDUSTRIAS DE LA CONSTRUCCIÓN - AIDICO -  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE LA  
CONSTRUCCIÓN (10.0%)**

72 Inventor/es:

**OLIVERA CABO, Jesús;  
ANAYA VELAYOS, José Javier;  
GONZÁLEZ HERNÁNDEZ, Margarita;  
APARICIO SECANELLAS, Sofía;  
VARGA, Ratislav;  
ROVNAK, Marian y  
FUENTES RAMÍREZ, José Vicente**

74 Agente/Representante:

**UNGRÍA LÓPEZ, Javier**

54 Título: **SENSOR EMBEBIDO PARA LA MEDIDA CONTINUA DE RESISTENCIAS MECÁNICAS EN ESTRUCTURAS DE MATERIAL CEMENTICIO, MÉTODO DE FABRICACIÓN DEL MISMO, Y SISTEMA Y MÉTODO DE MEDIDA CONTINUA DE RESISTENCIAS MECÁNICAS EN ESTRUCTURAS DE MATERIAL CEMENTICIO**

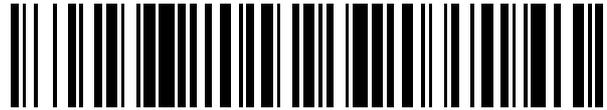
**ES 2 555 542 B1**

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 555 542**

21 Número de solicitud: 201430787

57 Resúmen:

Sensor para la medida continua de resistencias mecánicas en una estructura de material cementicio. Otro objeto de la invención se refiere a dos sistemas de medida que emplean dicho sensor: un sistema de medida continua basado en un efecto de inducción electromagnética, y otro sistema de medida continua basado en un efecto de magnetoinductancia, así como el método de medida de cada sistema y un método de fabricación de dicho sensor. El sensor se embebe directamente, como un simple agregado más, en una estructura de material cementicio, preferentemente hormigón, de modo que permite medir el estado de tensión mecánica/deformación interno de dicha estructura de material cementicio de forma continua y sin afectar a su estructura ni su estado de tensión. El sensor comprende un bloque de material cementicio en el que está embebido un microhilo magnético donde dicho microhilo magnético comprende un núcleo ferromagnético y un revestimiento aislante de vidrio.

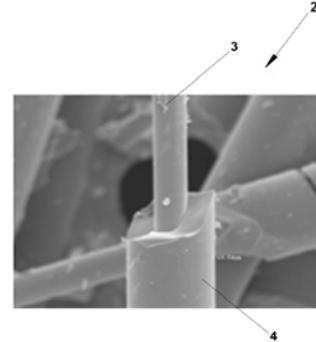


FIG.1

ES 2 555 542 B1

## DESCRIPCIÓN

5 Sensor embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio, método de fabricación del mismo, y sistema y método de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio.

### OBJETO DE LA INVENCION

10 El objeto de la presente invención se refiere a un sensor para la medida continua de resistencias mecánicas en una estructura de material cementicio. Otro objeto de la presente invención se refiere a dos sistemas de medida que emplean dicho sensor, que son un sistema de medida continua basado en un efecto de inducción electromagnética, y otro sistema de medida continua basado en un efecto de magnetoinductancia, así como el método de medida de cada sistema y un método de fabricación de dicho sensor.

15 El sensor se embebe directamente, como un simple agregado más, en una estructura de material cementicio, preferentemente hormigón, de modo que permite medir el estado de tensión mecánica/deformación interno de dicha estructura de material cementicio de forma continua y sin afectar a su estructura ni su estado de tensión.

20 El sensor comprende un bloque de material cementicio en el que está embebido un microhilo magnético donde dicho microhilo magnético comprende un núcleo ferromagnético y un revestimiento aislante de vidrio.

25 El sensor una vez embebido en la estructura de material cementicio permite determinar las fuerzas y deformaciones a los que se ve sometida dicha estructura de material cementicio a lo largo de su vida útil.

30 Encuentra especial aplicación en el ámbito de la industria de la construcción.

### PROBLEMA TÉCNICO A RESOLVER Y ANTECEDENTES DE LA INVENCION

35 El método más utilizado para la medida de resistencia del hormigón, son los ensayos de laboratorio que miden las resistencias mecánicas sobre testigos o probetas. Posee la desventaja de ser un ensayo destructivo. Entre los métodos más utilizados para medir esfuerzos mecánicos o deformación están las galgas extensiométricas. Dichas galgas extensiométricas son capaces de medir deformación longitudinal media, y se utilizan fundamentalmente adheridas a la superficie exterior, aunque empiezan a aparecer algunos diseños que permiten embeberlas dentro de estructuras de hormigón. Pero por su particular  
40 diseño poseen un precio muy elevado en comparación con un sensor simplemente fabricado del mismo material a embeber.

45 Los sensores de fibra óptica y los sensores piezoeléctricos tienen un buen rendimiento y permiten medir los esfuerzos internos y la deformación. Estos sensores tienen la desventaja de su alto coste, tienen una durabilidad determinada, y necesitan de un equipo de medida caro, como electrónica y láseres para su funcionamiento. Además tienen un rango de temperatura útil muy estrecho.

50 El desarrollo de microsensores permite obtener materiales magnéticos funcionales a bajo costo con propiedades magnéticas mejoradas para adaptarse a los requerimientos de las aplicaciones en una variedad de sectores industriales.

Sin embargo, los microhilos magnéticos amorfos han atraído mucha atención debido a sus reducidas dimensiones, posibilidad de adaptar sus propiedades magnéticas para detectar

diferentes magnitudes, y a sus procesos de medición y fabricación sencillos.

5 Una de las aplicaciones tecnológicas de estos microhilos magnéticos está basado en el efecto de Biestabilidad magnética y se pueden utilizar en numerosas aplicaciones haciendo uso fundamentalmente de los picos de voltaje muy agudos inducidos en pequeños bobinados como consecuencia del proceso de la propagación de la inversión de imanación, como posteriormente se explicará en detalle. Estos pulsos magnéticos han sido utilizados en muy diversas aplicaciones, tales como generadores de pulsos, sensores de posición y desplazamiento, sensores de campo magnético, sensores magnetoelásticos, contadores de 10 revoluciones y goniómetros, etc.

Por lo tanto, la presente invención proporciona un sensor que presenta las siguientes ventajas:

- permite medir la resistencia mecánica de forma continua de cualquier estructura fabricada en material cementicio,
- 15 - permite medir sin contacto los esfuerzos mecánicos internos de la estructura de material cementicio,
- se embebe directamente en la estructura de material cementicio a estudiar sin afectar a su estructura ni al estado de tensión,
- 20 - se aplica un tratamiento térmico que por una parte permiten mejorar la estabilidad del sensor con el tiempo, y por otra adaptar la sensibilidad del sensor a los esfuerzos mecánicos aplicados al rango de tensiones mecánicas aplicadas en el que va a trabajar el sensor.

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

25 La presente invención se refiere a un sensor embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (preferentemente la estructura de material cementicio es hormigón), tal que comprende: al menos un microhilo magnético seleccionado entre amorfo y nanocristalino embebido en un bloque de material cementicio, 30 donde el microhilo magnético posee una composición adecuada para no verse afectado por el entorno alcalino del bloque de material cementicio y comprende un núcleo metálico. Preferentemente el núcleo metálico es un núcleo ferromagnético.

35 Según una realización, el microhilo magnético comprende un núcleo ferromagnético y un revestimiento aislante de vidrio resistente al entorno alcalino del bloque de material cementicio, que dependiendo del material cementicio del que esté formado dicho bloque está seleccionado entre:

- 40 - un revestimiento de vidrio de borosilicato para una resistencia alta a los álcalis con al menos entre un 20-25% de Zr, y
- un revestimiento de vidrio de borosilicato para una resistencia moderada a los álcalis con un contenido bajo en álcalis como por ejemplo del tipo "Pyrex" 74.5% SiO<sub>2</sub>, 15% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% Na<sub>2</sub>O, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5% K<sub>2</sub>O, o "Nonex", 73% SiO<sub>2</sub>, 16.5% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6% PbO, 3% Na<sub>2</sub>O, 1.5% K<sub>2</sub>O.

45 Según otra realización, el microhilo magnético comprende un núcleo ferromagnético sin el revestimiento aislante de vidrio. En este caso, el núcleo ferromagnético comprende un material seleccionado entre Cromo, Zirconio y combinación de ellos para ser resistente a agentes corrosivos y oxidantes del bloque de material cementicio donde va a ser embebido.

50 La presente invención también se refiere a un sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio basado en un efecto de inducción electromagnética, tal que comprende al menos:

- un sensor de los descritos anteriormente que en el caso de que el microhilo magnético comprenda revestimiento aislante de vidrio el núcleo ferromagnético comprende una composición química seleccionada entre CoFeSiB, FeSiB, FeNiSiB, y FeCoSiB con una proporción de Si+B superior al 14% e inferior al 35%, y de Co, Ni y de Fe de más del 40%; donde el microhilo magnético comprende una magnetostricción alta y positiva en un rango desde  $3e^{-5}$  hasta  $4e^{-5}$ , una biestabilidad magnética y donde el sensor está embebido en la estructura de material cementicio;
- una bobina excitadora;
- una bobina sensora concéntrica e interior a la bobina excitadora que genera un campo inversor en su interior;
- una fuente de alimentación alterna conectada a la bobina excitadora; y,
- un sistema de lectura y representación del campo inversor generado en la bobina sensora.

Este sistema de medida continua basado en el efecto de inducción electromagnética a su vez se divide en otros dos sistemas de medida dependiendo de la profundidad a la que se encuentre el sensor, por un lado un sistema de medida sin cables de conexión donde la bobina excitadora y la bobina sensora están colocadas externamente a la estructura de material cementicio y por otro lado un sistema de medida con cables de conexión donde la bobina excitadora y la bobina sensora están previamente arrolladas alrededor del sensor y embebidas junto con el sensor en la estructura de material cementicio.

El método de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio basado en el efecto de inducción electromagnética comprende:

- generar un voltaje o corriente alterna mediante la fuente de alimentación alterna que genera un campo magnético en la bobina excitadora donde dicho campo magnético genera la propagación de una pared magnética a lo largo del microhilo magnético del sensor donde dicha pared magnética genera un pulso estrecho de voltaje en un campo inversor de la bobina sensora,
- medir el campo magnético inversor generado en la bobina sensora mediante un sistema de lectura y representación del campo magnético inversor,
- establecer la resistencia mecánica de la estructura de material cementicio en base a la medida del campo magnético inversor.

