

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 716 816**

51 Int. Cl.:

**G01M 5/00** (2006.01)

**G01M 11/08** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.06.2011 PCT/IT2011/000203**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.12.2011 WO11158273**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.06.2011 E 11740730 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.12.2018 EP 2583076**

54 Título: **Sistema para medir y monitorizar la deformación en objetos sometidos a tensión por fuerzas externas**

30 Prioridad:

**18.06.2010 IT RM20100333**

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

**17.06.2019**

73 Titular/es:

**PERSI DEL MARMO, PAOLO (100.0%)**

**Via Marche 84  
00187 Roma, IT**

72 Inventor/es:

**PERSI DEL MARMO, PAOLO**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 716 816 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**

Sistema para medir y monitorizar la deformación en objetos sometidos a tensión por fuerzas externas

5 La presente invención se refiere al campo técnico de la medición y la monitorización de la deformación de objetos, y hace referencia a un sistema para medir y monitorizar las deformaciones de un objeto sometido a tensión por una o más fuerzas exteriores.

En lo que respecta a la presente invención, dicho objeto tiene masa y dimensiones discretos, mientras que los objetos que tienen masa y dimensiones puntuales no están incluidos.

En la actualidad, se conocen dispositivos para medir las deformaciones de un objeto, tales como los extensómetros eléctricos o mecánicos.

10 Un primer inconveniente de dichos dispositivos es que los extensómetros tanto eléctricos como mecánicos tienen una resolución baja, así como una baja dinámica y una baja precisión.

Un segundo inconveniente es que dichos extensómetros eléctricos y mecánicos se ven afectados por el ruido electromagnético.

Un tercer inconveniente es que los extensómetros eléctricos y mecánicos no son estables.

15 Otro inconveniente es que dichos extensómetros eléctricos y mecánicos están sujetos a corrosión.

Otro inconveniente más es que los extensómetros eléctricos y mecánicos no pueden ser utilizados para usos que proveen contacto con líquidos.

20 Un sistema conocido para medir la deformación de objetos se describe en la Solicitud de patente internacional WO 2008/115375, presentada el 12 de marzo de 2008. Dicho sistema comprende un tubo que contiene en su interior de una pluralidad de fibras ópticas con sensores de Bragg o de Rayleigh, que miden la deformación a la que está sometido cuando recibe una fuerza. En particular, el eje neutro, es decir, el eje sobre el cual la fuerza aplicada no tiene efecto de deformación en los sensores ópticos, es el eje central del tubo, y las fibras están aplicadas sobre la superficie interior del mismo tubo, de tal manera que la distancia entre ellas y dicho eje central es la misma. En otras palabras, el tubo es un instrumento para medir las deformaciones del mismo.

25 Un inconveniente se debe al hecho de que no es posible medir las deformaciones de un objeto diferente del mismo tubo, ya que las fibras en el interior del tubo están alrededor del eje neutro que coincide con el eje central del tubo, y no con el eje neutro del objeto cuya deformación se debe medir. Por lo tanto, si dicho sistema se aplicase a cualquier objeto, no sería capaz de medir la deformación real del objeto, sino la deformación transmitida al tubo por el objeto, y que es medida con respecto al eje neutro del mismo tubo. Por lo tanto, la deformación medida solo sería una fracción de la deformación real a la que ha sido sometido el objeto sobre el cual se aplica el tubo.

30 Un segundo inconveniente es que la suposición sobre la cual se realiza la medición de cada deformación es que la deformación es uniforme. Esto significa que, si el objeto no está sometido a deformaciones uniformes, se miden adecuadamente.

35 Otro inconveniente más es que dicho sistema no permite medir las torsiones del objeto sobre el que está aplicado, debido al posicionamiento de las fibras a lo largo de la superficie del tubo interior.

Otro inconveniente se debe al notable número de sensores utilizados, lo que hace que dicha medición sea muy costosa.

40 Otro sistema conocido se describe en la Solicitud de patente internacional WP 2008/021881. Dicho sistema comprende una estructura de soporte flexible y una línea de sensores conectados entre sí para medir de manera mecánica las deformaciones, estando acoplada dicha línea con dicha estructura de soporte para crear una trayectoria en zigzag. En particular, dicha estructura de soporte está enrollada alrededor de un objeto cilíndrico.

Un inconveniente de dicha solución es que está diseñada solo para medir la deformación de objetos que tienen una forma cilíndrica.

45 Otro inconveniente adicional es que no es posible medir la compresión y la expansión del objeto cilíndrico a lo largo de su eje longitudinal, ya que el posicionamiento del sensor permite determinar solo una fracción de dicha compresión o expansión.

50 Otro inconveniente se debe a la complejidad estructural del sistema y a los costes de fabricación, ya que el sistema comprende un número importante de sensores. El objeto de la presente invención es superar dichos inconvenientes, proporcionando un sistema para medir y monitorizar las deformaciones de un objeto sometido a tensión por una o más fuerzas exteriores, a lo largo de un plano o un espacio, teniendo dicho sistema una elevada resolución, dinámica y precisión.

Por lo tanto, un objeto específico de la presente invención es un sistema para medir y monitorizar las deformaciones de un objeto bidimensional o tridimensional, que comprende:

- 5 - por lo menos, un grupo de sensores ópticos, que serán aplicados sobre dicho objeto de acuerdo con una configuración geométrica predeterminada, comprendiendo dicho por lo menos un grupo un número de sensores por lo menos igual al número de dimensiones de dicho objeto, estando dispuestos cada uno de dichos sensores ópticos en el interior, por lo menos, de un cable de fibra óptica,
- 10 - una máquina óptica de interrogación, para generar una señal luminosa a una frecuencia dada para ser enviada en dicho por lo menos un cable de fibra óptica, y para recibir señales de respuesta de dichos sensores ópticos y para determinar el desplazamiento de la longitud de onda de dichos sensores ópticos con respecto a su valor nominal o valor de calibración determinado en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el propio objeto cuando está en el estado de reposo, es decir, cuando dicho objeto no está sometido a ninguna fuerza externa; y
- 15 - un ordenador, para calcular la deformación del objeto con respecto, por lo menos, a uno de dos o tres ejes de referencia X, Y y Z; pudiendo ser conectado dicho ordenador a dicha máquina de interrogación y recibir datos relativos a la longitud de onda del desplazamiento de cada uno de dichos sensores ópticos con respecto a sus valores de calibración.

De acuerdo con la invención, cuando el objeto es tridimensional, dicho por lo menos un grupo de sensores ópticos comprende, por lo menos, tres sensores ópticos aplicados a dicho objeto, de tal manera que formen en un mismo plano de referencia una forma triangular, en particular una pluralidad de grupos, por lo menos, de tres sensores ópticos, cada uno de los cuales está dispuesto en un plano de referencia respectivo.

Aún de acuerdo con la invención, es posible proporcionar, por lo menos, un sensor óptico adicional, aplicado en un plano perpendicular al plano de referencia de cada grupo, por lo menos, de tres sensores ópticos, y que está inclinado con respecto al eje de torsión del objeto, preferiblemente a 45° con respecto a dicho eje.

Además, de acuerdo con la invención, cuando el objeto es bidimensional, dicho por lo menos un grupo de sensores ópticos comprende por lo menos dos sensores ópticos; estando aplicados dichos por lo menos dos sensores ópticos sobre una primera superficie del objeto, cada uno dispuesto en el extremo libre de los brazos de la línea imaginaria sustancialmente en forma de L, estando dispuesta, en particular, una pluralidad de grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos, sobre dicha primera superficie.

Ventajosamente, de acuerdo con la invención, para cada grupo de dos sensores ópticos está dispuesto, por lo menos, un sensor óptico adicional, situado en la unión entre las dos ramas de dicha línea, de tal manera que esté inclinado con respecto al eje de torsión del objeto, preferiblemente a 45° con respecto a dicho eje.

De acuerdo con la invención, sobre la segunda superficie del objeto, opuesta a dicha primera superficie sobre la que está dispuesto, por lo menos, un primer grupo de sensores ópticos, está dispuesto, por lo menos, un primer grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos; estando aplicados dichos, por lo menos, dos sensores ópticos, al extremo libre de cada brazo de una línea imaginaria sustancialmente en forma de L, de tal manera que cada sensor óptico de dicho, por lo menos, un grupo sobre dicha segunda superficie es una imagen especular de un sensor óptico respectivo de dicho, por lo menos, un grupo sobre la primera superficie del objeto.

