

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 959 578**

51 Int. Cl.:

**G01M 5/00** (2006.01)

**G01B 21/32** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.09.2017** E 17192529 (0)

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.07.2023** EP 3299762

54 Título: **Elemento estructural de hormigón instrumentado**

30 Prioridad:

**26.09.2016 FR 1659035**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**27.02.2024**

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET  
AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (50.0%)  
25 rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D"  
75015 Paris, FR y  
CONSOLIS (50.0%)**

72 Inventor/es:

**CARMONA, MIKAËL;  
JOUANET, LAURENT y  
CAMUEL, TONY**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

**ES 2 959 578 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Elemento estructural de hormigón instrumentado

La invención se refiere al campo de la edificación y las obras públicas, y en particular al seguimiento de la deformación de elementos estructurales de hormigón durante su ciclo de vida.

5 El seguimiento del estado de salud de las estructuras de hormigón está experimentando una fuerte expansión, por ejemplo para anticipar un fallo de la estructura, para seguir la evolución de su deformación o para implementar modificaciones preventivas. Los elementos estructurales de hormigón, tales como vigas, muros de contención o cajones enterrados, están cada vez más equipados para realizar un seguimiento de su estado de salud.

10 La deformada global de un elemento estructural tal como una viga es un parámetro geométrico estático ligado a la aplicación de una carga estática tal como la gravedad, o cuasi estático tal como el tráfico rodado en un puente, por ejemplo, frente a, por ejemplo, un fenómeno vibratorio o propagado. El seguimiento de la deformada de un elemento estructural se lleva a cabo durante un periodo de varios años, siendo su evolución lenta y de amplitud relativamente baja debido al diseño del elemento estructural. Dada la baja amplitud de las variaciones en la deformada, el seguimiento de esta deformada requiere una precisión muy elevada, normalmente de 1 mm por 10 m.

15 Un producto, presentado en 2014 con la referencia comercial Smart Sleeper, está destinado a determinar deformaciones locales, es decir las deformaciones del orden de algunos micrómetros por metro. A partir de estas deformaciones locales se deducen los momentos flectores de una traviesa de ferrocarril de hormigón. Este producto fue en particular objeto de una presentación por parte de la Sra. Loaëc et col, durante el congreso Transport Research Arena celebrado en París en 2014.

20 El documento US2002/0057097 describe un sistema de seguimiento de alteración de los materiales en una estructura. El sistema comprende sensores integrados en la estructura con electrodos en contacto con el material circundante. Las señales de los sensores se digitalizan localmente y luego se transmiten a un ordenador para su visualización.

25 El documento US2014/0012517 describe sensores de comportamiento fijados a la superficie de vigas. En función de las mediciones de estos sensores, se calcula una deformada de la viga en función de las mediciones de los sensores de comportamiento.

30 Este producto incluye, en particular, sondas revestidas de hormigón durante la fabricación de las traviesas de ferrocarril. Cada sonda comprende un extensómetro basado en fibra óptica con rejillas de Bragg. El extensómetro incluye dos placas metálicas separadas por 110 mm, colocadas en posición perpendicular con respecto al eje de la traviesa que se va a fabricar. Un tubo paralelo al eje de la traviesa conecta las dos placas. Una fibra óptica atraviesa el tubo. Esta fibra óptica incluye una rejilla de Bragg, colocada en el interior del tubo. La fibra está fijada a cada una de las placas. Así, la fibra entre las dos placas sufre la misma deformación que el hormigón circundante. Se conecta un circuito óptico a un extremo de la fibra, para inyectar una señal luminosa y medir la señal luminosa reflejada por la rejilla de Bragg. La señal luminosa reflejada depende de la rejilla de Bragg formada en la fibra y de la tensión de tracción/compresión aplicada a esta rejilla de Bragg. Normalmente se utiliza una misma fibra óptica para formar varias sondas por medio de rejillas de Bragg implantadas en diferentes ubicaciones a lo largo de esta fibra.

40 Preferiblemente, tales sondas deberían colocarse lo más lejos posible de la fibra neutra de la traviesa, con el fin de medir una amplitud máxima de deformación y presentar así la máxima precisión de medición. Cuanto más lejos esté la sonda de la fibra neutra, más cerca estará de la superficie de la traviesa de hormigón. La sonda queda entonces más expuesta a riesgos de deterioro o a perturbaciones externas. Además, la fibra óptica de rejilla de Bragg es muy sensible a la temperatura y a su modo de integración en el elemento estructural.

La proximidad de un sensor a la superficie de la traviesa de hormigón también puede tener un carácter intrusivo debido a su ubicación en una zona sometida a mayores tensiones, provocando una reducción de las prestaciones del producto de hormigón y un debilitamiento de la traviesa. Además, este producto sólo permite medir deformaciones locales del producto de hormigón.

45 La invención pretende resolver uno o varios de estos inconvenientes. Así, la invención se refiere a un elemento estructural de hormigón, tal como se define en la reivindicación 1 adjunta.

50 La invención también se refiere a las variantes de las reivindicaciones dependientes. Los expertos en la técnica comprenderán que cada una de las características de las variantes de las reivindicaciones dependientes puede combinarse independientemente con las características de la reivindicación 1, sin constituir una generalización intermedia.

La invención también se refiere a una estructura que comprende:

- varios elementos estructurales como los mencionados anteriormente;

- un circuito de procesamiento configurado para calcular una deformada global a partir de la deformada calculada para cada uno de dichos elementos estructurales.