La presente invención también se refiere a otro sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio basado en un efecto de magnetointductancia, tal que comprende al menos:

- un sensor de los descritos anteriormente que en el caso de que el microhilo magnético comprenda revestimiento aislante de vidrio el núcleo ferromagnético comprende una composición química seleccionada entre CoSiB y CoFeSiB con una proporción de Si+B superior al 15% e inferior al 35%, de Co de más de 40% y de Fe inferior al 6%; donde el microhilo magnético comprende una magnetostricción baja y negativa en un rango desde  $-1e^{-7}$  hasta 0,
- una fuente de alimentación alterna conectada al microhilo magnético,
- una bobina excitadora arrollada alrededor del sensor,
- una fuente de alimentación continua conectada a la bobina excitadora,
- una bobina de compensación de campos locales arrollada alrededor del sensor y conectada a la fuente de alimentación continua;
- un sistema de lectura y representación del voltaje como función del campo magnético creado por la bobina excitadora,

donde la bobina excitadora y la bobina de compensación están embebidas junto con el sensor en la estructura de material cementicio.

El método de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio basado en el efecto de magnetoinductancia comprende:

- 5 - generar un voltaje o corriente alterna que pasa a través del microhilo magnético mediante la fuente de alimentación alterna,
- generar un voltaje o corriente continuo que pasa a través de la bobina excitadora generando un campo magnético,
- generar un voltaje o corriente continuo que pasa a través de la bobina de compensación para compensar campos locales,
- 10 - medir mediante unas variaciones del voltaje en los extremos del microhilo magnético como función del campo magnético creado por la bobina excitadora, y
- establecer la resistencia mecánica de la estructura de material cementicio en base a la medida de las variaciones de voltaje.

15 Finalmente, la presente invención también se refiere a un método de fabricación del sensor descrito que comprende:

- fabricar el microhilo magnético amorfo mediante técnicas de enfriamiento ultrarrápido convencionales y estiramiento,
- proteger el microhilo magnético mediante una composición adecuada para que sea resistente al entorno alcalino del bloque de material cementicio,
- 20 • cortar el microhilo magnético en tramos y someterlo a un tratamiento térmico seleccionado entre con corriente eléctrica y con horno convencional para estabilizar la estructura interna de dicho microhilo magnético, y mejorar la sensibilidad del microhilo magnético a esfuerzos mecánicos aplicados,
- 25 • aplicar un tratamiento químico mediante ácidos a los extremos cortados del microhilo magnético para obtener unos extremos pulidos y uniformes,
- embeber al menos el microhilo magnético en un bloque de material cementicio; y
- curar el bloque de material cementicio controlando la evolución de sus propiedades mecánicas mediante técnicas de evaluación no destructiva.

30

## BREVE DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Para completar la descripción y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña a esta memoria descriptiva, como parte integrante de la misma, un conjunto de dibujos en dónde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra una micrografía de un microhilo magnético mediante microscopía electrónica donde puede apreciarse el núcleo ferromagnético y el revestimiento aislante de vidrio.

Figura 2.- Muestra la estructura de dominios magnéticos de un microhilo con magnetostricción positiva. Posee un solo monodominio magnético en la dirección del eje del microhilo magnético (axial) y dominios magnéticos radiales cerca de la superficie.

Figura 2a. Muestra los diferentes estados magnéticos del ciclo de histéresis biestable de un microhilo magnético con magnetostricción positiva. La figura de la izquierda muestra las flechas que indican la dirección de la imanación dentro de cada dominio magnético durante los diferentes estados del proceso de imanación correspondientes a las etapas del ciclo de histéresis.  $H^*$  representa el campo magnético de inversión mínimo, necesario para poder invertir la imanación.

50

Figura 3.- Muestra la señal inducida en el sensor ( $V_2$ ) junto con el voltaje de excitación ( $V_1$ ) en función del tiempo en unidades arbitrarias (u.a.). La señal inducida se debe a la propagación de una pared de dominios magnéticos a lo largo del microhilo magnético. El campo magnético

de inversión  $H^*$  se puede estimar fácilmente de la posición de un pico agudo de voltaje (máximo).

5 Figura 4a.- Muestra una distribución de valores de campo  $H^*$  de una composición de  $Fe_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$  antes de someter el microhilo magnético al tratamiento térmico y químico. N es el número de eventos y H (Oe) los valores de campo magnético de inversión. El valor medio de las fluctuaciones es  $H^* = 0.83$  A/m, el ancho de la curva es 0.25 Oe.

10 Figura 4b.- Muestra la figura anterior después de someter el microhilo magnético al tratamiento térmico y químico. Se observa como el pulso inducido de voltaje se encuentra ahora más definido y estable, ya que se ha disminuido lo máximo posible el error en la medida de un valor determinado del campo  $H^*$ .

15 Figura 5a.- Muestra una imagen de las imperfecciones superficiales de un extremo de un microhilo magnético (en este caso el microhilo magnético no lleva el recubrimiento aislante de vidrio) debidas a un corte impreciso, tomada dicha imagen mediante un microscopio óptico.

Figura 5b.- Muestra una imagen de un extremo de un microhilo magnético (en este caso el microhilo magnético si lleva el recubrimiento aislante de vidrio) tomada mediante microscopía electrónica (SEM).

20 Figura 6a.- Muestra una forma de realización de un sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética sin cables de conexión. En este caso la bobina excitadora y la bobina sensora se encuentran fuera de la estructura de material cementicio y a una cierta distancia del sensor embebido en la estructura de material cementicio.

25 Figura 6b.- Muestra una imagen del microhilo magnetico embebido en el bloque de material cementicio según el sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética sin cables de conexión.

Figura 6c.- Muestra al sensor (bloque de material cementicio junto con el microhilo magnético) embebido en una estructura de material cementicio según el sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética sin cables de conexión.

30 Figura 7a.- Muestra una forma de realización de un sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética con cables de conexión.

35 Figura 7b.- Muestra al sensor (bloque de material cementicio junto con el microhilo magnético) embebido en una estructura de material cementicio según el sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética con cables de conexión. Los cables de conexión que se ven pertenecen a la bobina excitadora y sensora.

40 Figura 8a.- Muestra un pulso electromotriz inducido en la bobina sensora conforme se va sometiendo al bloque de material cementicio a fuerza de compresión. Se observa la dependencia de la posición del máximo para dos medidas concretas.

Figura 8b.- Muestra un pulso electromotriz inducido en la bobina sensora conforme se va sometiendo al bloque de material cementicio a fuerza de compresión. Se observa la dependencia de su amplitud en función de la fuerza de compresión para dos medidas concretas.

45 Figura 8c.- Muestra un dibujo esquemático del cambio de posición y amplitud del pulso inducido frente a la fuerza de compresión.

Figura 9.- Muestra la estructura de dominios magnéticos de un microhilo magnético con magnetostricción negativa. Posee fundamentalmente dominios circulares.

50 Figura 9a.- Muestra esquemáticamente el ciclo de histéresis característico de un microhilo magnetico con magnetostricción negativa, tumbado y sin histéresis.

Figura 10a.- Muestra una forma de realización de un sistema de medida basado en el efecto de Magnetoinductancia (MI) donde se observa un campo continuo  $H_{dc}$  y otro campo de una pequeña bobina de compensación que crea un campo compensador,  $H_c$ .

5 Figuras 10b1 y 10b2.- Variación de la sección efectiva (y por tanto de su impedancia), llamada profundidad de penetración ( $\delta$ ), por la que pasa la corriente en el microhilo magnético dependiendo de la aplicación de campos o fuerzas externas. Como consecuencia del cambio de impedancia, varía el voltaje que es lo que realmente se mide.

10 Figura 11.- Muestra las curvas de magnetoinductancia a una frecuencia de 100 KHz conforme se va sometiendo al bloque de material cementicio a fuerzas de compresión (KN). Se representa la posición del máximo como función de la fuerza aplicada.

A continuación se proporciona una lista de los distintos elementos representados en las figuras que integran la invención:

15

1. Sensor.
2. Microhilo magnético.
3. Núcleo ferromagnético.
4. Revestimiento aislante de vidrio.
- 20 5. Bloque de material cementicio.
6. Estructura de material cementicio.
7. Bobina excitadora.
8. Bobina sensora.
9. Bobina de compensación.
- 25 10. Campo magnético de inversión.
11. Cables de conexión.
12. Generador de funciones.
13. Osciloscopio digital.
14. Resistencia.
- 30 15. Histograma de frecuencias.
16. Campo de excitación.
17. Señal obtenida en el campo magnético de inversión.
18. Curvas de magnetoinductancia.
19. Pulso electromotriz inducido en la bobina sensora.
- 35 20. Estructura de dominios magnéticos de un microhilo magnético con magnetostricción positiva.
21. Ciclo de histéresis biestable de un microhilo magnético con magnetostricción positiva.
22. Estructura de dominios magnéticos de un microhilo magnético con magnetostricción negativa.
- 40 23. Ciclo de histéresis de un microhilo magnético con magnetostricción negativa.

#### DESCRIPCIÓN DETALLADA

45

El sensor (1) objeto de la presente invención permite medir la resistencia mecánica de forma continua de cualquier estructura fabricada en material cementicio.

50 Dicho sensor (1) se embebe directamente, como un agregado más, en la estructura de material cementicio (6) a estudiar (que preferentemente será de hormigón), sin afectar a su estructura ni al estado de tensión, de forma que se puede obtener una monitorización continua de su estado de tensión mecánica o deformación interna.

Dicho sensor (1) de fuerzas de compresión comprende un bloque de material cementicio (5), en el que está embebido el microhilo magnético (2), que no necesariamente debe ser del mismo

material cementicio que conforma la estructura de material cementicio (6) a estudiar, pudiendo ser de pasta de cemento, mortero u hormigón.

Dicho sensor (1) es capaz de monitorizar de forma continua el nivel de fuerza de compresión a la que va a estar sometida la estructura de material cementicio (6) a estudiar.

5 El microhilo magnético (2) está seleccionado entre amorfo y nanocristalino y posee una composición adecuada para no verse afectado por el entorno alcalino del bloque de material cementicio (5). Según una realización preferente, el microhilo magnético (2) comprende un núcleo metálico y un revestimiento aislante de vidrio (4). Preferentemente el núcleo metálico es un núcleo ferromagnético (3) por lo que de ahora en adelante se hablará de núcleo ferromagnético (3).

10 El revestimiento aislante de vidrio (4) se escoge para ser resistente al entorno alcalino del bloque de material cementicio (5), que dependiendo del material cementicio del que esté formado dicho bloque (5) está seleccionado entre:

- un revestimiento de vidrio de borosilicato para una resistencia alta a los álcalis con al menos entre un 20-25% de Zr, y
- un revestimiento de vidrio de borosilicato para una resistencia moderada a los álcalis con un contenido bajo en álcalis como por ejemplo del tipo "Pyrex" 74.5% SiO<sub>2</sub>, 15% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% Na<sub>2</sub>O, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5% K<sub>2</sub>O, o "Nonex", 73% SiO<sub>2</sub>, 16.5% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6% PbO, 3% Na<sub>2</sub>O, 1.5% K<sub>2</sub>O.