Preferiblemente, los sensores ópticos en cada grupo se colocados a una distancia máxima con respecto al eje neutro.

40 En una primera realización, es posible que cada uno de dichos sensores ópticos esté en un cable de fibra óptica respectivo, en particular, dichos cables están conectados para formar una cadena de fibra óptica, estando dicha cadena de fibra óptica conectada a la máquina óptica de interrogación con un conector óptico. En una segunda realización, dichos cables de fibra óptica pueden estar conectados a la máquina óptica de interrogación con un conector óptico correspondiente.

45 De acuerdo con la invención, los sensores ópticos están fabricados utilizando una parte de cable de fibra óptica que está modificada de tal manera que dicha parte del cable de fibra óptica tiene un índice de refracción diferente con respecto al resto del cable de fibra óptica.

50 Un objeto de la invención es también un método para medir y monitorizar deformaciones de un objeto bidimensional o tridimensional sometido a una o más fuerzas externas, utilizando el sistema en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, cuyo método comprende las siguientes etapas:

a) disponer, por lo menos, un grupo de sensores ópticos que comprenden, por lo menos, un número de sensores igual al número de dimensiones de dicho objeto, que serán aplicados sobre dicho objeto, por lo menos, en un cable de fibra óptica;

- b) colocar y pegar dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos sobre dicho objeto de acuerdo con una configuración geométrica predeterminada;
- c) conectar dicho, por lo menos, un cable de fibra óptica a una máquina óptica de interrogación;
- 5 d) enviar una señal luminosa desde dicha máquina óptica de interrogación a dicho, por lo menos, un cable de fibra óptica con el consiguiente impacto de dicha señal luminosa con cada uno de los sensores ópticos de dicho, por lo menos, un grupo;
- e) enviar una señal de respuesta desde cada uno de dichos sensores ópticos a la máquina óptica de interrogación;
- f) recibir desde la máquina óptica de interrogación dichas señales de respuesta enviadas desde cada uno de dichos sensores ópticos;
- 10 g) calcular, mediante dicha máquina óptica de interrogación, la medida de la deformación definida como la diferencia del valor de la longitud de onda de cada sensor óptico después de la deformación del objeto, y el valor de calibración del mismo sensor óptico, es decir, el valor de la longitud de onda del sensor óptico fijada en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el objeto;
- h) enviar la medida de deformación a un ordenador conectado a dicha máquina óptica de interrogación;
- 15 i) calcular la deformación de dicho objeto mediante dicho ordenador con respecto a cada eje de aplicación de fuerza externa sobre dicho objeto.

De acuerdo con la invención, cuando el objeto es tridimensional, la etapa a) de dicho método proporciona la aplicación, por lo menos, de un grupo de tres sensores ópticos, en particular la aplicación en dicho objeto de una pluralidad de grupos de tres sensores ópticos.

- 20 Ventajosamente, la etapa a) puede proporcionar la aplicación, por lo menos, de un sensor óptico adicional para cada grupo sobre dicho objeto.

De acuerdo aún con la invención, la etapa b) de dicho método proporciona el posicionamiento y pegado de cada grupo de tres sensores ópticos sobre dicho objeto de acuerdo con una disposición geométrica triangular, estando cada grupo en un plano de referencia relevante.

- 25 Además, la etapa b) puede proporcionar el posicionamiento y pegado para cada grupo, por lo menos, de un sensor óptico adicional en un plano ortogonal con respecto a cada plano de referencia, e inclinado con respecto al plano de torsión del objeto, preferiblemente con un ángulo de 45°.

- 30 De acuerdo con la invención, cuando el objeto es un objeto bidimensional uno, la etapa a) aplicación, por lo menos, de un grupo de dos sensores ópticos sobre una primera superficie de dicho objeto, en particular la etapa a) puede proporcionar la aplicación de una pluralidad de grupos de dos sensores ópticos sobre dicha primera superficie.

Aún de acuerdo con la invención, la etapa a) de dicho método puede comprender uno o más grupos, por lo menos, de sensores ópticos en la segunda superficie, en oposición con respecto a la primera superficie.

Ventajosamente, la etapa a) puede proporcionar, por lo menos, un sensor adicional por cada grupo de sensores ópticos.

- 35 De acuerdo con la invención, la etapa b) proporciona el posicionamiento y pegado a cada grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos sobre dicha primera superficie de acuerdo con una disposición sustancialmente en forma de L, en la que dichos por lo menos dos sensores ópticos son posicionados en los extremos libres de los dos brazos de dicha forma de L.

- 40 Ventajosamente, la etapa b) puede proporcionar posicionamiento y pegado a uno o más grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos en dicha primera superficie de acuerdo con una disposición sustancialmente en forma de L. Dichos, por lo menos, dos sensores ópticos se posicionan en los extremos libres de los dos brazos de dicha forma L, y cada grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos es una imagen especular con respecto a un grupo correspondiente, por lo menos, de dos sensores sobre la primera superficie del objeto.

- 45 La etapa b) puede proporcionar el posicionamiento y pegado, por lo menos, de un sensor adicional sobre dicha primera superficie o sobre dicha segunda superficie, en la que se encuentran los brazos de dicha forma de L, preferiblemente inclinados 45° con respecto a dicho eje.

- 50 Finalmente, de acuerdo con la invención, cada cable de fibra óptica puede ser aplicado sobre la superficie exterior del objeto o en el interior del mismo. En este último caso, la introducción de cada cable de fibra óptica en el interior del objeto ocurre directamente durante la fabricación del objeto, siempre que no se supere el límite de temperatura más allá del cual la fibra óptica pierde sus características o se rompe.

Lo presente no se describe como ilustrativo, pero no con fines limitativos, de acuerdo con una realización, con referencia particular a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista, en perspectiva, de un objeto tridimensional sobre el que se aplica un grupo de tres sensores ópticos;

5 la figura 2 es una sección transversal del objeto de la figura 1 en correspondencia del plano en el que los tres sensores ópticos están aplicados;

la figura 3 muestra el objeto de la figura 1 en el que ha sido aplicado un cuarto sensor óptico;

la figura 4 es una sección transversal del objeto de la figura 3 en correspondencia del plano en el que los cuatro sensores ópticos están aplicados;

10 la figura 5 muestra el objeto de la figura 1 sobre el cual ha sido aplicado un grupo adicional de tres sensores ópticos;

la figura 6 muestra el objeto de la figura 3 sobre el cual ha sido aplicado un grupo adicional de cuatro sensores ópticos;

la figura 7 muestra un objeto to-dimensional con un grupo de dos sensores ópticos aplicados sobre la superficie superior;

15 la figura 8 muestra el objeto de la figura 7 con una pluralidad de grupos de sensores ópticos sobre la superficie superior;

la figura 9 muestra el objeto de la figura 7 con un grupo de dos sensores ópticos sobre la superficie inferior que es una imagen especular con respecto al dispuesto sobre la superficie superior;

20 la figura 10 muestra el objeto de la figura 9 con una pluralidad de grupos de dos sensores ópticos sobre la superficie superior del objeto y los grupos correspondientes de sensores ópticos sobre la superficie inferior, siendo cada uno de ellos una imagen especular con respecto a un grupo correspondiente en la superficie superior;

la figura 11 muestra un objeto bidimensional con un grupo de tres sensores ópticos sobre la superficie superior;

la figura 12 muestra el objeto de la figura 11 con dos grupos de tres sensores ópticos sobre su superficie superior.