Otras características y ventajas de la invención se desprenderán claramente de la descripción que se hace a continuación, a título informativo y no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 – la figura 1 es una vista lateral en sección longitudinal de un ejemplo de un elemento estructural de hormigón según un modo de realización de la invención;
- la figura 2 es una vista lateral de un ejemplo de sensor de comportamiento colocado en el elemento estructural;
- la figura 3 es una vista lateral en sección longitudinal del sensor de comportamiento de la figura 2;
- 10 – la figura 4 es una vista superior en sección longitudinal del sensor de comportamiento de la figura 2;
- la figura 5 es una vista en perspectiva del sensor de comportamiento de la figura 2;
- la figura 6 es una vista lateral en sección de una etapa de un ejemplo de un procedimiento de fabricación de un elemento estructural según la invención;
- 15 – la figura 7 es una vista en perspectiva de un ejemplo de una estructura completa que comprende varios elementos estructurales según la invención.

La Figura 1 es una vista lateral en sección longitudinal de un ejemplo de elemento estructural 1 de hormigón según un modo de realización de la invención. El elemento estructural 1 comprende, por un lado, una matriz 10 de hormigón y una estructura de refuerzo de acero incrustada en la matriz 10 de hormigón. Ventajosamente, la estructura de refuerzo de acero puede tensarse en tracción, de manera conocida en sí, con tecnología de hormigón pretensado o postensado. Asimismo, la estructura de refuerzo de acero, incrustada en la matriz 10 de hormigón, se puede dimensionar según las reglas para la construcción de hormigón armado con el empleo de barras de acero longitudinales. La estructura de refuerzo de acero incluye aquí varias barras de refuerzo 11 a 13 de acero, incrustadas en la matriz 10. Las barras 11 a 13 de acero se extienden aquí según una dirección longitudinal del elemento estructural 1. Las barras 11 a 13 de acero se extienden aquí en toda la longitud del elemento estructural 1 en su dirección longitudinal. Las barras 11 a 13 de acero normalmente pueden sobresalir de la matriz 10 en los extremos longitudinales del elemento estructural, para permitir la aplicación de una tensión de tracción (tensión de tracción en el cordón de acero durante la colada para inducir un pretensado (por tensión previa) en compresión en el hormigón cuando el acero se relaja) durante el procedimiento de fabricación. Las barras 11 a 13 de acero pueden constituir una armadura o una malla de acero. Ventajosamente, la o las barras 11 a 13 de acero tienen un diámetro comprendido entre 5 y 50 mm. Tal armadura o malla de acero no constituye una viga en sí misma, sino una estructura de refuerzo conocida en sí misma para la matriz de hormigón que forma la parte esencial de la viga o elemento estructural 1. Tal armadura sigue las deformaciones del hormigón en el que está incrustada, no formando la asociación de las barras de acero de la armadura en sí misma una viga.

El elemento estructural 1 descansa aquí sobre dos soportes 91 y 92, colocados en sus extremos longitudinales. El elemento estructural 1 se somete aquí a una flexión por su propio peso, alrededor de un eje perpendicular a esta dirección longitudinal. El elemento estructural 1 tiene así una deformada con respecto a su dirección longitudinal.

El elemento estructural 1 comprende además varios sensores de comportamiento separados entre sí en su dirección longitudinal. El comportamiento de un sensor está definido por la rotación que permite pasar del sistema de ejes del sensor a un sistema de ejes de referencia. El comportamiento se puede parametrizar mediante tres ángulos: la inclinación, el balanceo y el acimut. Hay varias maneras de definir estos tres ángulos. Cuando un sensor se integra en un elemento estructural de hormigón de modo que uno de sus ejes sea tangente a la fibra (virtual), o dicho de otro modo a la dirección longitudinal del elemento estructural sobre el que está colocada la red de sensores, entonces:

- la inclinación del sensor corresponde entonces al ángulo de la tangente de la fibra en el punto de medición con respecto a un eje de un referencial fijo (por ejemplo el eje dirigido por la gravedad);
- 45 • El balanceo corresponde al ángulo de rotación alrededor del eje dirigido por la tangente de la fibra en el punto de medición;
- El acimut corresponde al ángulo de rotación alrededor del eje dirigido por el eje del referencial fijo a partir del cual se define la inclinación.

El elemento estructural 1 comprende aquí tres sensores 21, 22 y 23 de comportamiento distribuidos a lo largo de su longitud. Los sensores 21 a 23 de comportamiento están incrustados en la matriz 10 de hormigón, lo que permite tanto protegerlos como vincular su comportamiento a la deformada del elemento estructural 1, en lugar de extrapolar la deformada del elemento estructural desde el exterior. Además, debido a su incrustación en la matriz 10 de hormigón,

toda la superficie desarrollada de estos sensores 21 a 23 se ve solicitada por las deformaciones de esta matriz 10. Así se aumenta la fidelidad de la respuesta de estos sensores 21 a 23. Los sensores 21 a 23 de comportamiento se fijan además (por ejemplo mediante soldadura) en posición desde la estructura de refuerzo. Así, se pueden definir con precisión sus posiciones longitudinales respectivas con respecto al elemento estructural 1.