25 También es posible fabricar microhilos magnéticos (2) sin el revestimiento aislante de vidrio (4). En este caso, el núcleo ferromagnético (3) comprende un material seleccionado entre Cromo, Zirconio y combinación de ellos para ser resistente a agentes corrosivos y oxidantes del bloque de material cementicio (5) donde va a ser embebido.

30 Por agentes corrosivos se entiende a los debidos a la propia hidratación del hormigón que contiene agua y puede oxidar el microhilo magnético (2), o a los que puedan penetrar desde fuera como cloruros o sulfatos.

35 El bloque de material cementicio (5) donde se embebe el microhilo magnético (2) posee preferentemente forma cilíndrica, ya que facilita una calibración del sensor (1). No obstante puede tener cualquier otra forma geométrica.

40 Una vez fabricado el bloque de material cementicio (5) y embebido el microhilo magnético (2), el sensor (1) es curado en condiciones de inmersión en agua con hidróxido cálcico durante 28 días. Durante el proceso de curado del bloque de material cementicio (5) donde esta embebido el microhilo magnético (2) se ha controlado la evolución de sus propiedades mecánicas mediante la medida de la velocidad ultrasónica.

45 Debido al diámetro microscópico del microhilo magnético (2), de 1 a 100 micras, el microhilo magnético (2) no influye en las propiedades elásticas y mecánicas del bloque de material cementicio (5) donde es embebido.

Es importante mencionar que el rango de fuerzas de trabajo del sensor (1) para una monitorización continua de una curva de compresión-deformación se determina controlando las siguientes variables del microhilo magnético (2):

- 50 i) Se puede modificar su sensibilidad a un determinado rango de fuerzas mecánicas, para una composición química dada, modificando por una parte su estructura y magnetostricción mediante unos tratamientos térmicos específicos, que permiten modificar su respuesta magneto-elástica. Se pueden resumir en los siguientes:

Tratamiento térmico con corriente continua o en horno térmico convencional simultáneamente con campo magnético o tensión mecánica aplicada. por otra parte, cambiando el diámetro del núcleo ferromagnético (3) y el espesor del revestimiento aislante de vidrio (4) del microhilo magnético (2).

5  
ii) Se puede modificar su resistencia mecánica a compresión del bloque de material cementicio (5), variando las condiciones de fabricación del bloque de material cementicio (5), mediante la relación agua/material cementicio, tipo de material cementicio, y de agregados, aditivos, así como las condiciones de curado de dicho bloque de material cementicio (5).

10  
iii) Se puede modificar las dimensiones del bloque de material cementicio (5) ya que al modificar la sección del bloque de material cementicio (5), se modifica el esfuerzo mecánico que afecta al microhilo magnético (2).

15  
La fabricación de estos microhilos magnéticos (2) se lleva a cabo mediante la técnica de enfriamiento ultrarrápido de Taylor-Ulitovski ya conocida, donde de un gramo de aleación se pueden obtener varios kilómetros de microhilo magnético (2) con estructura amorfa. La estructura amorfa se alcanza gracias al enorme ritmo de enfriamiento a partir de la aleación fundida (1250°C) que es del orden de  $10^5$ - $10^6$  °C/s. La forma cilíndrica del microhilo magnético (2) solidificado resultante es consecuencia de la simetría del proceso de enfriamiento sobre agua.

20  
Para optimizar la respuesta del sensor (1) se han realizado unos tratamientos térmicos posteriores al corte del microhilo magnético (2), ya que si se trata térmicamente el microhilo magnético (2) y posteriormente se corta, la pared de dominio magnético del microhilo magnético (2) se desestabiliza. Dichos tratamientos térmicos se aplican a todo el microhilo magnético (2) con corriente eléctrica o en horno convencional simultáneamente con campo magnético o tensión mecánica aplicada.

25  
Adicionalmente se han realizado unos tratamientos químicos mediante ácidos como HF, HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a los extremos cortados del microhilo magnético (2) después de los tratamientos térmicos, para pasar de un extremo con imperfecciones donde las rugosidades son producto de las huellas de la herramienta empleada para el corte del microhilo magnético (2), a un extremo más pulido y uniforme.

30  
Existen principalmente dos sistemas para la medida continua de resistencias mecánicas en la estructura de material cementicio (6):

- 35  
40
- un primer sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética que a su vez se divide en otros dos sistemas de medida dependiendo de la profundidad a la que se encuentre el sensor (1), por un lado un sistema de medida sin cables de conexión y por otro lado un sistema de medida con cables de conexión (11); y
  - un segundo sistema de medida basado en el efecto de magnetoinductancia (MI).

45 A continuación se explican dichos sistemas:

#### Sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética:

50 El sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética, comprende una fuente de alimentación que genera un voltaje o corriente alterna en una bobina excitadora (7) que genera un campo magnético que provoca la propagación de una pared de dominio magnético a lo largo del microhilo magnético (2) desde su extremo, induciendo un pulso estrecho de voltaje a su paso por una bobina sensora (8), donde la posición del pico del pulso

estrecho de voltaje depende de los esfuerzos mecánicos aplicados sobre el microhilo magnético (2).

5 En este caso, se puede modificar el comportamiento magneto-elástico de los microhilos magnéticos (2) eligiendo una composición adecuada, con magnetostricción alta para que sea muy sensible a fuerzas mecánicas aplicadas, tanto de tensión como de compresión.

Para este sistema de medida el microhilo magnético (2) tiene unas propiedades específicas:

- 10
- Composiciones de CoFeSiB, FeSiB, FeNiSiB, FeCoSiB con una proporción de Si+B superior al 14% e inferior al 35%, y de Co, Ni y de Fe de más del 40%. Se pueden añadir otros elementos como: Mo, Zr, Ge, Cr, Mn, V, Ti, C, Cu, Nb u otros metales o metaloides con contenidos inferiores al 7%,
- 15
- composición química para tener magnetostricción alta y positiva, preferentemente en el rango de  $3e^{-5}$  hasta  $4e^{-5}$  (30-40 ppm, partes por millón),
  - biestabilidad magnética,
  - relación geométrica núcleo ferromagnético (3)/revestimiento aislante de vidrio (4) para no ser sensible a los esfuerzos de contracción del material cementicio pero sí ser sensible al rango de fuerzas de trabajo del sensor,
- 20
- el microhilo magnético (2), antes de ser embebido en el bloque de material cementicio (5), ha sido sometido a:
    - o un tratamiento químico aplicado a los extremos del microhilo magnético (2), mediante ácidos como HF, HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> para pasar de un extremo con imperfecciones donde las rugosidades son producto de las huellas de la herramienta empleada para el corte del microhilo magnético (2), a un extremo más pulido y uniforme,
- 25
- o un tratamiento térmico para la estabilización de la pared magnética en el rango de temperatura entre los 200 y 400°C durante aproximadamente una hora y el correspondiente tratamiento químico de los extremos. Este tratamiento proporciona las siguientes ventajas:
    - estabiliza la pared magnética del microhilo reduciendo las fluctuaciones del campo inversor, lo que mejora la precisión del sensor.
- 30
- o un tratamiento térmico con corriente eléctrica o en horno convencional, en el rango de temperatura entre los 200-600 °C con tiempos que pueden ir desde minutos hasta una hora, dependiendo de cada tipo de muestra y tratamiento, simultáneamente con fuerza de tensión o campo magnético. Este tratamiento térmico proporciona las siguientes ventajas:
    - estabiliza la estructura interna del microhilo magnético (2) a lo largo del tiempo para mejorar la estabilidad del sensor (1),
    - relaja los esfuerzos internos generados durante su fabricación, (al mismo tiempo mediante la aplicación de campo magnético o tensión mecánica se introducen nuevos esfuerzos) que permiten mejorar su imanación axial en la dirección del eje del microhilo magnético (2) y por tanto fijar el rango de trabajo del mismo para que tenga una sensibilidad a los esfuerzos mecánicos aplicados en la dirección axial del microhilo magnético (2) para ese rango,
    - para unos valores determinados de corriente y temperatura incluso puede cambiarse su estructura amorfa a nanocristalina
- 35
- 40
- 45
- 50

cambiando también de esta forma su comportamiento magneto-elástico, es decir mayor o menor dependencia con los campos magnéticos o tensiones mecánicas aplicadas.

5 La ventaja del proceso de magnetización en microhilos magnéticos (2) de un solo salto de Barkhausen, llamados también microhilos magnéticos (2) biestables, es que se puede utilizar un método de inducción sencillo para un campo magnético de inversión  $H^*$  (10). Cuando el campo magnético externo excede al campo magnético de inversión  $H^*$  (10) provocado por una bobina excitadora (7) alimentada por una señal, una pared de dominios magnéticos se propaga desde su extremo a lo largo del microhilo magnético (2) obteniéndose una fuerza electromotriz (f.e.m.) inducida en una bobina sensora (8). Dicha pared de dominios magnéticos propagándose puede visualizarse en un osciloscopio como un pico agudo de voltaje, tal y como se puede observar en la figura 3. El campo magnético de inversión  $H^*$  (10) se puede estimar fácilmente de la posición de ese máximo.

15 El sensor (1) puede ser influenciado por campos magnéticos locales, o por materiales metálicos en su alrededor, como por ejemplo en el hormigón armado, y dado que el objetivo del sensor (1) es ser embebido en cualquier estructura de material cementicio para monitorizar de forma continua los esfuerzos, es necesario eliminar tanto los campos magnéticos parásitos debido al campo magnético terrestre como los debidos a materiales metálicos en su alrededor. Por eso el campo magnético de inversión  $H^*$  (10) medido se mide en ambas direcciones del campo magnético de excitación aplicado. De forma que se medirá un campo magnético de inversión  $H^*_+$  (10) cuando aumenta el campo magnético de excitación y  $H^*_-$  cuando disminuye. De forma que finalmente el campo magnético de inversión  $H^*$  (10), que se empleará para medir las fuerzas aplicadas (independiente del campo local) es proporcional a la diferencia de ambas componentes:

$$H^* = \frac{H^*_+ - H^*_+}{2\mu_0}$$

mientras que el campo magnético local o parásito vendrá dado por:

$$H_{local} = \frac{H^*_+ + H^*_+}{2}$$

Adicionalmente, el sensor (1), una vez embebido en una estructura de material cementicio, preferentemente hormigón, puede utilizarse para medir temperatura en casos extremos cuando el sensor (1) se encuentre sometido a variaciones drásticas de temperatura. Finalmente si se quiere evitar una posible dependencia con la temperatura solo es necesario modificar las condiciones de medida del sensor (1).

40 Se ha demostrado que a bajas frecuencias de la señal de excitación, el sensor (1) tiene una pequeña sensibilidad a la tensión mecánica y se puede utilizar por ejemplo como aviso de cambios bruscos de temperatura que puedan hacer peligrar la integridad de la estructura de material cementicio (6). Si se aumenta la frecuencia del campo magnético se produce un aumento de la sensibilidad del sensor (1) a la tensión mecánica.