25 Haciendo referencia a las figuras 1 a 2, se proporciona un sistema en la realización descrita para medir y monitorizar las deformaciones dentro del espacio, a las que un objeto tridimensional está sometido por una fuerza exterior, comprendiendo dicho sistema:

30 - un grupo de tres sensores ópticos, que comprende un primer sensor óptico S1, un segundo sensor óptico S2 y un tercer sensor óptico S3, que serán aplicados sobre la superficie exterior de dicho objeto con el fin de realizar un triángulo isósceles en un plano de referencia X, Y; dichos sensores ópticos S1, S2, S3 se encuentran en el interior de un cable de fibra;

35 - una máquina óptica de interrogación M para generar una señal luminosa a una frecuencia dada para ser enviada en dicho cable de fibra óptica, y para recibir señales de respuesta de dichos sensores ópticos S1, S2, S3 y para determinar el desplazamiento de la longitud de onda de dichos sensores ópticos con respecto a su valor nominal o valor de calibración determinado en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el propio objeto cuando está en el estado de reposo, es decir, cuando dicho objeto no está sometido a ninguna fuerza externa; dicha máquina de interrogación M puede ser acoplada con dicho cable de fibra óptica mediante un conector óptico (no mostrado) y

40 - un ordenador C para calcular la deformación del objeto con respecto, por lo menos, a uno de dos o tres ejes de referencia X, Y y Z, pudiendo ser conectado dicho ordenador C a dicha máquina M de interrogación y recibir desde la misma datos relativos a la longitud de onda del desplazamiento de cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3 con respecto a sus valores de calibración.

45 Tal como ya se dijo, aunque la disposición geométrica de los sensores ópticos mostrada en las figuras es un triángulo isósceles, el triángulo realizado por dichos tres sensores ópticos, puede ser cualquier triángulo, incluso un triángulo equilátero o rectángulo, o cualquier triángulo escaleno, cuyas alturas se extienden desde un vértice hasta estar entre los vértices del lado opuesto.

En otras palabras, se prefiere que cada altura del triángulo sea un segmento que se extienda desde un vértice, cerca del cual está dispuesto un sensor óptico, hasta contactar con el lado opuesto con respecto a dicho vértice, cerca de cuyos extremos están dispuestos dos sensores ópticos.

50 Tal como ya se dijo, aunque no se muestra en las figuras, es posible que cada uno de dichos sensores ópticos esté dispuesto en el interior de un cable de fibra óptica, y que dichos cables de fibra óptica estén conectados entre sí

realizando una cadena de fibra óptica, y este último esté conectado a la máquina mediante un conector óptico (no mostrado).

Como alternativa, dichos sensores ópticos pueden ser conectados de manera independiente entre sí con la máquina de interrogación M mediante un cable óptico correspondiente.

5 Los sensores ópticos están fabricados mediante una parte del cable de fibra óptica de aproximadamente 2 cm, modificado para proporcionar a dicha parte del cable de fibra óptica un índice de refracción particular que lo diferencia de la otra parte del cable de fibra óptica, haciendo de este modo discernible dicha parte con respecto al cable. Por lo tanto, el sensor óptico solo es una parte del cable de fibra óptica caracterizado por un índice de refracción que es diferente con respecto a las otras partes del cable de fibra óptica.

10 Dichos sensores ópticos se conocen normalmente como sensores de Bragg o sensores basados en la retícula de Bragg.

Además, tal como ya se mencionó, cada cable de fibra óptica puede estar dispuesto en el interior de la estructura de dicho objeto, en lugar de estar aplicado sobre su superficie exterior. Ventajosamente, en este caso, es posible realizar un objeto que ya contiene cables de fibra óptica, siempre que el límite de temperatura más allá del cual el material de fibra óptica pierde sus características o se rompe.

15 Para tener una mejor lectura de la deformación del objeto, es preferible que dichos sensores S1, S2, S3 estén dispuestos a la distancia máxima con respecto al eje neutro, es decir, el eje a lo largo del cual la fuerza aplicada no tiene efectos de deformación en los sensores ópticos.

En el ejemplo descrito, el eje Z es el eje neutro con respecto a las fuerzas a lo largo de los ejes X e Y.

20 En caso de que se aplique una compresión, el eje Z es un eje a lo largo del cual se aplica la fuerza, ya que es el eje vertical.

Una vez conectado el cable de fibra óptica con la máquina de interrogación M, los sensores ópticos S1, S2, S3 en el interior de dicho cable de fibra óptica se ven afectados por la señal luminosa enviada desde dicha máquina óptica de interrogación M.

25 Dichos sensores S1, S2, S3 responden con sus características de refracción, es decir, cada sensor óptico se refleja en dicha máquina de interrogación con su longitud de onda, en caso de que el objeto no esté sometido a ninguna fuerza, o refractan la luz a una longitud de onda cercana a la longitud de onda característica, en el caso de que el objeto sobre que están aplicados dichos sensores ópticos esté sometido, por lo menos, a una fuerza.

30 La amplitud de intervalo alrededor de la longitud de onda característica depende de la distancia de la longitud de onda entre los sensores ópticos empleados.

De acuerdo con la invención, la distancia mínima entre un sensor óptico y el otro es una longitud de onda de 1 nm.

La longitud de onda característica utilizada para caracterizar el cable de fibra óptica puede variar dentro del rango entre 1510 nm y 1590 nm.

35 Esto significa que, por ejemplo, están dispuestos 80 sensores a una distancia de longitud de onda de 1 nm, el máximo es de aproximadamente  $1 \text{ nm} \pm 0,5$  alrededor de la longitud de onda característica.

La posición triangular de los sensores ópticos S1, S2, S3 permite discernir las componentes de la deformación a lo largo de los ejes de referencia X, Y y Z.

En particular, para medir las deformaciones a lo largo del eje X, se utiliza el par de sensores en la base del triángulo, es decir, los sensores ópticos segundo S2 y tercero S3.

40 El ordenador C realiza, para cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3, una medición diferencial entre dos valores de longitud de onda, es decir, el valor de calibración del sensor óptico y el valor después de la deformación en el mismo sensor óptico.

La medición diferencial de la longitud de onda es con respecto a las dimensiones del objeto, transformadas a la escala métrica, por ejemplo, un alargamiento o acortamiento se pueden indicar en metros.

45 La misma medida de la deformación puede ser transformada en diferentes unidades de medida, tales como bar, grados, grados Celsius, con referencia a la medición específica realizada. Por ejemplo, una compresión se puede indicar en bar, una torsión, en grados y una temperatura, en grados Celsius.

En otras palabras, la medición diferencial realizada por la máquina de interrogación M es  $\epsilon = \Delta L / L$ , en donde  $\Delta L$  es la variación de longitud del sensor óptico (parámetro desconocido), y L es el punto en el que está aplicado el sensor

óptico con respecto a un plano de referencia (parámetro conocido). En el presente caso, el plano de referencia es XY en la base del objeto. Por lo tanto, el parámetro L representa la altura a la que está colocado el sensor.

Para determinar  $\Delta L$  es suficiente multiplicar la medida diferencial  $\varepsilon$  por el valor L definido por la altura de aplicación del sensor con respecto al plano de referencia.

- 5 Se debe realizar dicha medición diferencial  $\varepsilon$  para cada sensor óptico, con el fin de determinar las variaciones de  $\Delta L$  para cada sensor óptico S1, S2, S3.

Una vez establecida la variación de  $\Delta L$  para cada sensor óptico S1, S2, S3, para individualizar las diferentes componentes de la deformación a lo largo de tres ejes X, Y, Z, se lleva a cabo una medición diferencial entre tres pares de sensores: un primer par es el que comprende el sensor óptico S1 y el sensor óptico S2, el segundo es el que comprende los sensores ópticos S1 y S3, y el último, S2 y S3.

10 La componente vertical de la compresión de cada par a lo largo del eje Z se anula y permite obtener una componente de la deformación a lo largo de los ejes X e Y.

La diferencia de la medición entre el sensor óptico S2 y el sensor óptico S3 (por lo tanto,  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = (\Delta L_2 / L_2 - \Delta L_3 / L_3) = (\lambda_2 - \lambda_{02}) - (\lambda_3 - \lambda_{03})$ ) determina solo la componente de la deformación a lo largo del eje X, ya que en el cálculo diferencial, la componente de compresión a lo largo del eje Z y la componente de la deformación a lo largo del eje Y se anulan entre sí, puesto que tienen el mismo valor para dos sensores ópticos S2 y S3, por lo que solo queda dicha componente de la deformación.

Uno de los dos pares de sensores se utiliza para medir la deformación a lo largo del eje Y, cada uno compuesto por un sensor óptico dispuesto en la base del triángulo y un sensor óptico s1 en el vértice superior del triángulo.