5 En este ejemplo, los sensores de comportamiento están fijados o bloqueados en posición a la barra 12 de acero. La barra 12 de acero está colocada en este caso al nivel de la fibra neutra del elemento estructural 1. En la teoría de las vigas, la fibra neutra designa una curva que pasa por el centro de gravedad de las secciones rectas del elemento estructural 1. Cuando estamos en el ámbito de las pequeñas deformaciones, la longitud de esta fibra neutra no varía en la flexión. Por lo tanto, es particularmente precisa una deformada calculada para el elemento estructural 1 a partir de mediciones de comportamiento al nivel de la fibra neutra. La instrumentación con los sensores 21 a 23 de comportamiento según la invención está normalmente destinada a detectar una deformación de 1 mm en 10 metros de longitud del elemento estructural 1 según los ejes x, y, z. Así, debido a su fijación a la barra 12 de acero, los sensores 21 a 23 de comportamiento están colocados ventajosamente al nivel de la fibra neutra del elemento estructural 1. Si los sensores 21 a 23 de comportamiento no están colocados rigurosamente al nivel de la fibra neutra del elemento estructural 1, se colocan ventajosamente a una distancia como máximo igual a 150 mm de la fibra neutra de este elemento estructural. Los sensores de comportamiento también pueden colocarse ventajosamente a una distancia de la fibra neutra del elemento estructural 1 como máximo igual al 40% de la distancia de la fibra neutra/superficie del elemento estructural 1. En tal configuración, los sensores 21 a 23 de comportamiento también están mejor protegidos de los ataques y perturbaciones externas gracias al revestimiento de hormigón.

20 Los sensores 21 a 23 de comportamiento comprenden cada uno, por ejemplo, un acelerómetro configurado para medir al menos una componente de aceleración según la dirección longitudinal del elemento estructural 1, y un circuito de cálculo configurado para calcular el comportamiento del sensor en función de la medición de su acelerómetro, de manera conocida en sí misma.

25 Los acelerómetros de los sensores 21 a 23 están formados, por ejemplo, por componentes MEMS. Tales sensores MEMS han demostrado su estabilidad en temperatura y tiempo, y actualmente pueden tener resoluciones del orden de 0,1 mg. Tales sensores MEMS son del tipo inercial y satisfacen la medición de inclinación/comportamiento cuando la carga aplicada al elemento estructural 1 es estática.

30 Los sensores 21 a 23 de comportamiento se comunican con un circuito 3 de procesamiento. La comunicación entre los sensores 21 a 23 de comportamiento y el circuito 3 de procesamiento se realiza, por ejemplo, a través de un cable o haz eléctrico 200. Como se detalla a continuación, el circuito 3 de procesamiento recupera las mediciones de comportamiento proporcionadas por cada sensor 21 a 23 de comportamiento y calcula una deformada del elemento estructural 1 en función de estas mediciones de comportamiento.

35 La deformada calculada puede ser útil para determinar el estado de salud de una estructura incluyendo el elemento estructural. Por ejemplo, si la deformada del elemento estructural 1 calculada por el circuito 3 de procesamiento difiere significativamente de la deformada simulada durante el diseño, se puede detectar y corregir una anomalía de diseño, de fabricación o de instalación. La deformada calculada permite en particular determinar si los parámetros mecánicos estructurales (por ejemplo, el módulo de Young, el coeficiente de Poisson, la velocidad de propagación de las ondas elásticas) se encuentran en un rango que aún garantiza la utilización continuada del elemento estructural 1.

40 Los sensores 21 a 23 de comportamiento con acelerómetro también pueden utilizarse ventajosamente para realizar mediciones de vibraciones.

Para un elemento estructural rectilíneo 1 de 30 m de hormigón, se puede considerar, por ejemplo, distribuir al menos 2 sensores y preferiblemente 7 sensores de comportamiento a lo largo de este elemento estructural, para beneficiarse de una buena precisión en el cálculo de su deformada.

45 Cada sensor 21 a 23 de comportamiento comprenderá ventajosamente un acelerómetro de tres ejes. Cada sensor de comportamiento también puede comprender un sensor de temperatura y/o un magnetómetro de múltiples ejes.

50 Las figuras 2 a 5 ilustran más precisamente un ejemplo de la estructura de un sensor 20 de comportamiento. El sensor 20 de comportamiento incluye una placa 230 de circuito impreso. La placa 230 de circuito impreso soporta un acelerómetro 231 y un circuito 232 de cálculo, ilustrados esquemáticamente. El circuito impreso 230 forma una interconexión eléctrica entre el acelerómetro 231 y el circuito 232 de cálculo. El circuito 232 de cálculo calcula de manera conocida en sí mismo el comportamiento del sensor 20 en función de las mediciones realizadas por el acelerómetro 231.