45 La aleación del núcleo ferromagnético (3) del microhilo magnético (2) es escogida cuidadosamente para que posea una elevada constante de magnetostricción para la medida del campo magnético de inversión  $H^*$  (10). La magnetostricción es la propiedad de los materiales ferromagnéticos que se deforman en presencia de campos magnéticos. Aquí se utiliza el efecto inverso conocido como efecto Villari, que causa variaciones en propiedades magnéticas (en nuestro caso los efectos Campo inversor) dependientes de la fuerza mecánica aplicada sobre ellos.

Para la medida del campo magnético de inversión (10)  $H^*$ , los microhilos magnéticos (2) poseen una estructura magnética particular, exhiben la característica de biestabilidad magnética. Y se produce una inversión de la imanación que va desde un estado de energía estable hasta otro, por medio de un salto Barkhausen. En la figura 2, se muestra una representación esquemática de la estructura magnética monodominio. En la figura 2a, las flechas indican la dirección de la imanación dentro de cada dominio durante los diferentes estados del proceso de imanación correspondiente a las etapas de un ciclo de histéresis completamente rectangular característico de un microhilo magnético (2) biestable con magnetostricción positiva. El cambio de la imanación cuando se aplica gradualmente un campo magnético  $H$  mayor en sentido contrario a como está imanado en el estado a) hasta el campo  $H^*$  donde ocurre un único solo salto Barkhausen de la pared magnética formada en el extremo del microhilo magnético (2) en el estado c) hasta finalmente obtener el estado d). El campo  $H^*$  representa el campo magnético de inversión mínimo, necesario para poder invertir la imanación.

En la remanencia (a), cuando se aplica un campo magnético en dirección contraria a como está el núcleo imanado axialmente en (a), las estructuras de dominios de cierre existentes se alargan hacia el centro de la muestra. (b) En el campo de inversión, la pared de uno de los dos dominios de cierre se desengancha de forma irreversible y se desplaza hacia el extremo opuesto de la muestra, dando lugar a un cambio en la imanación (c). Por consiguiente, dicho salto Barkhausen es consecuencia del desenganche y propagación de una única pared de dominios magnéticos a lo largo del microhilo magnético (2). Esta propagación queda definida por un pulso magnético estrecho de una duración determinada (figura 3).

Sin embargo, el valor del campo magnético inversor  $H^*$  al que se produce el salto en la imanación presenta una pequeña fluctuación al ser medido repetidamente en las mismas condiciones experimentales. Para alcanzar una buena sensibilidad se requiere una amplitud grande, una duración corta y que esa distribución tienda a ser lo más estrecha posible.

Una de las novedades de este sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética es que se ha conseguido mejorar la estabilización de la pared de dominio magnético del microhilo magnético (2) logrando así optimizar la respuesta del sensor (1) obteniendo una mayor precisión en sus medidas. De esta forma se ha conseguido pasar de la distribución de medidas de campo magnético de inversión  $H^*$  (10) de la figura 4a a valores más estables de la figura 4b. De esta forma se consigue un pico más estable que prácticamente no cambia de posición en el tiempo.

En la figura 5a se observa una imagen de las imperfecciones superficiales debido al corte impreciso de un extremo del microhilo magnético (2) sin revestimiento aislante de vidrio (4) tomada mediante un microscopio óptico, mientras que en la figura 5b se puede ver una imagen del extremo de un microhilo magnético (2) con revestimiento aislante de vidrio (4) tomada mediante microscopía electrónica (SEM).

La metodología de adquisición y análisis de datos se realizan según métodos convencionales donde un programa de adquisición de datos calcula el valor máximo de un voltaje inducido (en mv) y almacena el tiempo en el que éste máximo se ha producido. Esta rutina de registro de la posición del máximo se repite tantas veces como valores del campo magnético inversor  $H^*$  (10) se quiera medir.

Se han realizado pruebas con muestras sin tratar, es decir, muestras a las que no se les ha aplicado los tratamientos anteriormente mencionados (se ha realizado una estadística con doscientos datos de campo magnético inversor (10)) y se han comparado con muestras a las que si se les ha aplicado los tratamientos anteriormente mencionados y se ha observado una

clara disminución substancial de las fluctuaciones y un valor del campo magnético inversor prácticamente estable alrededor del valor medio de la curva de aproximación.

5 Tal y como se ha comentado previamente, dependiendo de la accesibilidad de la zona de la estructura de material cementicio (6) donde se coloque el sensor (1) se tendrá que utilizar dos sistemas de medida diferentes.

- 10 • Si la zona es accesible y el sensor (1) embebido se encuentra en proximidad a la superficie de la estructura de material cementicio (6), se utiliza el sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética sin cables de conexión, tal y como se puede observar en la figura 6a, donde una bobina excitadora (7) y una bobina sensora (8) se colocan externas a la estructura de material cementicio (6) mientras que el sensor (1) es embebido en el interior de dicha estructura de material cementicio (6). El sensor (1) embebido se ha calibrado previamente en el laboratorio mediante experimentos de fuerza vs medida de parámetros magnéticos. Una vez calibrado el sensor (1), se puede añadir como un agregado más en la fabricación de la estructura de material cementicio (6) de la cual se quiere medir el estado de fuerzas. El sensor (1) debe estar orientado en la dirección que se desee medir los esfuerzos.

20 La bobina excitadora (7) es alimentada por una señal, preferentemente de forma sinusoidal o triangular, con el fin de aplicar un campo magnético externo lineal o gradual que aumente con el tiempo.

- 25 • Si la zona no es fácilmente accesible, se utiliza el sistema de medida basado en el efecto de inducción electromagnética con cables de conexión (11), tal y como se puede observar en la figura 7a, donde la bobina excitadora (7) y la bobina sensora (8) están embebidas y arrolladas al bloque de material cementicio (5) que tiene embebido el microhilo magnético (2). Unos cables de conexión (11) salen de las dos bobinas, excitadora (7) y sensora (8), tal y como se muestra en la figura 7b.

30 Los cables de conexión (11) son cables coaxiales finos y están recubiertos, preferentemente, de politetrafluoroetileno (PTFE) para que no se dañen al estar embebidos en el bloque de material cementicio (5).

#### 35 Sistema de medida basado en el efecto de magnetoinductancia (MI):

A continuación se explica el sistema de medida basado en el efecto de magnetoinductancia (MI) (figura 10a), donde se observa una fuente de alimentación alterna para hacer pasar un voltaje o corriente alterna de baja frecuencia (100 Hz-200 KHz) a través del microhilo magnético (2) de una amplitud pequeña comprendida entre 50 mV y 1V y se observa también una fuente de alimentación continua para generar un voltaje o intensidad continua a través de la bobina excitadora (7) arrollada de forma concéntrica alrededor del bloque de material cementicio (5) que contiene el microhilo magnético (2) mediante unos cables coaxiales finos y protegidos por PTFE. Se observa también una bobina de compensación (9) arrollada sobre el bloque de material cementicio (5) para compensar campos locales que puedan afectar a la sensibilidad del sensor (1).

Para este sistema de medida el microhilo magnético (2) tiene unas propiedades específicas:

- 50 - principalmente composiciones de CoSiB, CoFeSiB con una proporción de Si+B superior al 15% e inferior al 35%, y de Co de más de 40% y de Fe no superior al 6%. De igual forma puede comprender otros metales o metaloides tal como, Mo, Zr, Ge, Cr, Mn, V, Ti, C no superiores al 7%,
- también puede comprender composiciones de FeSiB, FeNiSiB con una proporción de Si+B superior al 14% e inferior al 35%, y de, Ni y de Fe de más

del 40%. Sin embargo debe comprender otros metales o metaloides, con contenidos no superiores al 7% tal como Hf, Nb, Cu que permitan su nanocristalización bajo tratamiento térmico con corriente eléctrica u horno convencional para poder obtener una magnetostricción lo suficientemente baja para que se pueda medir mediante este sistema de medida,

- composición química para tener magnetostricción baja y negativa, en el rango  $-1e^{-7}$  hasta 0,
- estructura de dominios circular, para ser fácilmente imanado por una corriente eléctrica,
- relación geométrica núcleo ferromagnético (3)/revestimiento aislante de vidrio (4) para no ser sensible a los esfuerzos de contracción del cemento pero sí ser sensible en un rango de fuerzas deseado,
- el microhilo magnético (2), antes de ser embebido en el bloque de material cementicio (5), ha sido sometido a:

- o un tratamiento térmico con corriente eléctrica o en horno convencional, en el rango de temperatura entre los 200-600 °C con tiempos que pueden ir desde minutos hasta una hora, dependiendo de cada tipo de muestra y tratamiento, simultáneamente con fuerza de tensión o campo magnético. Este tratamiento térmico proporciona las siguientes ventajas:

- estabiliza la estructura interna del microhilo magnético (2) a lo largo del tiempo para mejorar la estabilidad del sensor (1),
- relaja los esfuerzos internos generados durante su fabricación, (al mismo tiempo mediante la aplicación de campo magnético o tensión mecánica se introducen nuevos esfuerzos) que permiten mejorar la imanación circular del microhilo magnético (2) y por tanto fijar el rango de trabajo del mismo para que tenga una sensibilidad a los esfuerzos mecánicos aplicados en la dirección axial del microhilo magnético (2) para ese rango,
- para unos valores determinados de corriente y temperatura incluso puede cambiarse su estructura amorfa a nanocristalina cambiando también de esta forma su comportamiento magneto-elástico, es decir mayor o menor dependencia con los campos magnéticos o tensiones mecánicas aplicadas. En el caso de las composiciones mencionadas con un valor de Fe,Ni,Co superiores al 40% es necesario nanocristalizarlas para que puedan ser medidas mediante este sistema de medida.

La magnetoinductancia a diferencia de la magnetoresistencia, que hace referencia a la variación de la resistencia eléctrica de un material cuando este es sometido a un campo magnético externo, consiste en la variación de la impedancia compleja,  $Z=R+ jwL$  que ocurre cuando a través del microhilo magnético (2) se hace pasar una corriente eléctrica alterna en presencia de un campo magnético externo. R es la parte resistiva o real de la impedancia y  $wL$  la parte imaginaria o reactancia inductiva, donde  $w$  es la frecuencia angular de la corriente y L la inductancia del microhilo magnético (2).

La medida del efecto de magnetoimpedancia (MI) radica en las variaciones de la profundidad de penetración del campo electromagnético en función de la permeabilidad circular del microhilo magnético (2) conocido como efecto pelicular.

Para este sistema de medida se elige microhilos magnéticos (2) con magnetostricción baja y negativa de forma que puede inducirse una intensa variación de la imanación circular al hacerle pasar una corriente eléctrica.

En la figura 9 se observa que el eje de fácil de imanación es circular, lo que determina una configuración circular de la estructura de dominios.

