

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 780 224**

51 Int. Cl.:

G01M 5/00 (2006.01)

G01N 25/72 (2006.01)

G01M 99/00 (2011.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.07.2016 E 16180916 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **01.01.2020 EP 3121579**

54 Título: **Método y sistema de inspección no destructiva termográfica para detectar y medir defectos volumétricos en estructuras de material compuesto**

30 Prioridad:

22.07.2015 IT UB20152385

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

24.08.2020

73 Titular/es:

**LEONARDO S.P.A. (100.0%)
Piazza Monte Grappa 4
00195 Roma, IT**

72 Inventor/es:

**MAIONE, GIACOMO;
INCARNATO, CIRO;
CILIBERTO, ANTONIO;
GALIETTI, UMBERTO;
PALUMBO, DAVIDE y
CERRONE, GIANPIERO**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 780 224 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

Método y sistema de inspección no destructiva termográfica para detectar y medir defectos volumétricos en estructuras de material compuesto

5 La presente invención se refiere a un método y sistema de inspección no destructiva termográfica para detectar y medir defectos de un tipo volumétrico, tal como, por ejemplo, bolsas de resina en estructuras de material compuesto.

10 Tal como se conoce, durante la fabricación de estructuras de material compuesto laminadas, por ejemplo, de carbono, se usa una matriz de resina para mantener las fibras en su sitio y proporcionar forma al artículo compuesto fabricado. En este contexto, en ocasiones, se observa la formación de bolsas, o acumulaciones no deseadas, de resina que podrían comprometer la resistencia a la tensión del artículo fabricado de esta manera. El procedimiento de formación de
 15 bolsas de resina es el siguiente (otros tipos de bolsas se originan de manera similar): cuando las capas de material compuesto se deforman (de manera ortogonal al plano de laminación) durante la fabricación, pueden generarse espacios vacíos o condiciones de presión anómalas. En particular, durante la fase de polimerización, la resina en fase líquida puede rellenar estos espacios, creando, por tanto, canales de resina, o acumulaciones de resina, conocidas como bolsas de resina, (en paralelo a la generatriz del segmento curvo en el caso de partes radiales), que siguen el perfil de la primera capa afectada por la deformación. En algunos casos, las bolsas pueden rellenarse mediante un material diferente de la resina (adhesivo, elemento de sellado, etc.).

20 La presencia de las bolsas de resina anteriores produce una condición de arrugado en la que pueden formarse arrugas tanto en las estructuras laminadas planas como en las zonas curvas (tal como, por ejemplo, secciones que tienen una forma en C, T, L, I o J). Los métodos de inspección termográficos o térmicos no destructivos para detectar estos defectos anteriormente mencionados, por ejemplo, termografía de bloqueo, se conocen en el estado de la técnica y se usan para detectar defectos en un artículo o cuerpo genérico que se somete a análisis. De hecho, durante una estimulación por calor, el defecto en el cuerpo que se somete a prueba alcanza una temperatura diferente de la alcanzada por el material circundante y/o la misma temperatura en momentos diferentes (y que no muestra defectos). Este comportamiento se debe a las diferentes propiedades termofísicas implicadas en los fenómenos de transmisión de
 25 calor, por ejemplo, la conductividad térmica del material, la densidad del material, etc.

De hecho, si el artículo se estimula de manera oportuna, por medio de lámparas adecuadas, la presencia de un defecto crea un cambio en la difusión de calor normal, provocando una falta local de uniformidad en distribución de temperatura superficial en el artículo que se encuentra en investigación, que puede identificarse fácilmente a través del uso de una cámara termográfica.

30 La tecnología termográfica se basa en detectar la radiación infrarroja emitida desde el cuerpo que se somete a prueba, y aprovecha sensores oportunos que funcionan sin tener que estar en contacto con el cuerpo, determinar la temperatura y generar una imagen térmica.

35 La imagen térmica proporcionada representa un mapa de la distribución de temperatura en el cuerpo que se somete a prueba, a partir del que es posible extraer información relacionada con la estructura interna del cuerpo. Las aplicaciones de tecnología termográfica incluyen los sectores más variados: del energético al de infraestructuras, de las industrias de transporte y aeronáutica a la conservación de herencia cultural y la industria médica. En el campo de la aeronáutica, puede usarse la termografía como un método no destructivo para la inspección periódica de partes, para detectar cualquier defecto que pueda surgir durante la vida útil de una aeronave, o durante las etapas de diseño y ensamblado.