55 El sensor 20 de comportamiento incluye una envolvente 220 de protección del circuito impreso 230, del acelerómetro 231 y del circuito 232 de cálculo. La envolvente 220 tiene una forma alargada según una dirección longitudinal, correspondiente a la dirección longitudinal del elemento estructural 1 o de una barra de acero a la que debe fijarse el sensor 20. Los cables eléctricos 201 y 202 penetran en la envolvente 220 por extremos longitudinales opuestos. Los cables eléctricos 201 y 202 comprende, por ejemplo, cables de comunicación conectados al circuito 232 de cálculo, cables de alimentación del circuito 232 de cálculo y del acelerómetro 231, y cables de comunicación y/o de

alimentación destinados a otro sensor de comportamiento. La envolvente 220 comprende aquí un material que reviste el circuito impreso 230, el acelerómetro 231 y el circuito 232 de cálculo. El material de revestimiento es por ejemplo poliuretano o epoxi, que protege contra ataques químicos y físicoquímicos, que favorece la absorción de posibles impactos y tensiones durante la colada del hormigón, y que tiene una adherencia óptima con el hormigón del elemento estructural para favorecer un acoplamiento mecánico íntimo con él. La calidad del acoplamiento mecánico entre un sensor de comportamiento y el hormigón permite mejorar la precisión de la medición del comportamiento en el elemento estructural. La envolvente 220 puede, por ejemplo, moldearse alrededor del circuito impreso 230, del acelerómetro 231 y del circuito 232 de cálculo. La envolvente 220 puede, por ejemplo, moldearse hasta un grosor de al menos 15 mm sobre estos elementos.

5  
10  
15

Ventajosamente, la envolvente 220 incluye protuberancias que garantizan la estabilidad de la posición y del comportamiento del sensor 20 durante la retirada del hormigón, así como su acoplamiento mecánico al hormigón. Tales protuberancias también permiten evitar la formación de huecos en el hormigón cuando se retiran. En el ejemplo ilustrado, las protuberancias 223 y 224 están formadas en la envolvente 220. Estas protuberancias 223 y 224 están desplazadas longitudinalmente. Estas protuberancias 223 y 224 tienen cada una de ellas una forma anular, perpendicular a la dirección longitudinal del sensor 20. Las protuberancias 223 y 224 sobresalen, por ejemplo, radialmente al menos 15 mm, preferiblemente al menos 20 mm con respecto al resto de la envolvente 220.

20  
25

El sensor 20 incluye placas 211 y 212, colocadas perpendicularmente a su dirección longitudinal. Las placas 211 y 212 están destinadas a asegurar la fijación del sensor 20 en una barra de acero de la estructura de refuerzo, por un lado para mantener su posición longitudinal con respecto a la barra de acero y mantener su comportamiento con respecto a esta barra de acero, incluso durante las etapas de colada de hormigón. Ventajosamente, las placas 211 y 212 están hechas de metal, con el fin de tener suficiente rigidez para la fijación del sensor 20 con una barra de acero. Ventajosamente, las placas 211 y 212 están relativamente alejadas, con el fin de mejorar el posicionamiento del sensor 20 con respecto a una barra de acero. La distancia entre las placas 211 y 212 es, por ejemplo, al menos igual a 250 mm. El acelerómetro 231 está ventajosamente colocado entre las placas 211 y 212. Para permitir la fijación de las placas 211 y 212 en una barra de acero, las placas 211 y 212 incluyen ventajosamente orificios pasantes respectivos 213 y 214. Los orificios 213 y 214 están alineados longitudinalmente.

30

La envolvente 220 está aquí sobremoldeada en las entradas de los cables 201 y 202 y permite asegurar la recuperación mecánica de las fuerzas ejercidas por los cables 201 y 202. La envolvente 220 está aquí sobremoldeada sobre una parte de las placas 211 y 212, para asegurar una conexión mecánica entre el circuito impreso 230 y estas placas 211 y 212.

El circuito 3 de procesamiento está configurado para recuperar las mediciones de comportamiento de los diferentes sensores 21 a 23 de comportamiento. El circuito 3 de procesamiento está configurado para calcular la deformada global o la curvatura del elemento estructural 1, en función de las diferentes mediciones de comportamiento recuperadas.

35  
40

Durante la deformación del elemento estructural 1 en flexión, se modifica el comportamiento de los diferentes sensores 21 a 23, debido a su acoplamiento mecánico con el hormigón del elemento estructural. El circuito 3 de procesamiento está programado para evaluar el comportamiento en cualquier punto del elemento estructural, a partir de las mediciones proporcionadas por los sensores 21 a 23. Tal evaluación se realiza, por ejemplo, por medio de métodos de interpolación, tales como la interpolación por splines cúbicos. Ejemplos de métodos de interpolación y de reconstrucción se describen, por ejemplo, en el capítulo 1 de la tesis doctoral de N. Sprynski, "Reconstruction de courbes et surfaces à partir de données tangentielles" ("Reconstrucción de curvas y superficies a partir de datos tangenciales"), Universidad Joseph Fourier, Grenoble, Francia, 2007.

Asimismo, durante la deformación del elemento estructural 1 en torsión, se modifica el comportamiento de los diferentes sensores 21 a 23, debido a su acoplamiento mecánico con el hormigón del elemento estructural.