La profundidad de penetración está dada por:

$$\delta \sim \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu f}}$$

5 donde  $\rho$  es la resistividad del microhilo magnético (2),  $\mu$  es su permeabilidad circular y  $f$  es la frecuencia del campo magnético alterno que hace pasar a través de dicho material. Normalmente la corriente se concentra principalmente cerca de la superficie del microhilo magnético (2) sin la aplicación de ningún campo o fuerza externa (ver Fig.10b1) debido a que se generan corrientes inducidas que se oponen a la variación de la corriente alterna. La aplicación de un campo  $H_{DC}$  o la fuerza mecánica aplicada  $F$  disminuye la permeabilidad circular  $\mu$  del microhilo magnético (2) por lo que según la ecuación, aumenta la profundidad de penetración de la corriente de  $\delta_i$  a  $\delta_f$ , pasando ahora por una sección mayor del microhilo magnético (2) (ver Fig.10b2). Puesto que la impedancia  $Z$  del material es inversamente proporcional al área de la zona del material a través del cual circula corriente, la impedancia disminuye. Cambios en el valor de la impedancia dan lugar a cambios en el voltaje  $V_{out}$ , que es lo que realmente se mide. El máximo de impedancia se obtiene cuando la permeabilidad circular es máxima. Dependiendo de la anisotropía magnética del microhilo magnético (2), axial o circular, la curva de magnetoimpedancia presentará un solo pico o dos, respectivamente. De la variación de la posición del pico o la amplitud del mismo, obtenemos la dependencia con la fuerza de compresión aplicada. En nuestro caso medimos a frecuencias relativamente bajas, el efecto se llama magneto-inductancia, donde la dependencia con el campo magnético proviene principalmente del término inductivo,  $j\omega L$ , siendo  $L$ , la inductancia del microhilo magnético (2).

25 Este efecto se midió usando el método de las cuatro puntas; dos contactos para hacer pasar una corriente eléctrica al microhilo magnético (2), y esos mismos contactos para detectar las variaciones en voltaje que experimenta dependiendo del campo magnético y fuerza mecánica aplicada.

30 En este sistema de medida basado en el efecto de magnetoinductancia la bobina excitadora (7) está arrollada alrededor del sensor (1) (microhilo magnético (2) embebido en el bloque de material cementicio (5)), donde unos cables de conexión salen del microhilo magnético (2), tal y como se muestra en la figura 10a. Los cables de conexión son cables coaxiales finos y están recubiertos, preferentemente, de politetrafluoroetileno (PTFE) para que no se dañen al estar embebidos en el bloque de material cementicio (5).

40 Existe también una pequeña bobina de compensación (9) arrollada sobre el bloque de material cementicio (5) donde está embebido el microhilo magnético (2), que crea un campo de compensación  $H_c$ , ver Fig. 10a, para compensar de esta forma un campo magnético local si estuviera presente. La existencia de un campo magnético local puede afectar a la impedancia del microhilo magnético (2), afectando por lo tanto a la sensibilidad del sensor (1).

45 La mayor dificultad de este sistema de medida basado en el efecto de magnetoinductancia radica en la conexión de los cables de conexión con el microhilo magnético (2). La conexión de dichos cables se lleva a cabo de la siguiente forma:

- ✓ En el caso de que el microhilo magnético (2) posea el revestimiento aislante de vidrio (4) habría que tratar químicamente mediante un ácido en un tiempo específico los extremos del microhilo magnético (2) para retirar dicho revestimiento aislante de vidrio (4) sin que ataque demasiado al núcleo ferromagnético (3); si por el contrario no existe dicho revestimiento aislante de vidrio (4) se procedería a soldar los extremos por arco eléctrico directamente.

- 5
- ✓ Soldar los extremos por arco eléctrico, es decir, mediante una corriente eléctrica continua, donde se forma un arco eléctrico entre el núcleo ferromagnético (3) a soldar y un electrodo utilizado (en nuestro caso cobre), produciendo la fusión del cobre que rodea al extremo pelado del microhilo magnético (2).
  - ✓ Proteger los extremos del microhilo magnético (2) mediante un Epoxy especial que le confiere cierta resistencia mecánica, y protección contra el entorno cementicio y la humedad.
- 10
- Ambos sistemas de medida son de fácil implementación electrónica lo que permitiría utilizar sistemas basados en redes inalámbricas de sensores o tecnología RFID para monitorizar las propiedades de la estructura de material cementicio (6) bajo estudio.
- 15
- La presente invención no debe verse limitada a la forma de realización aquí descrita. Otras configuraciones pueden ser realizadas por los expertos en la materia a la vista de la presente descripción. En consecuencia, el ámbito de la invención queda definido por las siguientes reivindicaciones.

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) **caracterizado por** que comprende: al menos un microhilo magnético (2) seleccionado entre amorfo y nanocristalino embebido en un bloque de material cementicio (5), donde el microhilo magnético (2) es resistente al entorno alcalino del bloque de material cementicio (5) y comprende un núcleo metálico (3).
- 10 2. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) , según la reivindicación 1, **caracterizado por** que la estructura de material cementicio (6) es hormigón.
- 15 3. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por** que el núcleo metálico (3) es ferromagnético.
- 20 4. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 3, **caracterizado por** que el núcleo ferromagnético (3) comprende un material seleccionado entre Cromo, Zirconio y combinación de ellos para ser resistente a agentes oxidantes del bloque de material cementicio (5).
- 25 5. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 3, **caracterizado por** que el núcleo ferromagnético (3) comprende un revestimiento aislante de vidrio (4) para ser resistente al entorno del bloque de material cementicio (5).
- 30 6. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 5, **caracterizado por** que el revestimiento aislante de vidrio (4) es un revestimiento de vidrio de borosilicato.
- 35 7. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 6, **caracterizado por** que el revestimiento de vidrio de borosilicato comprende una composición seleccionada entre 74.5% SiO<sub>2</sub>, 15% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3% Na<sub>2</sub>O, 2% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 1.5% K<sub>2</sub>O, y 73% SiO<sub>2</sub>, 16.5% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6% PbO, 3% Na<sub>2</sub>O, 1.5% K<sub>2</sub>O.
- 40 8. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 6, **caracterizado por** que el revestimiento de vidrio de borosilicato comprende una composición de al menos entre un 20-25% de Zr.
- 45 9. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 5, **caracterizado por** que el núcleo ferromagnético (3) comprende una composición química seleccionada entre CoFeSiB, FeSiB, FeNiSiB, y FeCoSiB con una proporción de Si+B superior al 14% e inferior al 35%, y de Co, Ni y de Fe de más del 40%.
- 50 10. Sensor (1) embebido para la medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6), según la reivindicación 5, **caracterizado por** que el núcleo ferromagnético (3) comprende una composición química seleccionada entre CoSiB y CoFeSiB con una proporción de Si+B superior al 15% e inferior al 35%, de Co de más de 40% y de Fe inferior al 6%.
11. Sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en un efecto de inducción electromagnética, **caracterizado por** que comprende al menos :

- un sensor (1) descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, donde el microhilo magnético (2) comprende una magnetostricción alta y positiva en un rango desde  $3e^{-5}$  hasta  $4e^{-5}$ , una biestabilidad magnética y donde el sensor (1) está embebido en la estructura de material cementicio (6);
- una bobina excitadora (7);
- una bobina sensora (8) concéntrica e interior a la bobina excitadora (7) que genera un campo inversor en su interior;
- una fuente de alimentación alterna conectada a la bobina excitadora (7); y,
- un sistema de lectura y representación del campo inversor generado en la bobina sensora (8).

12. Sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en el efecto de inducción electromagnética, según la reivindicación 11, **caracterizado por** que la bobina excitadora (7) y la bobina sensora (8) están colocadas externamente a la estructura de material cementicio (6).

13. Sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en el efecto de inducción electromagnética según la reivindicación 11, **caracterizado por** que la bobina excitadora (7) y la bobina sensora (8) están previamente arrolladas alrededor del sensor (1) y embebidas junto con el sensor (1) en la estructura de material cementicio (6).

14. Sistema de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en el efecto de magnetoinductancia, **caracterizado por** que comprende al menos:

- un sensor (1) descrito en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8 y 10, donde el microhilo magnético (2) comprende una magnetostricción baja y negativa en un rango desde  $-1e^{-7}$  hasta 0,
- una fuente de alimentación alterna conectada al microhilo magnético (2),
- una bobina excitadora (7) arrollada alrededor del sensor (1),
- una fuente de alimentación continua conectada a la bobina excitadora (7),
- una bobina de compensación (9) de campos locales arrollada alrededor del sensor (1) y conectada a la fuente de alimentación continua;
- un sistema de lectura y representación del voltaje como función del campo magnético creado por la bobina excitadora (7),

donde la bobina excitadora (7) y la bobina de compensación (9) están embebidas junto con el sensor (1) en la estructura de material cementicio (6).

15. Método de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en el efecto de inducción electromagnética que hace uso del sistema de medida definido en las reivindicaciones 11 a 13, **caracterizado por** que comprende:

- generar un voltaje o corriente alterna mediante la fuente de alimentación alterna que genera un campo magnético en la bobina excitadora (7) donde dicho campo magnético genera la propagación de una pared magnética a lo largo del microhilo magnético (2) del sensor (1) donde dicha pared magnética genera un pulso estrecho de voltaje en un campo inversor de la bobina sensora (8),
- medir el campo magnético inversor (10) generado en la bobina sensora (8) mediante un sistema de lectura y representación del campo magnético inversor (10),
- establecer la resistencia mecánica de la estructura de material cementicio (6) en base a la medida del campo magnético inversor (10).