- 20 En otras palabras, para medir la deformación a lo largo del eje Y se puede utilizar un primer par compuesto por un segundo sensor óptico S2 y un primer sensor óptico S1, o un segundo par compuesto por un tercer sensor óptico S3 y un primer sensor óptico S1.

En el caso de que se utilice el primer par de sensores ópticos, la diferencia de la medición entre el sensor óptico S2 y el sensor óptico S1 (por lo tanto,  $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = (\Delta L_2 / L_2 - \Delta L_1 / L_1) = (\lambda_2 - \lambda_{02}) - (\lambda_1 - \lambda_{01})$ ) determina la única componente de la deformación a lo largo del eje Y. De hecho, en el cálculo diferencial, la componente de compresión a lo largo del eje Z y la componente de la deformación a lo largo del eje X se anulan entre sí, ya que tienen el mismo valor para los sensores ópticos S2 y S1, por lo que solo queda la componente de la deformación a lo largo del eje Y.

La misma componente de la deformación se puede calcular utilizando el segundo par de sensores ópticos y, por lo tanto, calculando la diferencia entre el sensor óptico S3 y el sensor óptico S1 (por lo tanto,  $\varepsilon_3 - \varepsilon_1 = (\Delta L_3 / L_3 - \Delta L_1 / L_1) = (\lambda_3 - \lambda_{03}) - (\lambda_1 - \lambda_{01})$ ).

30 Por lo tanto, es suficiente restar la deformación a lo largo del eje X y a lo largo del eje Y al valor total de la deformación medido por cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3, para calcular con precisión la componente de compresión a lo largo del eje Z.

En otras palabras, lo anterior representa un sistema que comprende tres ecuaciones y tres incógnitas que se puede resolver, ya que la información  $\Delta L$  es conocida a partir de dichos tres sensores.

35 La torsión del objeto se puede medir añadiendo un cuarto sensor óptico S4 al grupo de sensores ya aplicados sobre el objeto (figuras 3 y 4).

Es evidente que dicho cuarto sensor óptico S4 debe estar conectado a la máquina de interrogación mediante un cable de fibra óptica que puede ser el mismo cable en el que están insertados tres sensores ópticos S1, S2, S3, o un cable de fibra óptica adicional.

40 Dicho cuarto sensor S4 está dispuesto a lo largo de un plano ZY, perpendicular al plano XY.

En particular, dicho cuarto sensor S4 es posicionado sobre la superficie exterior del objeto, con un ángulo de 45° con respecto al eje alrededor del cual se produce la torsión, específicamente el eje Z.

45 Tal como ya se dijo, aunque el cuarto sensor óptico S4 está en la figura inclinado 45° con respecto al eje de torsión del objeto, dicho cuarto sensor puede tener cualquier inclinación con respecto a dicho eje, sin limitar el alcance de la invención.

El efecto de la torsión se identifica mediante un vector de deformación diagonal, normalmente medido empleando cuatro sensores dispuestos a 90° entre sí, realizando de este modo una cruz, y con una inclinación de 45° con respecto al eje alrededor del cual se produce la torsión, en el caso específico, el eje Z.

- 50 Son necesarios cuatro sensores para discriminar las componentes de la torsión de otras deformaciones, tal como por ejemplo una compresión.

La fuerza de torsión genera una deformación de tipo espiral.

5 Tomando en consideración las secciones transversales individuales del objeto tomadas a lo largo de un plano XY a diferentes alturas, es posible observar que el efecto de la fuerza de giro es el de aplicar una fuerza tangencial a las diferentes secciones, causando de ese modo una rotación diferente para cada sección individual con respecto a las adyacentes, y una dilatación a lo largo de la dirección que es una imagen especular con respecto al eje de torsión.

10 Tomando en consideración la sección coincidente con el punto de aplicación de la fuerza de giro, dicha sección será sometida a la rotación máxima que se puede medir a lo largo del objeto. Asimismo, la sección subyacente estará sometida a una fuerza objetivo que creará un desplazamiento que será menor que el desplazamiento de la sección anterior, y así sucesivamente, siempre descendiendo a lo largo del eje de torsión del objeto, hasta alcanzar la sección en la que terminará el efecto de torsión y, por lo tanto, no se producirá ninguna rotación.

Por lo tanto, el efecto de una fuerza de torsión se puede representar mediante una espiral.

En el sistema de acuerdo con la invención, para determinar la torsión a la que está sometido el objeto, es suficiente agregar un sensor óptico S4 a lo largo de una línea diagonal, es decir, con una inclinación de 45° con respecto al eje de torsión.

15 Dicho sensor óptico S4 mide la componente de la deformación proyectada a lo largo de su dirección, mientras que la componente de compresión vertical está determinada por los sensores ópticos S1, S2, S3.

20 Aunque un posicionamiento óptimo para medir la componente de rotación de la torsión es el que se encuentra a lo largo de la línea vertical, en esta disposición el sensor óptico S4 no sería linealmente independiente con respecto a otros sensores ópticos S1, S2 y S3, y, por lo tanto, no sería posible discriminar la componente de compresión debida a la torsión.

25 Por lo tanto, la solución óptima es disponer el cuarto sensor óptico S4 con una inclinación de 45°, para leer una parte del efecto de torsión, es decir, la componente a lo largo de la dirección de 45°, lo que hace que la medición sea completamente independiente con respecto a las mediciones de otros tres sensores ópticos, discriminando de este modo la componente de compresión de la torsión con respecto a las mediciones realizadas por los sensores ópticos S1, S2, S3.

Por lo tanto, mediante un grupo de cuatro sensores, es posible medir tanto la deformación como la torsión a la que está sometido el objeto. En este caso, se obtiene un sistema lineal de cuatro ecuaciones y cuatro incógnitas que se puede resolver, ya que  $\Delta L$  es conocido a partir de los cuatro sensores.

30 De acuerdo con la invención, también es posible obtener un perfil de la deformación del objeto a lo largo de tres ejes de referencia X, Y y Z.

Para determinar el perfil de la deformación a lo largo de tres ejes de referencia X, Y, Z, se aplican uno o más grupos adicionales de sensores ópticos sobre el objeto a una altura diferente con respecto al otro grupo, es decir, a lo largo del plano de referencia X, Y correspondiente, donde los sensores ópticos de cada grupo adicional están alineados con los sensores ópticos del grupo ya aplicado sobre el objeto (figura 5).

35 Para obtener dicho perfil de la deformación, es necesario interpolar matemáticamente los datos de los sensores de cada grupo junto con coordenadas de los puntos que definen la posición de los sensores ópticos en cada grupo.

El grado de la función de interpolación que se utilizará para determinar dicho perfil de deformación puede ser comparado con el número de grupos de sensores ópticos aplicados sobre la superficie exterior del objeto.

40 En su lugar, para determinar el perfil de la torsión, se aplican sobre el objeto uno o más grupos adicionales de cuatro sensores ópticos (figura 6).

A la vista de lo anterior, el ordenador C recibe los datos enviados desde la máquina de interrogación M y relevantes para la longitud de onda de cada sensor aplicado al objeto, realiza mediciones diferenciales entre la longitud de onda de cada sensor óptico, antes y después de la aplicación de una fuerza exterior, y transforma los resultados de dichas mediciones diferenciales en desplazamiento lineal del objeto.

45 Además, es posible determinar el perfil de las deformaciones a las que está sometido el objeto empleando una función de interpolación, preferiblemente con un grado correspondiente al número de grupos de sensores aplicados sobre el objeto, tomando en consideración la posición de cada sensor óptico.

En el ejemplo descrito, los sensores ópticos y el sistema de fibra óptica están pegados sobre la superficie exterior del objeto.

50 Se elegirá un pegamento específico para pegar dichos cables de fibra óptica sobre el objeto sobre la base del material específico.