45

Un ejemplo para calcular la deformada del elemento estructural 1 a partir de las mediciones de comportamiento/inclinación de los diferentes sensores de comportamiento puede ser el siguiente. Se supone que los sensores 21 a 23 de comportamiento son sensores de 3 ejes, que realizan una medición  $m(t,s)$  expresada en g, siendo  $t$  el instante de medición y  $s$  la abscisa curvilínea de un sensor a lo largo del elemento estructural 1. Con  $\varphi(t,s)$  la inclinación y  $\eta(t,s)$  su balanceo introducidos anteriormente:

50

$$m(t, s) = \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t, s)) \\ -\sin(\varphi(t, s)) * \sin(\eta(t, s)) \\ -\sin(\varphi(t, s)) * \cos(\eta(t, s)) \end{bmatrix}$$

Los sensores de comportamiento del acelerómetro de 3 ejes en el elemento estructural 1 proporcionan un muestreo espacial de la inclinación/comportamiento en toda la longitud provista por estos sensores, en función de la abscisa curvilínea a lo largo de este elemento de la estructura 1. Utilizando un modelo de interpolación o aproximación a partir de los comportamientos discretos proporcionados por los sensores 21 a 23 de comportamiento, es posible extrapolar

una función continua representativa de la inclinación/comportamiento en función de la abscisa curvilínea  $s$  a lo largo del elemento estructural 1. La deformada vertical del elemento estructural 1 en cualquier punto se define utilizando esta función en la siguiente relación:

$$Def(t, s) = \begin{bmatrix} X(t, s) \\ Y(t, s) \end{bmatrix} = Def(t, s_0) + \int_{u=s_0}^s \begin{bmatrix} \cos(\varphi(t, u)) \\ \sin(\varphi(t, u)) \end{bmatrix} du$$

5 En la referencia  $(O, \vec{X}, \vec{Y})$  dónde  $\vec{Y}$  es colineal con la gravedad y  $\vec{X}$  es colineal con la fibra neutra.

Partiendo de la hipótesis de que el punto de abscisa curvilínea  $s_0$  permanece fijo en el tiempo (por ejemplo, incrustación del elemento estructural 1 en la abscisa  $s_0$ ), entonces  $Def(t, s_0)=0$ . La deformada global se determina entonces completamente por medio de la función de inclinación continua.

10 La precisión del cálculo de la deformada global del elemento estructural 1 depende en particular de los siguientes parámetros del sensor de comportamiento:

- 15 – su tecnología, que influye en los siguientes parámetros: su resolución (aceleración más pequeña que se puede detectar) del sensor de comportamiento, su desviación estándar del ruido de medición (vinculada a la resolución en determinadas tecnologías), su estabilidad en temperatura (deriva en  $mg/^{\circ}K$ ) y su estabilidad en el tiempo (deriva en  $mg/año$ ). La noción de estabilidad en el tiempo integra las derivas en la sensibilidad y la calibración del sensor, pero también las derivas en los ángulos entre cada eje de medición para un acelerómetro de 3 ejes cuando está compuesto por 3 acelerómetros perpendiculares de un solo eje;
- 20 – la densidad y distribución espacial de los sensores de comportamiento a lo largo del elemento estructural 1. La reconstrucción es más precisa cuanto mayor sea el número de nodos de medición y más adecuada su distribución. Para un elemento estructural 1 de estructura geométrica sustancialmente homogénea en su longitud, es óptima una distribución uniforme de los sensores de comportamiento según la dirección longitudinal. Para tal estructura, con los sensores de comportamiento probados, resulta suficiente una cantidad de 1 sensor de comportamiento por cada 10 metros de longitud, siendo óptimo un sensor por cada metro;
- 25 – incertidumbres sobre la instalación de sensores de comportamiento. Un acelerómetro de 3 ejes permite estimar la inclinación que forma su propio marco de referencia con la dirección de orientación del elemento estructural 1. La deformada global calculada es tanto más precisa cuanto que el eje de la marca que define la inclinación de cada acelerómetro de un sensor de comportamiento es tangente a la deformada total que se va a calcular. Mediante la calibración del sistema de sensores de comportamiento se determina el ángulo que define la diferencia entre el eje del acelerómetro y la tangente a la deformada global que se va a calcular.
- 30 La calibración se realiza con respecto a una referencia, aquí una información sobre la inclinación/comportamiento teórico en cada punto de medición de un sensor de comportamiento, de un modelo o de un experto. Después de la colada y endurecimiento del hormigón, normalmente se coloca un elemento estructural según la invención con su dirección longitudinal paralela a la horizontal, apoyado sobre una superficie plana. Se efectúa entonces una calibración de cada sensor de comportamiento con respecto
- 35 a esta inclinación teórica controlada;
- las incertidumbres en las abscisas curvilínea de los sensores de comportamiento. La incertidumbre en la abscisa de un sensor de comportamiento influye en el rendimiento de la reconstrucción. Las abscisas curvilíneas se determinan antes de la colada del hormigón, por ejemplo por medio de medición o de fijación en abscisas bien predefinidas mediante topes;
- 40 – el modelo de interpolación/aproximación de la función continua de inclinación/comportamiento. Para un elemento estructural 1 cuya fibra neutra es sustancialmente rectilínea, la función de inclinación es suave y puede aproximarse por medio de un polinomio de grado reducido, por ejemplo de grado 3. Los expertos en la técnica conocen otros modelos de interpolación para definir una función de inclinación a partir de mediciones puntuales.

45 En el ejemplo, hemos ilustrado una aplicación de un elemento estructural rectilíneo 1. La invención se aplica evidentemente a elementos estructurales de hormigón no rectilíneos o incluidos en una estructura de geometría compleja.

La invención se aplica también a varios productos instrumentados en una misma estructura, permitiendo extrapolar una deformada de superficie/volumen mediante interpolación de deformaciones lineales discretizadas en el espacio.