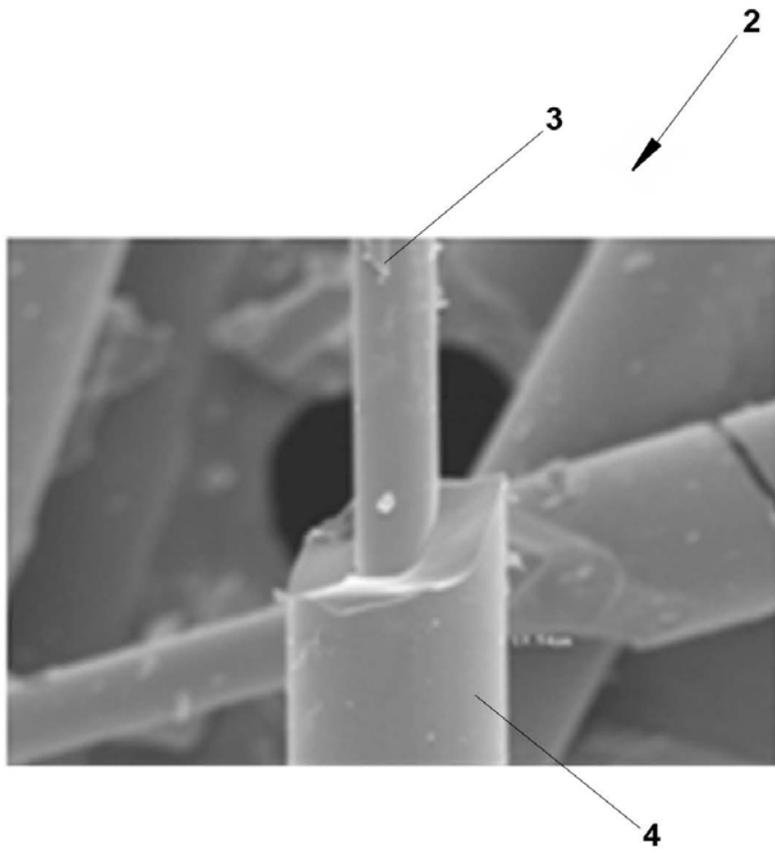
16. Método de medida continua de resistencias mecánicas en estructuras de material cementicio (6) basado en el efecto de magnetoinductancia que hace uso del sistema de medida definido en la reivindicación 14, **caracterizado por** que comprende:

- 5 - generar un voltaje o corriente alterna que pasa a través del microhilo magnético (2) mediante la fuente de alimentación alterna,
- generar un voltaje o corriente continuo que pasa a través de la bobina excitadora (7) generando un campo magnético,
- generar un voltaje o corriente continuo que pasa a través de la bobina de compensación (9) para compensar campos locales,
- 10 - medir mediante unas variaciones del voltaje en los extremos del microhilo magnético (2) como función del campo magnético creado por la bobina excitadora (7), y
- establecer la resistencia mecánica de la estructura de material cementicio (6) en base a la medida de las variaciones de voltaje.

15 17. Método de fabricación del sensor (1) embebido definido en una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, **caracterizado por** que comprende:

- fabricar el microhilo magnético (2) amorfo mediante técnicas de enfriamiento ultrarrápido convencionales y estiramiento,
- proteger el microhilo magnético (2) mediante una composición adecuada para que sea resistente al entorno alcalino del bloque de material cementicio (5),
- 20 • cortar el microhilo magnético (2) en tramos y someterlo a un tratamiento térmico seleccionado entre con corriente eléctrica y con horno convencional para estabilizar la estructura interna de dicho microhilo magnético (2), y mejorar la sensibilidad del microhilo magnético (2) a esfuerzos mecánicos aplicados,
- 25 • aplicar un tratamiento químico mediante ácidos a los extremos cortados del microhilo magnético (2) para obtener unos extremos pulidos y uniformes,
- embeber al menos el microhilo magnético (2) en un bloque de material cementicio (5); y
- curar el bloque de material cementicio (5) controlando la evolución de sus propiedades mecánicas mediante técnicas de evaluación no destructiva.

30



**FIG.1**

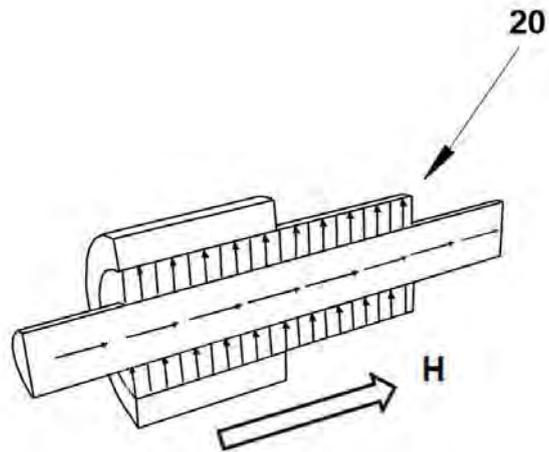


FIG. 2

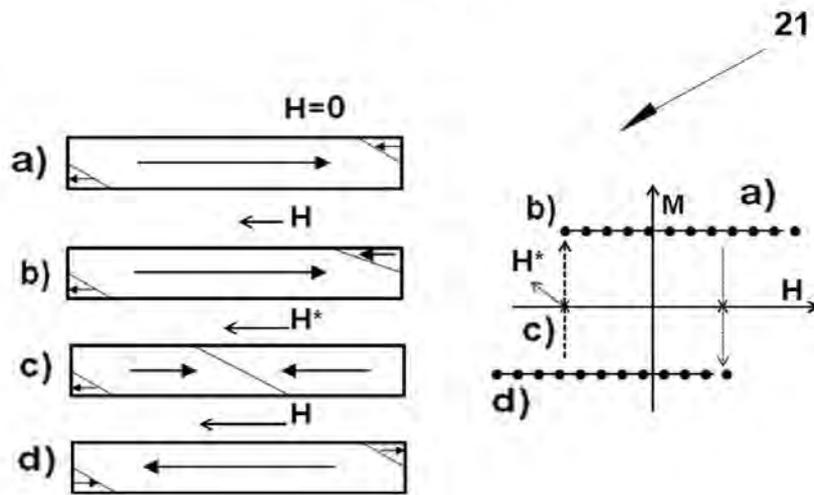


FIG. 2a

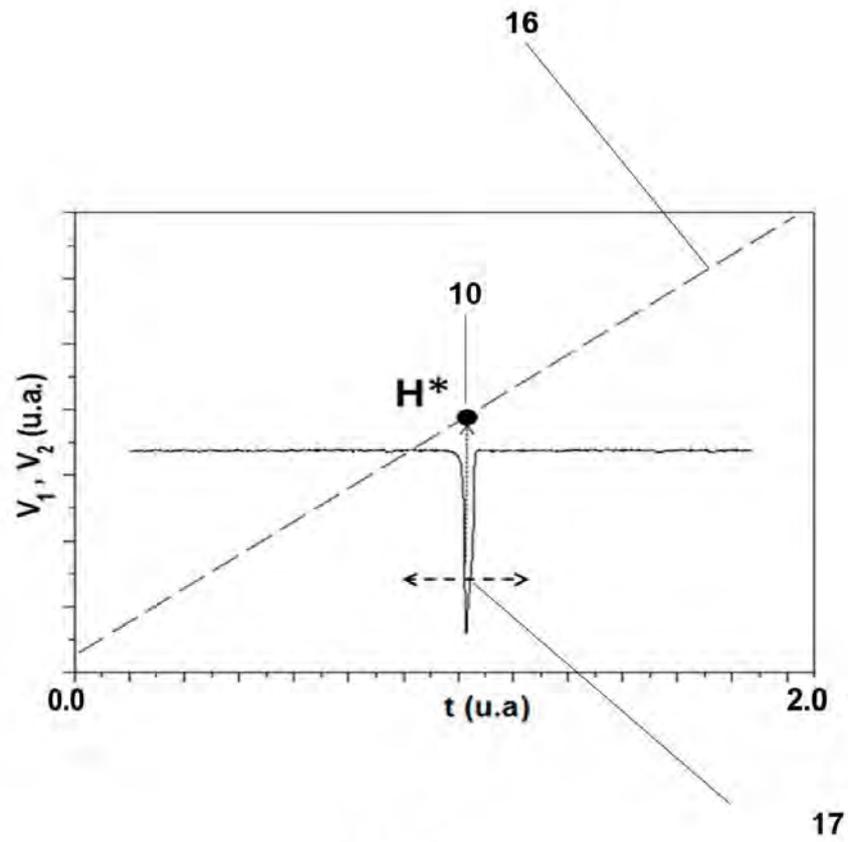


FIG.3

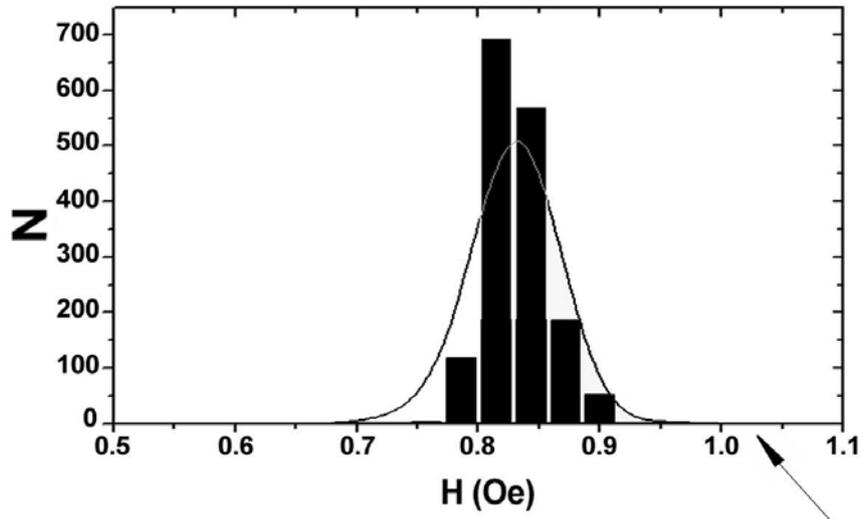


FIG.4a

15

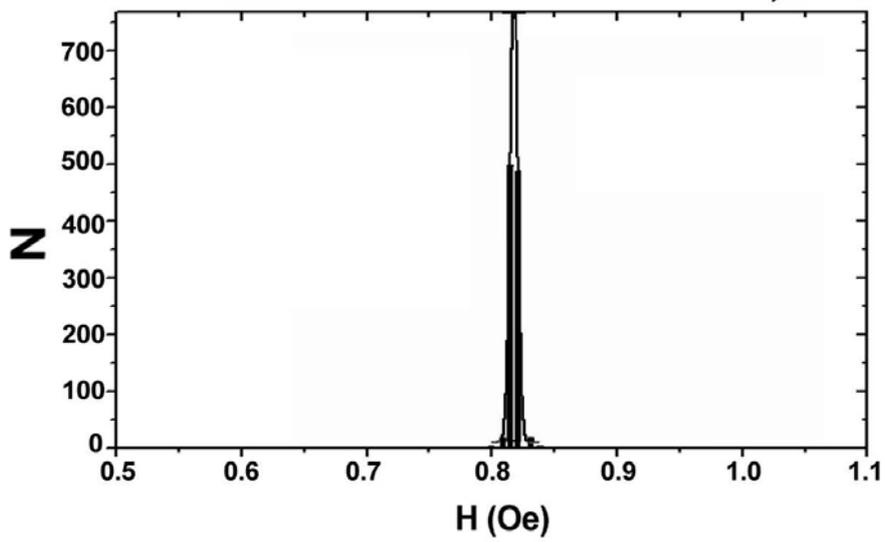
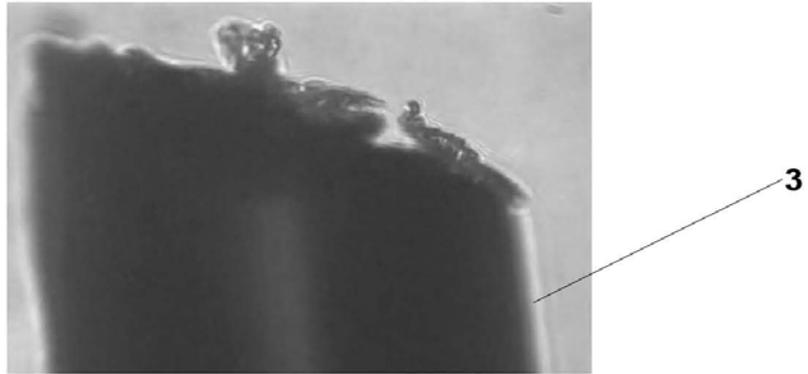
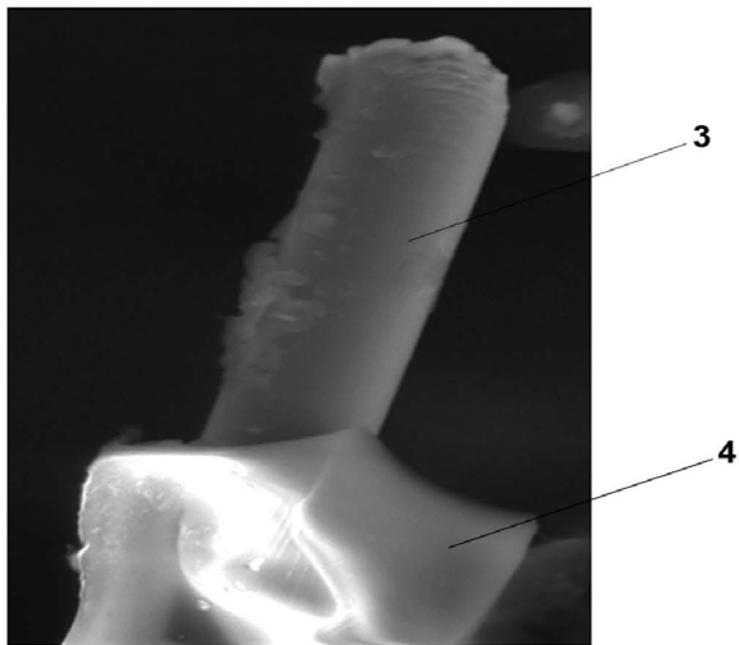