Un método para medir y monitorizar las deformaciones dentro de un espacio de un objeto tridimensional sometido a una o más externas comprende las siguientes etapas:

- a) disponer uno o más grupos, por lo menos, de tres sensores ópticos S1, S2, S3 para ser aplicados sobre dicho objeto, por lo menos, en un cable de fibra óptica;
- 5 b) colocar y pegar cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3 de dichos uno o más grupos sobre dicho objeto de acuerdo con una configuración triangular;
- c) conectar dicho por lo menos un cable de fibra óptica a una máquina óptica de interrogación M;
- d) enviar una señal luminosa desde dicha máquina óptica de interrogación M a dicho cable de fibra óptica con el consiguiente impacto de dicha señal luminosa con cada uno de los sensores ópticos S1, S2, S3;
- 10 e) enviar una señal de respuesta desde cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3 a la máquina óptica de interrogación M;
- f) recibir desde la máquina óptica de interrogación M dichas señales de respuesta enviadas desde cada uno de dichos sensores ópticos S1, S2, S3;
- 15 g) calcular, mediante dicha máquina óptica de interrogación M, la medida de tensión definida como la diferencia del valor de la longitud de onda de cada sensor óptico después de la deformación del objeto y la de la longitud de onda en el mismo conjunto de sensores ópticos en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el objeto;
- h) enviar la medida de la deformación a un ordenador C conectado a dicha máquina óptica de interrogación M;
- i) calcular la deformación de dicho objeto mediante dicho ordenador C con respecto al eje de aplicación de cada fuerza externa sobre dicho objeto.
- 20 Por lo que respecta a la etapa a), dichos sensores ópticos S1, S2, S3 están contenidos en el interior, por lo menos, de un cable de fibra óptica, o cada uno en un cable de fibra óptica correspondiente. En este último caso, los cables de fibra óptica pueden estar conectados entre sí, creando así una cadena de medición óptica para ser conectada a la máquina de interrogación M, o, como alternativa, pueden ser conectados de manera independiente unos de otros a la máquina óptica de interrogación M mediante un condensador óptico correspondiente.
- 25 Por lo que respecta a la etapa a), para medir la torsión del objeto, cada grupo proporciona un cuarto sensor S4, aplicado sobre la superficie exterior del objeto, de manera que se inclina 45° con respecto al eje de torsión, es decir, el eje sobre el que se aplica la deformación.
- Por lo que respecta a la etapa b), en el caso de que una pluralidad de grupos de sensores ópticos estén aplicados sobre el objeto, los triángulos realizados por los sensores ópticos de cada grupo deben tener la misma forma y dimensión, y el vértice de dichos ángulos debe estar alineado.
- 30 En caso de que los grupos tengan cuatro sensores, el cuarto sensor de un grupo debe estar alineado con el cuarto sensor de otros grupos.
- Por lo que respecta a la etapa i), el cálculo de las deformaciones del objeto se produce mediante la interpolación de los datos de deformación lineal de los sensores ópticos colocados en el mismo plano con información relevante para la posición de cada sensor.
- 35 Al mismo tiempo, o después de la etapa i), es posible proporcionar una etapa para obtener el perfil de la deformación del objeto.

#### OBJETO BIDIMENSIONAL

- 40 En el caso de que el objeto sea un objeto bidimensional, se aplican uno o más grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos para medir la deformación.
- Dichos, por lo menos, dos sensores ópticos son posicionados sobre la superficie exterior del objeto, cada uno en el extremo libre de los brazos de una línea imaginaria sustancialmente en forma de L.
- En el ejemplo que se muestra en la figura 7, para medir la deformación, está dispuesto un grupo de dos sensores ópticos S5, S6, aplicados sobre la superficie superior del objeto que tiene una sección rectangular.
- 45 Dichos sensores ópticos S5 y S6 están colocados en el mismo plano de referencia, específicamente en el plano X, Y.
- En una primera realización que se muestra en la figura 8, para determinar el perfil de una deformación a lo largo de los ejes X e Y, es posible agregar otros dos grupos de sensores ópticos S5, S6 sobre la superficie superior del objeto.

- 5 En una segunda realización que se muestra en la figura 9, para medir una deformación por cortadura, es decir, una deformación debida a una fuerza perpendicular al plano X, Y, un primer grupo de dos sensores S5', S6' están dispuestos sobre la superficie inferior del objeto, de tal modo que cada sensor óptico S5', S6' de dicho primer grupo sobre dicha superficie inferior es una imagen especular del sensor óptico S5, S6 correspondiente del primer grupo dispuesto sobre la superficie superior.
- En otras palabras, los sensores ópticos S5', S6' del grupo fijado sobre la superficie inferior están dispuestos en los extremos libres de los brazos de una línea imaginaria sustancialmente en forma de L, y dicha línea en forma de L es una imagen especular con respecto a la línea en forma de L de la superficie superior.
- 10 Por lo tanto, la aplicación de un grupo sobre la superficie inferior del objeto, como una imagen especular de la superficie superior del objeto, permite discriminar la componente de cortadura con respecto a las componentes de la deformación a lo largo de los ejes X e Y.
- 15 En una tercera realización que se muestra en la figura 10, para determinar el perfil de la deformación debido a una fuerza de cortadura, una pluralidad de grupos de sensores ópticos S5, S6 están dispuestos sobre la superficie superior del objeto, junto con una pluralidad de sensores ópticos S5', S6' sobre la superficie inferior de la misma, siendo cada uno una imagen especular o un grupo respectivo dispuesto sobre la superficie superior.
- Por lo tanto, los sensores ópticos de cada grupo aplicado sobre la superficie inferior son una imagen especular con respecto a los sensores de un grupo respectivo aplicado sobre la superficie superior, con el fin de proporcionar datos adicionales para calcular la deformación a lo largo de los ejes con respecto a los cuales se desea calcular dicha deformación.
- 20 En una cuarta realización que se muestra en la figura 11, es posible proporcionar el posicionamiento de otro sensor óptico S7 para medir la torsión del objeto.
- Dicho sensor óptico S7 adicional debe ser posicionado en correspondencia con el punto en el que se encuentran los brazos de dicha línea en forma de L, inclinado con respecto al eje de torsión, preferiblemente inclinado a 45° con respecto a dicho eje.
- 25 Por lo tanto, el grupo de sensores ópticos aplicados sobre la superficie superior del objeto comprende tres sensores S5, S6 y S7.
- Para determinar el perfil de torsión del objeto, uno o más grupos de tres sensores ópticos están dispuestos en la misma superficie (figura 12).
- 30 Una primera ventaja del sistema de acuerdo con la invención es que permite medir y monitorizar con precisión las posibles deformaciones de un objeto, tales como la flexión y/o la compresión y/o la dilatación, así como la torsión.
- Una segunda ventaja se debe al hecho de que la aplicación de uno o más cables de fibra óptica sobre la superficie exterior del objeto implica pequeñas dimensiones con respecto a los dispositivos tradicionales empleados para medir las deformaciones, y, en consecuencia, una menor modificación del material del objeto.
- 35 Una tercera ventaja se debe al hecho de que dichos cables de fibra óptica pueden estar dispuestos sobre un objeto incluso cubriendo grandes distancias (también cientos de kilómetros) sin perder la señal.
- Una cuarta ventaja se debe al hecho de que dichos cables de fibra óptica no están sujetos a corrosión.
- Otra ventaja es que los cables de fibra óptica también se pueden utilizar cuando existe riesgo de incendio o explosión, así como cuando hay líquidos presentes.
- 40 Otra ventaja más se debe al hecho de que es posible obtener otras mediciones de tamaño a partir de la medición de las deformaciones, tales como cargas, presiones y temperatura en el objeto, una vez que se conocen las características del material del que está compuesto el propio objeto.
- Otra ventaja es que es posible introducir un gran número de sensores de Bragg, cada uno con su longitud de onda diferente, manteniendo al mismo tiempo una intrusión muy reducida con respecto a la estructura sobre la que están dispuestos.
- 45 En particular, es posible determinar la carga a lo largo de una dirección establecida, combinando la medición de la deformación a lo largo de dicha dirección establecida con la geometría del objeto (forma y dimensiones), y con el módulo Young del material del que está compuesto el propio objeto.
- Dicho módulo Young identifica la capacidad del material para deformarse y, por lo tanto, es importante para medir la carga.
- 50 El valor de dicho módulo Young se puede calcular durante la etapa de calibración, aplicando una carga conocida sobre el objeto y midiendo la deformación de dicho objeto por dicho sistema.

De este modo, es posible obtener el módulo Young real del objeto a ser monitorizado.