50 La figura 6 es una vista lateral esquemática en sección de un elemento estructural 1 durante una etapa de un ejemplo de un procedimiento de fabricación. En este ejemplo, se ha proporcionado un molde 3 destinado a definir la forma del elemento estructural 1. Una estructura de refuerzo de acero que comprende, por ejemplo, barras 11, 12 y 13 de acero

5 está soportada por el molde 3. Las barras 11 a 13 de acero se extienden aquí en dirección longitudinal del elemento estructural 1 que se va a formar. Las barras 11 a 13 de acero pueden conectarse entre sí de manera conocida en sí misma por otras barras de acero transversales para formar un enrejado. Los sensores 21 a 23 de comportamiento han sido previamente fijados o colocados a partir de la barra 12 de acero. Los sensores 21 a 23 de comportamiento están separados entre sí en la dirección longitudinal del elemento estructural 1 que se va a formar. Los sensores 21 a 23 de comportamiento están distribuidos según esta dirección longitudinal. Los sensores 21 a 23 de comportamiento están aquí fijados en una barra 12 de acero colocada al nivel de la fibra neutra del elemento estructural 1 que se va a formar. El posicionamiento longitudinal de los diferentes sensores 21 a 23 de comportamiento puede medirse después de su fijación en la barra 12 de acero, o entonces estos sensores 21 a 23 de comportamiento pueden fijarse en ubicaciones referenciadas previamente a lo largo de la barra 12 de acero.

10 Los sensores 21 a 23 de comportamiento están aquí conectados por un cable o haz eléctrico 200, que sobresale del molde 3. Así, el cable 200 estará conectado a los sensores 21 a 23 de comportamiento y será accesible desde el exterior, después de la colada de la matriz de hormigón. El cable 200 está destinado a permitir la comunicación entre los sensores 21 a 23 de comportamiento y el circuito 3 de procesamiento externo y/o una alimentación eléctrica de los sensores 21 a 23 de comportamiento. El cable 200 normalmente puede discurrir a lo largo de la barra 12 de acero.

15 Las barras 11 a 13 de acero pueden someterse previamente a una tensión de tracción, mantenida hasta el endurecimiento del hormigón, para formar un elemento estructural 1 en hormigón pretensado. La aplicación de una tensión de tracción sobre la barra 12 de acero se puede realizar previamente a la fijación de los sensores 21 a 23 de comportamiento en esta barra de acero. En la Figura 6, se está colando una matriz 10 de hormigón dentro del molde 3, para incrustar las barras 11 a 13 de acero. La matriz 10 de hormigón puede ser colada, por ejemplo, por gravedad. Con el fin de facilitar la evacuación del aire contenido en la matriz 10 de hormigón con vistas a densificarla, el molde 3 puede ser puesto en vibración. Después de la colada de la matriz 10 de hormigón, el molde 3 puede estar dispuesto en un horno para acelerar el endurecimiento de la matriz 10 de hormigón. Por ejemplo, se puede llevar a cabo una etapa de utilización que dure hasta 24 horas con una temperatura de calentamiento de hasta 60°C.

20 A continuación se puede continuar el proceso de fabricación del elemento estructural 1 retirando el molde 3.

25 Anterior o posteriormente a la retirada del molde 3, se lleva a cabo una etapa de calibración del elemento estructural 1. Leyendo los comportamientos medidos por los sensores 21 a 23, el elemento estructural 1 se puede calibrar para tener en cuenta la incidencia del procedimiento de fabricación en el comportamiento (en inclinación y en balanceo) de los sensores 21 a 23, por ejemplo debido a la colada de la matriz 10 de hormigón o la vibración del molde 3. Así, se miden los comportamientos de los sensores 21 a 23 para una configuración nominal del elemento estructural. Así, se puede calcular con precisión la deformada del elemento estructural 1 con respecto a esta posición nominal.

30 La Figura 7 es una vista en perspectiva de un ejemplo de estructura 8, que comprende varios elementos estructurales 101 a 104 como se detalló anteriormente. Los elementos estructurales 101 a 104 son aquí rectilíneos y se extienden en la misma dirección. El circuito 3 de procesamiento está aquí configurado para calcular una deformada global de la estructura 8, a partir del cálculo de la deformada de cada uno de los elementos estructurales 101 a 104.