FIG.4b



**FIG.5a**



**FIG.5b**

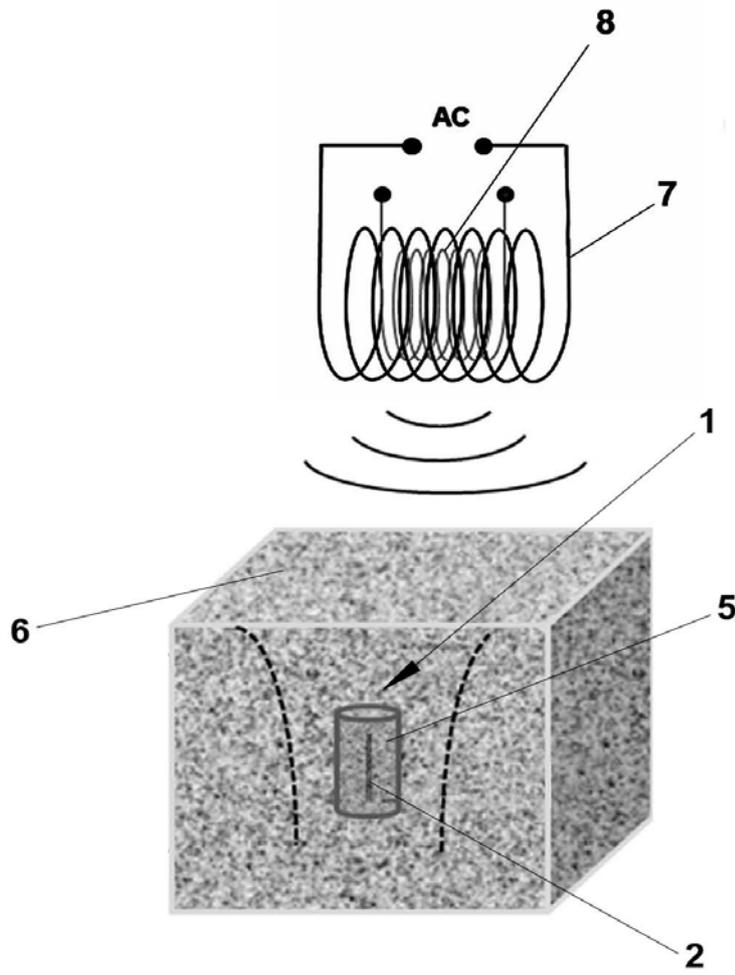
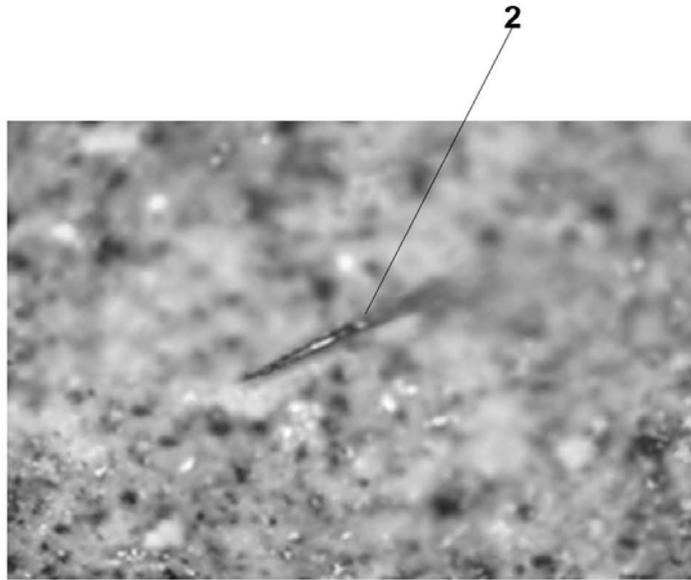
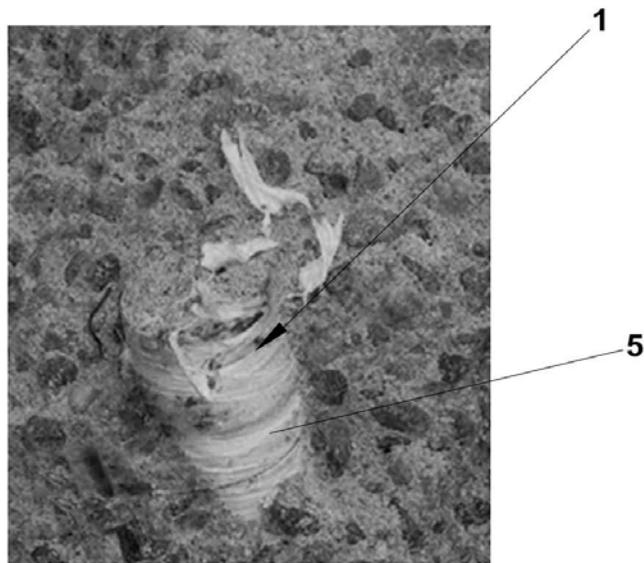