Ahora, la medición de la carga es una tarea fácil, que se puede poner en relación con la deformación del objeto en un modo de funcionamiento.

Lo mismo se puede utilizar para medir la presión.

- 5 Para medir la temperatura, se hace referencia a la variación de las características del vidrio con el que están fabricados los sensores ópticos. Cuando la temperatura varía, el índice de refracción del sensor óptico varía, ya que las características intrínsecas del vidrio varían de acuerdo con reglas conocidas. Por lo tanto, es posible determinar la temperatura a la que está sometido el sensor óptico a partir de la variación de su índice de refracción, que aparece como un reflejo diferente de la señal luminosa enviada desde el cable de fibra óptica a la máquina de interrogación.
- 10

La presente invención se ha descrito con fines ilustrativos, pero no limitativos, de acuerdo con sus realizaciones preferidas, pero se debe entender que los expertos en la técnica pueden introducir variaciones y/o modificaciones sin apartarse del alcance relevante, ha definido en las reivindicaciones adjuntas.

**REIVINDICACIONES**

1. Sistema para medir y monitorizar las deformaciones de un objeto bidimensional o tridimensional, que comprende:

- por lo menos un grupo de sensores ópticos, estando dispuestos cada uno de dichos sensores ópticos en el interior, por lo menos, de un cable de fibra óptica,

5 - una máquina óptica de interrogación (M), para generar una señal luminosa a una frecuencia dada para ser enviada en dicho, por lo menos, un cable de fibra óptica, y para recibir señales de respuesta de dichos sensores ópticos y para determinar el desplazamiento de la longitud de onda de dichos sensores ópticos con respecto a su valor nominal o valor de calibración determinado en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el propio objeto cuando está en el estado de reposo, es decir, cuando dicho objeto no está sometido a  
10 ninguna fuerza externa; y

- un ordenador (C), para calcular la deformación del objeto con respecto, por lo menos, a uno de dos o tres ejes de referencia X, Y y Z; pudiendo ser conectado dicho ordenador (C) a dicha máquina de interrogación (M) y pudiendo recibir datos relativos a la longitud de onda del desplazamiento de cada uno de dichos sensores ópticos con respecto a sus valores de calibración;

15 caracterizado por que

dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos debe ser aplicado sobre dicho objeto según una configuración geométrica predeterminada, comprendiendo dicho, por lo menos, un grupo un número de sensores, por lo menos, igual al número de dimensiones de dicho objeto; debiendo ser colocados, por lo menos, dos sensores ópticos en el mismo plano, y

20 por que

cada uno de dichos sensores ópticos está separado de un eje neutro de dicho objeto, siendo dicho eje neutro el eje a lo largo del cual una fuerza aplicada a dicho objeto no tiene ningún efecto de deformación sobre dichos sensores ópticos, y

por que

25 dicha configuración geométrica predeterminada está elegida de tal manera que un plano que pasa a través de dicho eje neutro de dicho objeto pasa entre dichos dos sensores ópticos.

2. Sistema según la reivindicación 1, caracterizado por que cuando el objeto es tridimensional, dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos comprende, por lo menos, tres sensores ópticos (S1, S2, S3) aplicados sobre dicho objeto, de tal modo que forman en un mismo plano de referencia una forma triangular, en particular una pluralidad de  
30 grupos, por lo menos, de tres sensores ópticos (S1, S2, S3), cada uno de los cuales está dispuesto sobre un plano de referencia respectivo.

3. Sistema según la reivindicación 2, caracterizado por que cada grupo comprende, además, por lo menos, un sensor óptico (S4) adicional aplicado en un plano perpendicular al plano de referencia de cada grupo, por lo menos, de tres sensores ópticos (S1, S2, S3) y está inclinado con respecto al eje de torsión del objeto, preferiblemente a 45°  
35 con respecto a dicho eje.

4. Sistema según la reivindicación 1, caracterizado por que cuando el objeto es bidimensional, dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos comprende, por lo menos, dos sensores ópticos (S5, S6); estando aplicados dichos, por lo menos, dos sensores ópticos (S5, S6) sobre una primera superficie del objeto, estando dispuesto cada uno en el extremo libre de los brazos de una línea imaginaria sustancialmente en forma de L, estando dispuestos,  
40 particularmente, una pluralidad de grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5, S6) sobre dicha primera superficie.

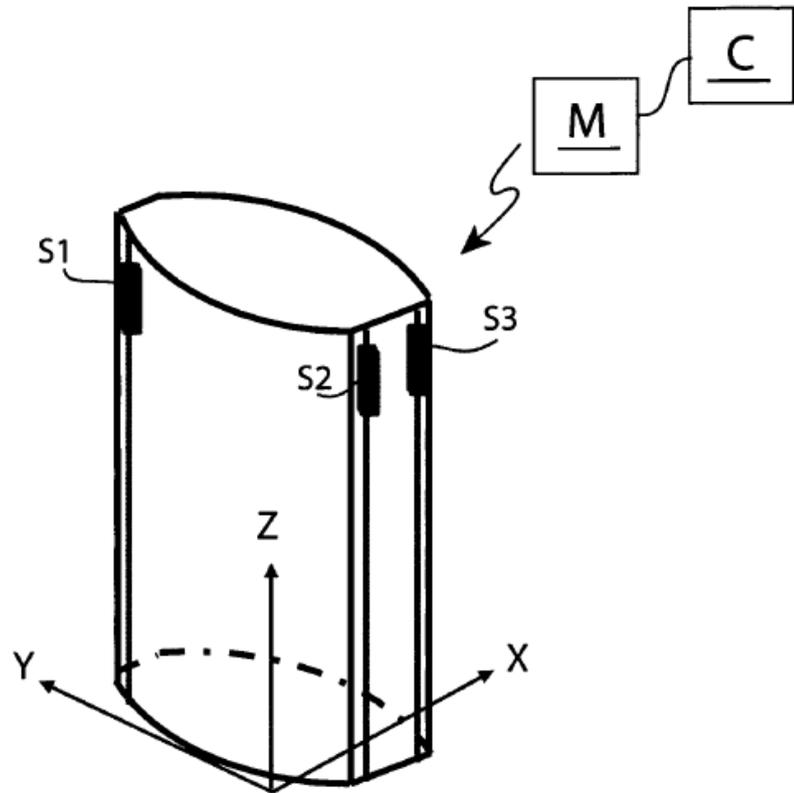
5. Sistema según la reivindicación 4, caracterizado por que para cada grupo de dos sensores ópticos (S5, S6) está dispuesto, por lo menos, un sensor óptico (S7) adicional, situado en la unión entre las dos ramas de dicha línea, de tal manera que se inclina con respecto al eje de torsión del objeto, preferiblemente a 45° con respecto a dicho eje.

45 6. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5, caracterizado por que sobre la segunda superficie del objeto, opuesta a dicha primera superficie en la que está dispuesto, por lo menos, un primer grupo de sensores ópticos (S5, S6), está dispuesto, por lo menos, un primer grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5', S6'); estando aplicados dichos, por lo menos, dos sensores ópticos (S5', S6') en el extremo libre de cada brazo de una línea imaginaria sustancialmente en forma de L, de tal modo que cada sensor óptico (S5', S6') de dicho, por lo  
50 menos, un grupo sobre dicha segunda superficie es una imagen especular de un sensor óptico respectivo (S5, S6) de dicho, por lo menos, un grupo sobre la primera superficie del objeto.

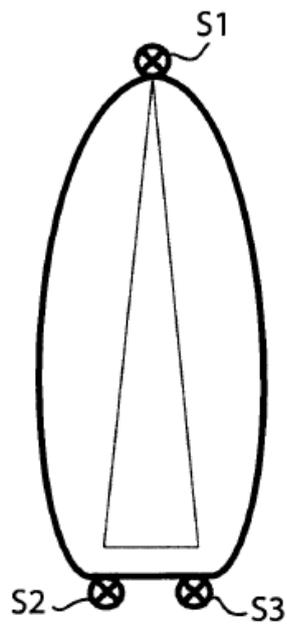
7. Sistema según una de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los sensores ópticos de cada grupo están colocados a una distancia máxima con respecto al eje neutro.