**REIVINDICACIONES**

1. Elemento estructural (1) de hormigón, que comprende:
- una matriz (10) de hormigón;
  - una estructura (11, 12, 13) de refuerzo de acero incrustada en dicha matriz (10);
- 5       – al menos un primer y segundo sensores (21, 22) de comportamiento separados entre sí según una dirección, fijados a dicha estructura de refuerzo;
- un circuito (3) de procesamiento configurado para recuperar mediciones de comportamiento proporcionadas por cada sensor (21, 22) de comportamiento y configurado para calcular una deformada de dicho elemento estructural con respecto a dicha dirección en función de las mediciones de comportamiento recuperadas;
- 10      caracterizado por que el primero y segundo sensores (21, 22) de comportamiento están incrustados en dicha matriz.
2. Elemento estructural (1) según la reivindicación 1, en el que dicha estructura (11, 12, 13) de refuerzo de acero comprende una barra (12) de acero sobre la que están colocados el primero y segundo sensores (21, 22) de comportamiento.
3. Elemento estructural (1) según la reivindicación 2, en el que dicha estructura (11, 12, 13) de refuerzo de acero comprende varias barras (12) de acero que forman una armadura o enrejado metálico.
- 15      4. Elemento estructural (1) según la reivindicación 3, en el que dichas barras (12) de acero tienen un diámetro comprendido entre 5 y 50 mm.
5. Elemento estructural (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichos primer y segundo sensores (21, 22) están colocados a una distancia de la fibra neutra del elemento estructural en cuestión como máximo igual al 40% de la distancia de fibra neutra/superficie para una flexión alrededor de un eje perpendicular a dicha dirección.
- 20      6. Elemento estructural (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que cada uno de dichos primer y segundo sensores (21, 22) de comportamiento comprende:
- un acelerómetro (231) configurado para medir un componente de aceleración en dicha dirección;
- 25      – un circuito (232) de cálculo configurado para calcular el comportamiento del sensor en función de la medición del acelerómetro.
7. Elemento estructural (1) según la reivindicación 6, en el que dicho circuito (232) de cálculo está configurado para efectuar una medición vibratoria en función de la medición del acelerómetro.
8. Elemento estructural (1) según la reivindicación 6 o 7, en el que cada uno de dichos primer y segundo sensores (21, 22) de comportamiento comprende un soporte al que está fijado su acelerómetro respectivo (231), comprendiendo el soporte dos placas (211, 212) perpendiculares a dicha dirección, estando colocado dicho acelerómetro entre estas dos placas.
- 30      9. Elemento estructural según la reivindicación 8, en el que dichas placas incluyen cada una un orificio respectivo (213, 214) atravesado por dicha estructura de refuerzo.
- 35      10. Elemento estructural según la reivindicación 8 o 9, en el que dichas placas (211, 212) están soldadas a dicha estructura de refuerzo.
11. Elemento estructural (1) según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicho soporte incluye una envolvente (220) sobremoldeada sobre dicho acelerómetro (231) y sobre dicho circuito (232) de cálculo.
- 40      12. Elemento estructural (1) según la reivindicación 11, en el que dicha envolvente (220) está hecha de poliuretano sobremoldeado con un grosor de al menos 15 mm sobre dicho acelerómetro y sobre dicho circuito (232) de cálculo.
13. Elemento estructural (1) según la reivindicación 11 o 12, en el que dicha envolvente (220) tiene al menos una protuberancia (223) que sobresale radialmente al menos 15 mm.
14. Elemento estructural (1) según la reivindicación 13, en el que dicha protuberancia (223) tiene una forma anular perpendicular a dicha dirección.
- 45      15. Estructura, caracterizada porque comprende:
- varios elementos estructurales (1) de hormigón según cualquiera de las reivindicaciones anteriores;

- un circuito (3) de procesamiento configurado para calcular una deformada global a partir de la deformada calculada para cada uno de dichos elementos estructurales.