FIG.6a



**FIG.6b**



**FIG.6c**

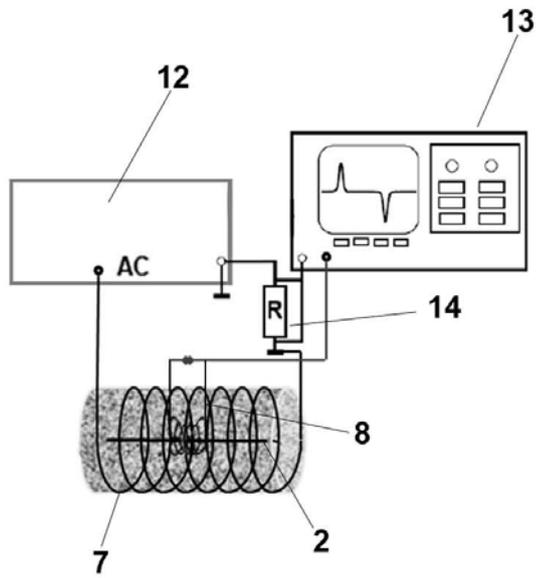


FIG.7a

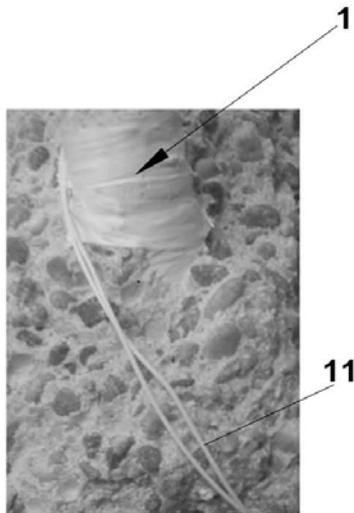


FIG.7b

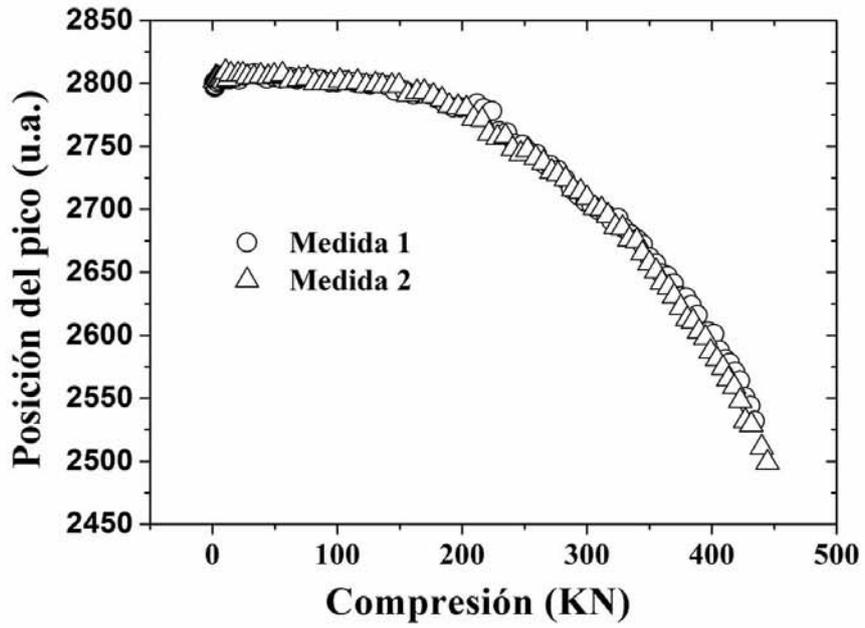


FIG.8a

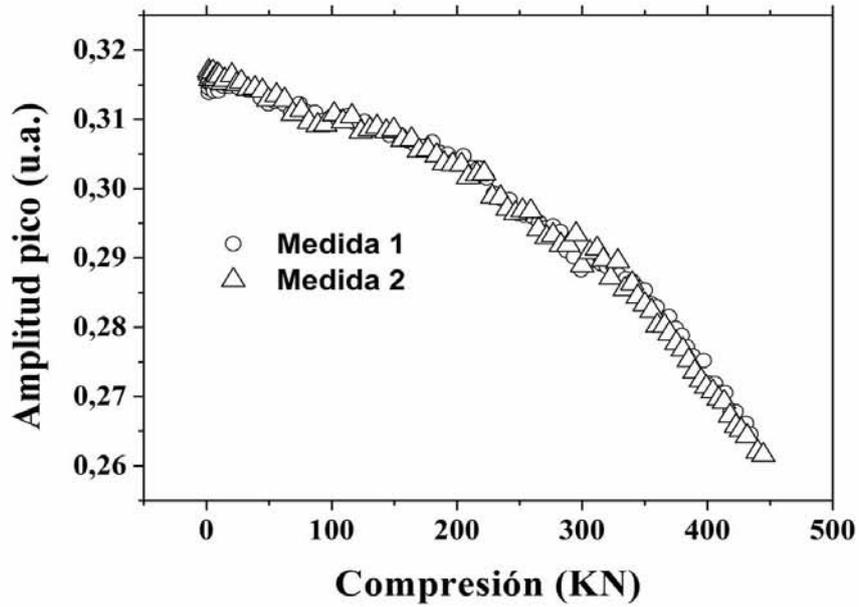


FIG.8b

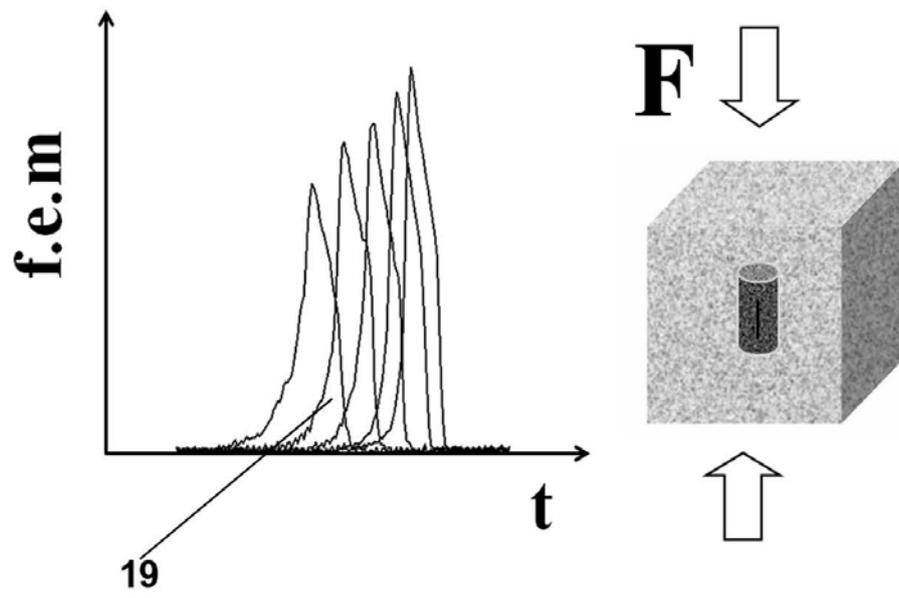
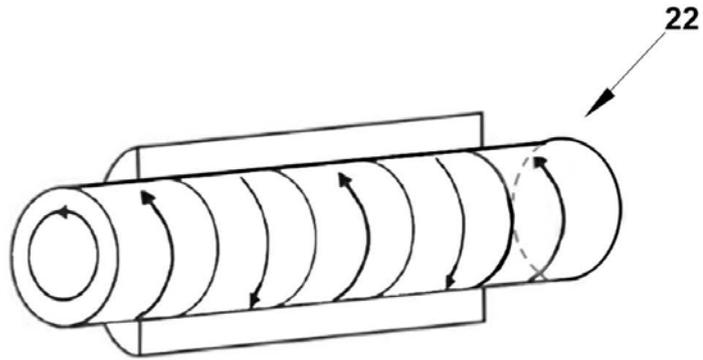
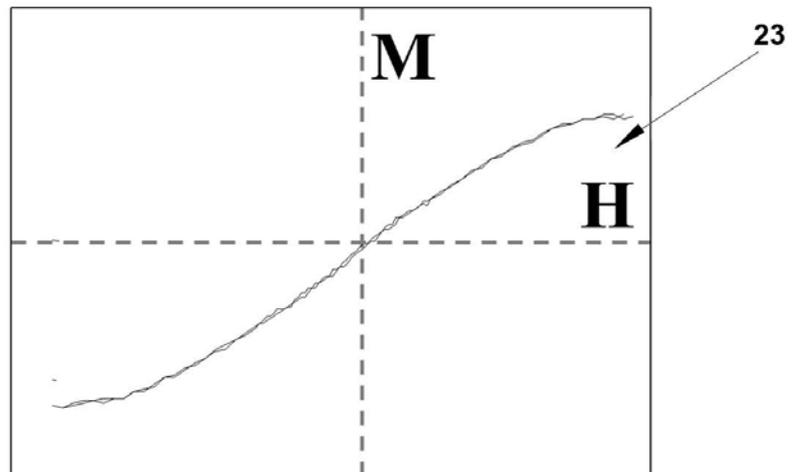


FIG.8c



**FIG. 9**



**FIG. 9a**

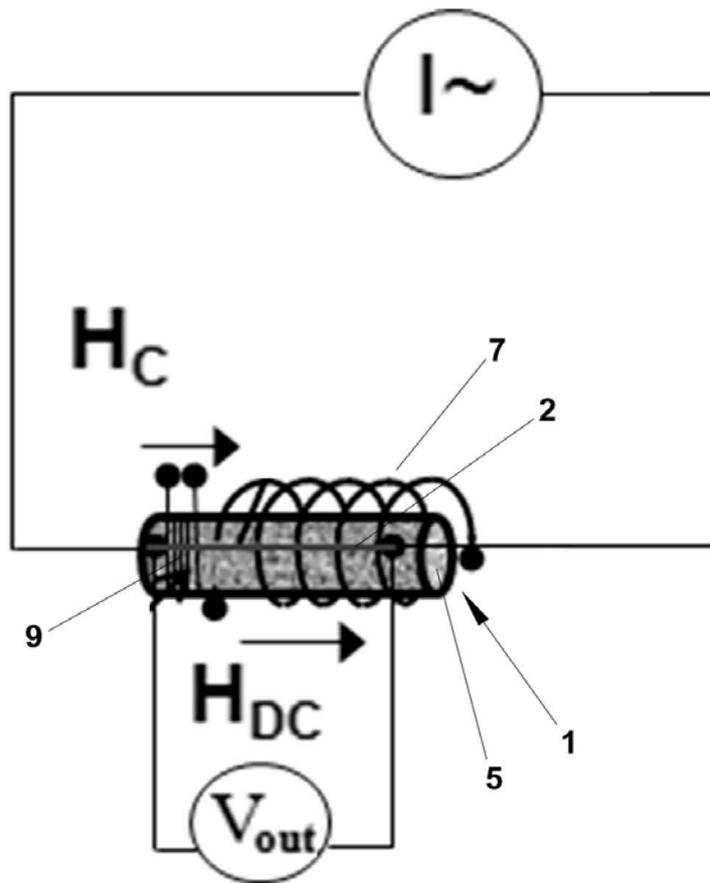
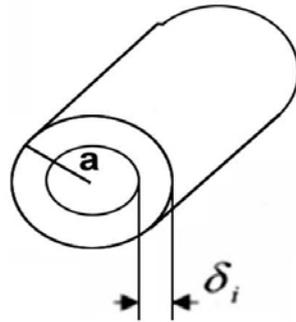
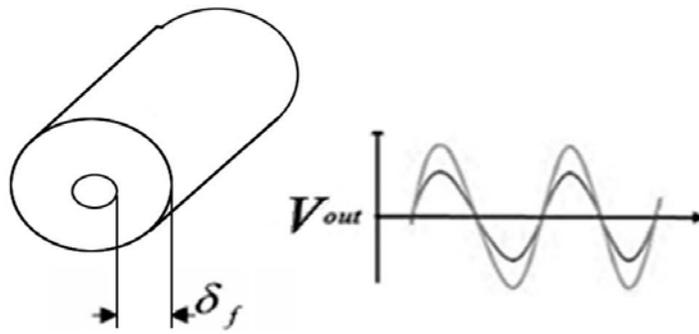


FIG.10a



$H_{DC} \circ F=0$

**FIG.10b1**



$H_{DC} \circ F \neq 0$

**FIG.10b2**

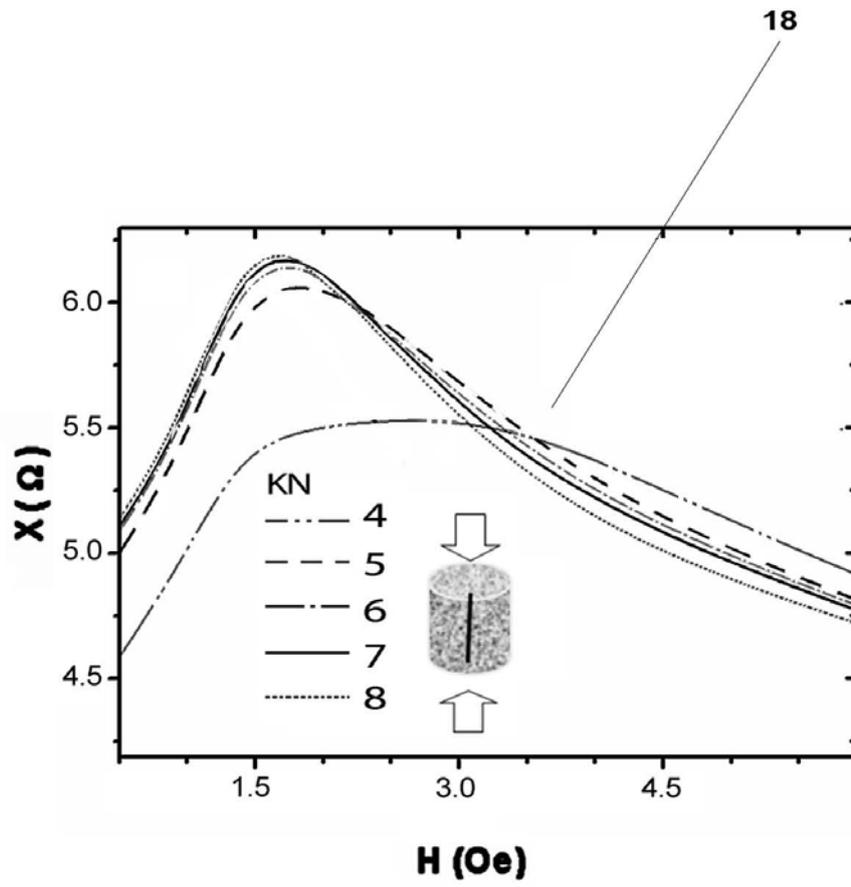


FIG.11