- 5 8. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que cada uno de dichos sensores ópticos está en un cable de fibra óptica respectivo, en particular dichos cables están conectados para formar una cadena de fibra óptica, estando dicha cadena de fibra óptica conectada a la máquina óptica de interrogación (M) con un conector óptico, pudiendo ser conectados, preferiblemente, dichos cables de fibra óptica a la máquina óptica de interrogación (M) con un conector óptico correspondiente.
9. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que los sensores ópticos están fabricados utilizando una parte del cable de fibra óptica que se modifica de modo que dicha parte del cable de fibra óptica tenga un índice de refracción diferente del resto del cable de fibra óptica.
- 10 10. Método para medir y monitorizar las deformaciones de un objeto bidimensional o tridimensional sometido a una o más fuerzas externas utilizando el sistema en cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende las siguientes etapas:
- 15 a) proporcionar, por lo menos, un grupo de sensores ópticos que comprende, por lo menos, un número de sensores igual al número de dimensiones de dicho objeto para ser aplicados sobre dicho objeto, por lo menos, en un cable de fibra óptica;
- b) colocar y pegar dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos;
- c) conectar dicho, por lo menos, un cable de fibra óptica a la máquina óptica de interrogación (M);
- d) enviar una señal luminosa desde dicha máquina óptica de interrogación (M) a dicho, por lo menos, un cable de fibra óptica con el consiguiente impacto de dicha señal luminosa con cada uno de los sensores ópticos de dicho, por lo menos, un grupo;
- 20 e) enviar una señal de respuesta desde cada uno de dichos sensores ópticos a la máquina óptica de interrogación (M);
- f) recibir desde la máquina óptica de interrogación (M) dichas señales de respuesta enviadas desde cada uno de dichos sensores ópticos;
- 25 g) calcular, mediante dicha máquina óptica de interrogación (M), la medida de deformación definida como la diferencia del valor de la longitud de onda de cada sensor óptico después de la deformación del objeto y el valor de calibración del mismo sensor óptico, es decir, el valor de la longitud de onda del sensor óptico fijado en el momento de fijar el cable de fibra óptica sobre el objeto;
- h) enviar la medida de la deformación a un ordenador (C) conectado a dicha máquina óptica de interrogación (M);
- 30 i) calcular la deformación de dicho objeto mediante dicho ordenador (C) con respecto a cada eje de aplicación de la fuerza externa sobre dicho objeto;
- caracterizado por que
- dicho, por lo menos, un grupo de sensores ópticos debe ser aplicado y pegado sobre dicho objeto de acuerdo con una configuración geométrica predeterminada; debiendo ser dispuestos y pegados, por lo menos, dos sensores ópticos, en el mismo plano; y
- 35 por que
- cada uno de dichos sensores ópticos debe ser posicionado a una distancia de un eje neutro de dicho objeto; siendo dicho eje neutro el eje a lo largo del cual una fuerza aplicada a dicho objeto no tiene efecto de deformación sobre dichos sensores ópticos, y
- por que
- 40 dicha configuración geométrica predeterminada está elegida de tal manera que un plano que pasa a través de dicho eje neutro de dicho objeto pasa entre dichos dos sensores ópticos.
11. Método según la reivindicación anterior, caracterizado por que cuando el objeto es tridimensional, la etapa a) proporciona la aplicación, por lo menos, de un grupo de tres sensores ópticos (S1, S2, S3), particularmente la aplicación sobre dicho objeto de una pluralidad de grupos de tres sensores ópticos (S1, S2, S3).
- 45 12. Método según la reivindicación 11, caracterizado por que la etapa a) proporciona la aplicación, por lo menos, de un sensor óptico (S1, S2, S3) adicional para cada grupo sobre dicho objeto.
13. Método de acuerdo con la reivindicación 10 u 11, caracterizado por que la etapa b) de dicho método proporciona el posicionamiento y pegado de cada grupo de tres sensores ópticos (S1, S2, S3) sobre dicho objeto de acuerdo con una disposición geométrica triangular, cada grupo sobre un plano de referencia relevante.

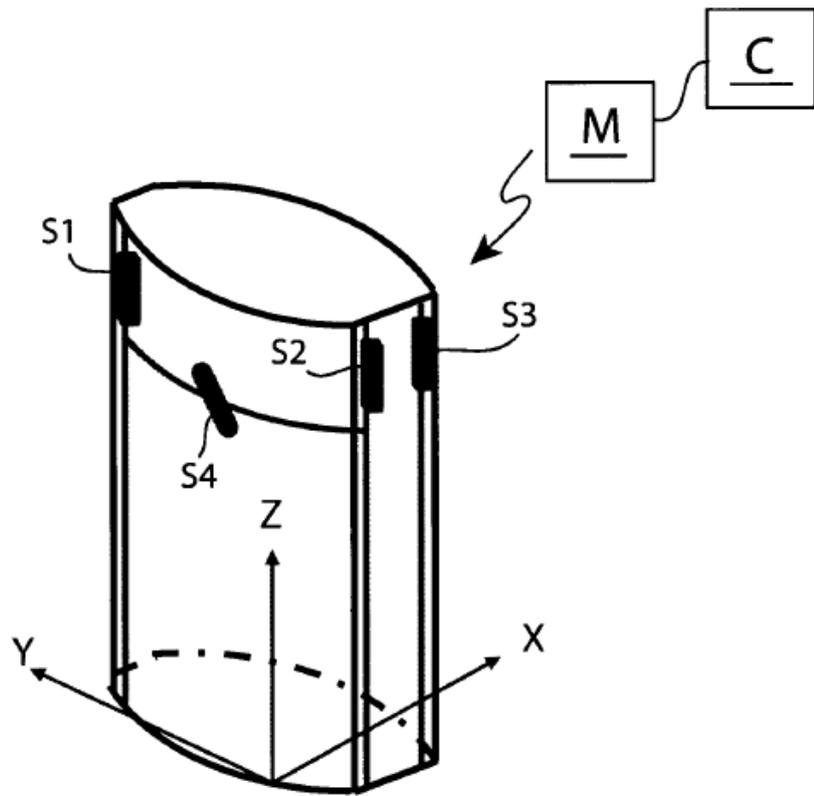
14. Método de acuerdo con la reivindicación 11 o 12, caracterizado por que la etapa b) proporciona el posicionamiento y pegado para cada grupo, por lo menos, de otro sensor óptico (S4) en un plano ortogonal con respecto a cada plano de referencia, e inclinado con respecto al plano de torsión del objeto, preferiblemente con un ángulo de 45°.
- 5 15. Método según la reivindicación anterior, caracterizado por que cuando el objeto es bidimensional, la etapa a) comprende la aplicación, por lo menos, de un grupo de dos sensores ópticos (S5, S6) sobre una primera superficie de dicho objeto.
16. Método según la reivindicación 15, caracterizado por que la etapa a) comprende uno o más grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5', S6') sobre la segunda superficie, opuestos con respecto a la primera superficie.
- 10 17. Método según una de las reivindicaciones 15 a 16, caracterizado por que la etapa a) proporciona, por lo menos, un sensor (S7) adicional para cada grupo de sensores ópticos.
18. Método según una de las reivindicaciones 15 a 16, caracterizado por que la etapa b) proporciona el posicionamiento y pegado de cada grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5, S6) sobre dicha primera superficie según una disposición sustancialmente en forma de L, en el que dichos, por lo menos, dos sensores ópticos (S5, S6) están posicionados en los extremos libres de los dos brazos de dicha forma de L.
- 15 19. Método según una de las reivindicaciones 16 a 17, caracterizado por que la etapa b) proporciona el posicionamiento y pegado de uno o más grupos, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5', S6') sobre dicha primera superficie según una disposición sustancialmente en forma de L; debiendo ser posicionados dichos, por lo menos, dos sensores ópticos (S5', S6') en los extremos libres de los dos brazos de dicha forma de L, y cada grupo, por lo menos, de dos sensores ópticos (S5', S6') es una imagen especular con respecto a un grupo relevante, por lo menos, de dos sensores (S5', S6') sobre la primera superficie del objeto.
- 20 20. Método según una de las reivindicaciones 15 a 19, caracterizado por que la etapa b) proporciona el posicionamiento y pegado, por lo menos, de otro sensor sobre dicha primera superficie o sobre dicha segunda superficie, donde se juntan los brazos de dicha forma de L, preferiblemente inclinados 45° con respecto a dicho eje.
- 25