Fig. 1

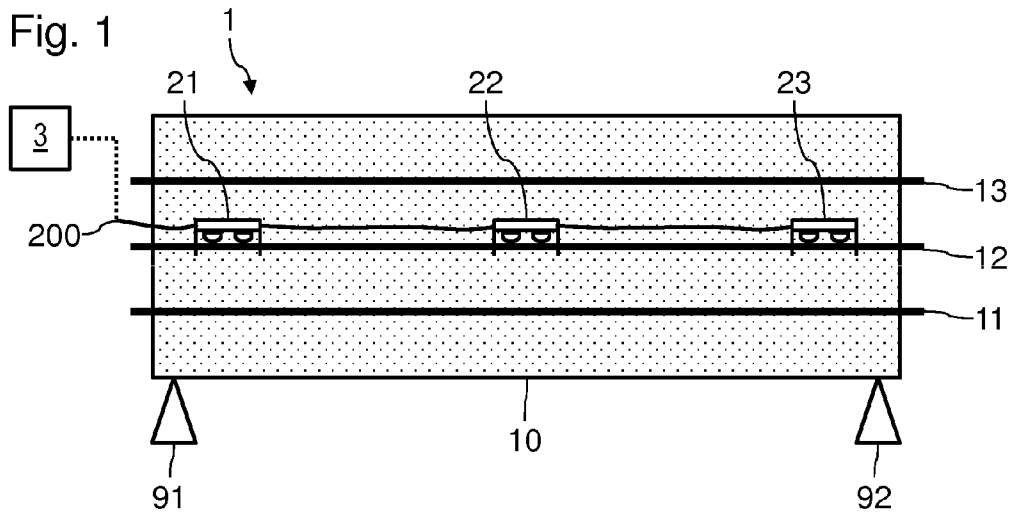


Fig. 2

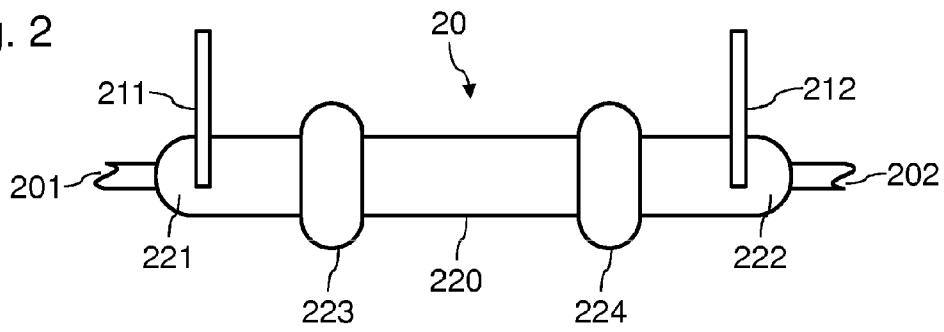


Fig. 3

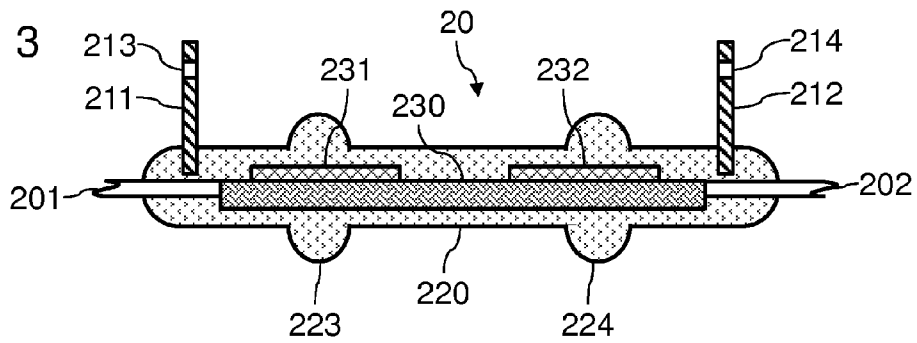


Fig. 4

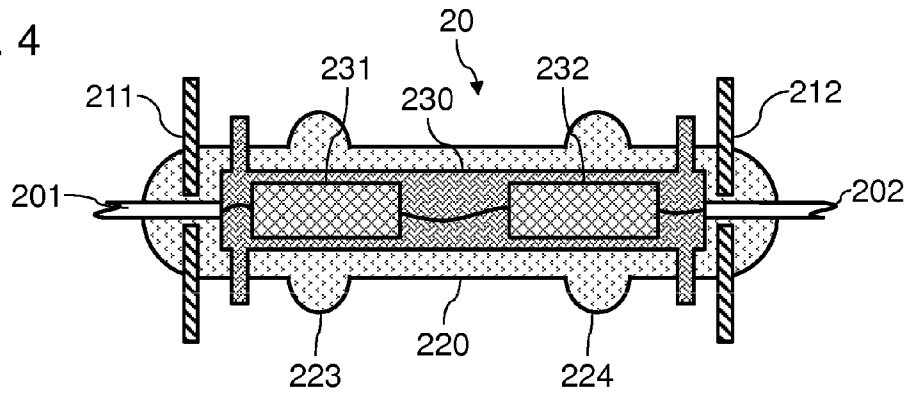


Fig. 5

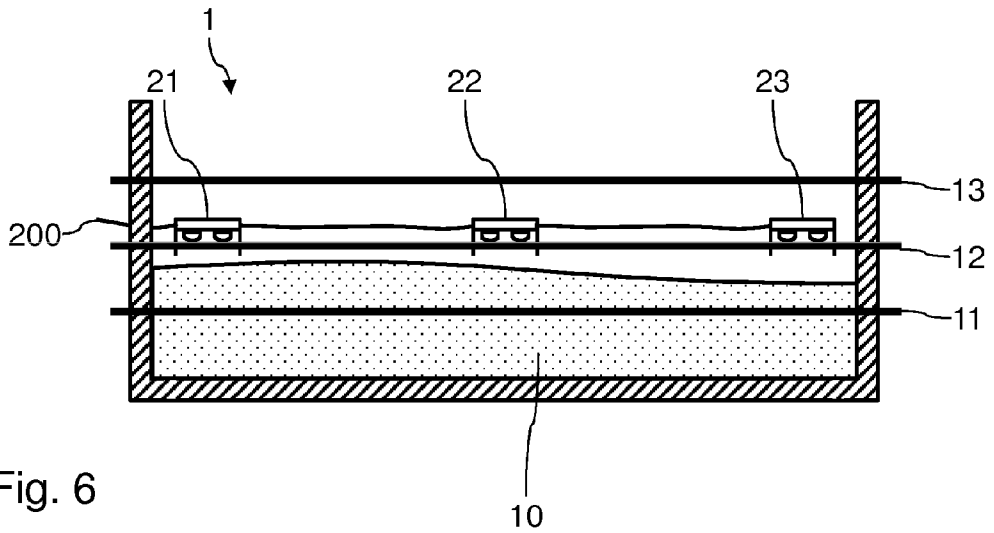
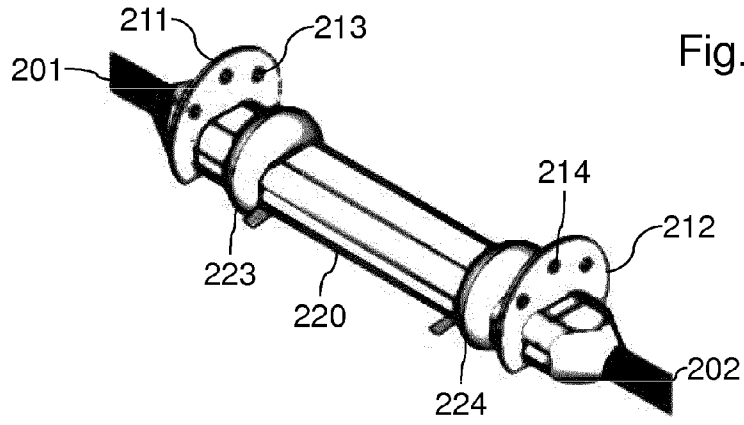


Fig. 6

Fig. 7