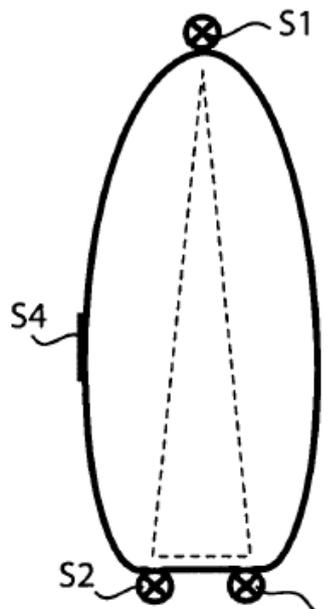
**Fig.1**



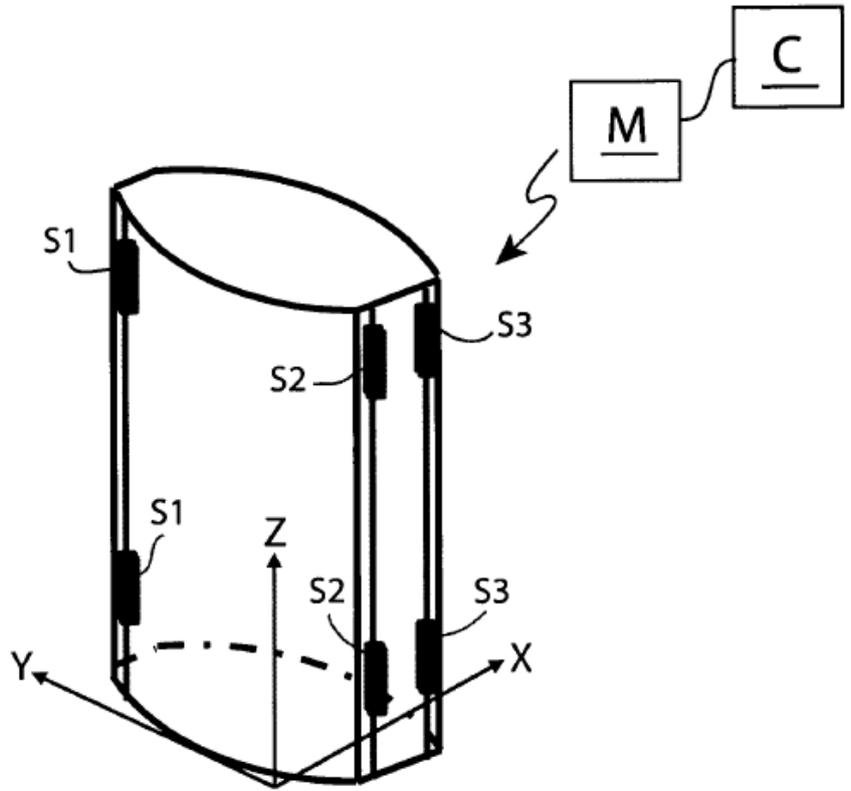
**Fig.2**



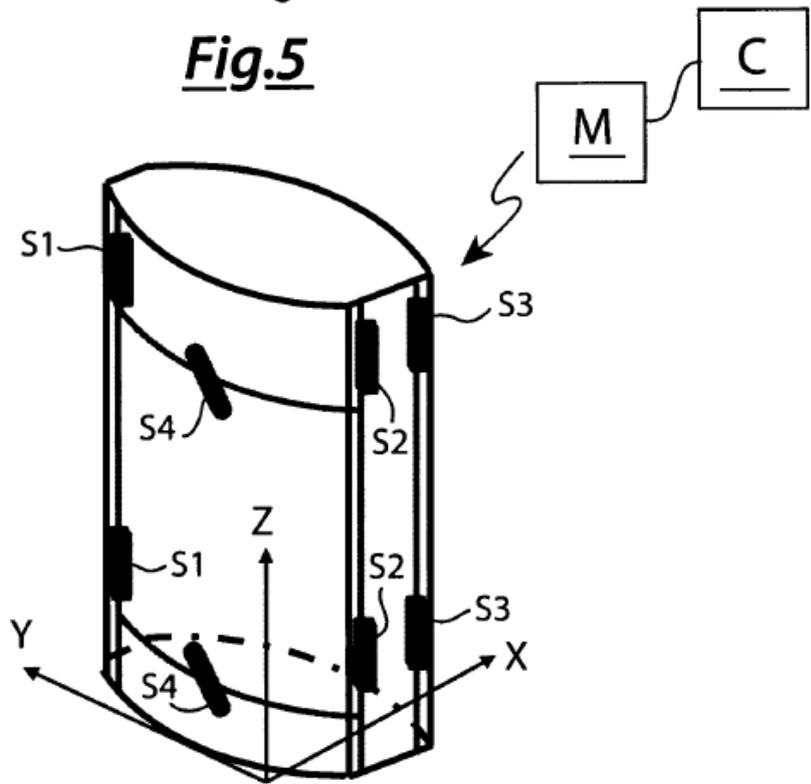
**Fig.3**



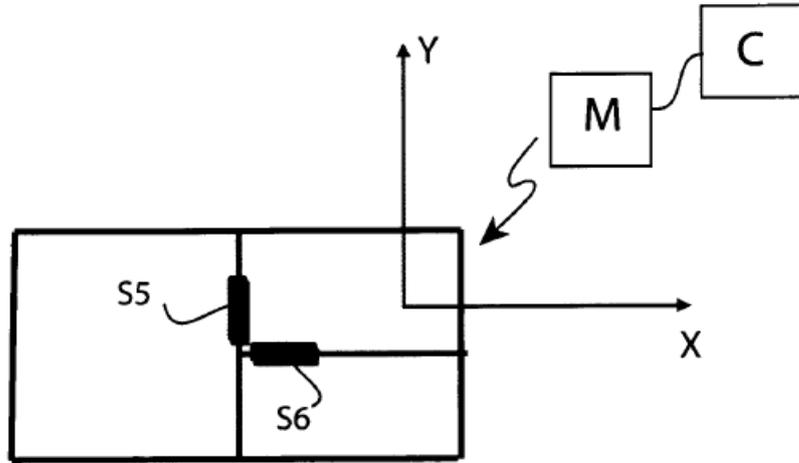
**Fig.4**



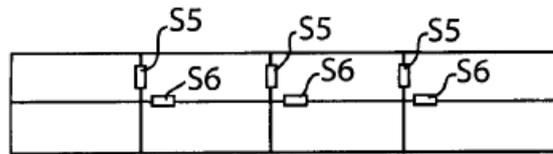
**Fig.5**



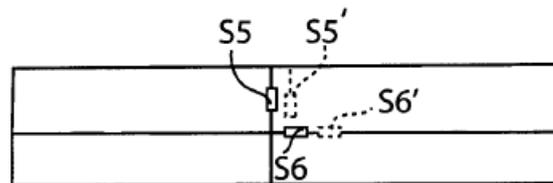
**Fig.6**



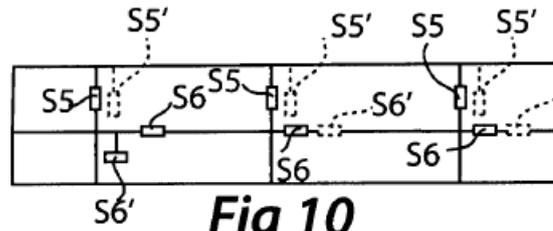
**Fig.7**



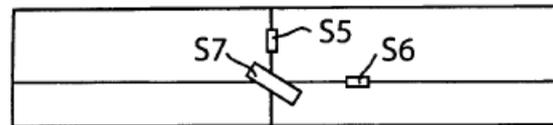
**Fig.8**



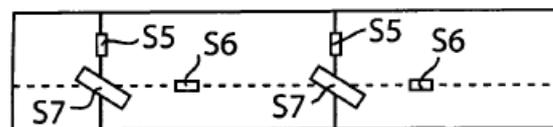
**Fig.9**



**Fig 10**



**Fig 11**



**Fig 12**