40 El uso de termografía en el sector de la inspección no destructiva está creciendo rápidamente, en relación con las considerables ventajas que ofrece esta tecnología. Los mapas térmicos pueden obtenerse rápidamente y permitir la inspección de grandes superficies sin ningún contacto con las estructuras que se someten a prueba. Esta ventaja da como resultado una reducción significativa en la desactivación de maquinaria, dado que no se requiere el desensamblado con el fin de realizar el análisis termográfico. La termografía de bloqueo puede aplicarse a la inspección de materiales compuestos, por ejemplo, fibras de carbono, para la que no pueden usarse muchas tecnologías
 45 habituales.

Por otro lado, la termografía tradicional se ve afectada por algunas limitaciones debidas a alteraciones, tales como un calentamiento no uniforme, reflexiones procedentes de fuentes de calor en el entorno de trabajo y unos coeficientes de emisividad no homogéneos, lo que podría reproducirse en la imagen del artículo que se somete a prueba y, por tanto, podría perjudicar el resultado de la inspección.

50 Por este motivo, el procesamiento de la señal térmica adquirida representa, actualmente, un importante campo de investigación y de estudio, con el fin de identificar y separar la señal útil del ruido.

55 En termografía de bloqueo, la modulación de temperatura inducida por el sistema de calentamiento tiene una forma de onda sinusoidal o cuadrada, y se propaga como una "onda térmica" en el interior del cuerpo que se somete a prueba. Esta onda experimenta una serie de reflexiones en el interior del cuerpo, de manera que la modulación de temperatura en la superficie del cuerpo es en función de la onda térmica que "retorna" desde el interior del cuerpo.

La imagen de amplitud de la onda reflejada por el cuerpo depende de la absorción no uniforme de la superficie, emisión infrarroja y de la distribución del calentamiento, mientras que la imagen de fase no se ve particularmente afectada por estas alteraciones, dando como resultado, generalmente, una imagen más fiable y sensible. Además, a través del análisis de fase, la profundidad teórica a la que puede detectarse un defecto (μ) es de aproximadamente el doble de la que puede lograrse con un análisis de amplitud y depende de la siguiente fórmula:

$$\mu = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho C_p}} = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}$$

en donde: k es la conductividad térmica del material, ω es la velocidad angular (igual a $2\pi f$, en donde f es la frecuencia de la onda sinusoidal emitida), ρ es la densidad, y C_p es la capacidad térmica. La constante α representa la difusión térmica.

La onda térmica emitida puede obtenerse de diversas maneras. Por ejemplo, tal como se muestra en la figura 1, pueden usarse una o más lámparas 3 halógenas conectadas a un generador 5 de señal diseñado para generar una señal de control (encendido/apagado) para las lámparas 3 halógenas variable en amplitud y frecuencia (por ejemplo, según una forma de onda sinusoidal o cuadrada). De esta manera, una o más lámparas 3 halógenas generan, en uso, una onda térmica modulada, por ejemplo, con una modulación de onda cuadrada o sinusoidal. Incluso más específicamente, esta señal modulada tiene un periodo de 25 segundos en esta aplicación particular.

Una cámara 8 termográfica adquiere la imagen térmica del artículo 4 que se somete a prueba y envía los datos adquiridos a un ordenador 7. El ordenador 7 adquiere las señales procedentes tanto de la cámara 8 termográfica como del activador del generador 5 de señal, que regula las fases de encendido/apagado de la lámpara 3 halógena. Un software proporcionado de manera específica, almacenado en una memoria del ordenador 7, procesa los datos recibidos por el ordenador 7 para generar imágenes de fase y/o amplitud de la onda térmica emitidas desde el cuerpo que se somete a prueba.

El documento WO 2014/044986 se refiere a un método para evaluar la profundidad de una grieta en un material de metal (un defecto del tipo "grieta vertical", también conocido en el estado de la técnica como un "defecto plano"). Estos defectos se caracterizan por una extensión vertical que es mucho mayor que la extensión de anchura, que, por ello, se ignora (por este motivo, el defecto se considera bidimensional).

El documento DE102012003813 se refiere a un método para producir una onda térmica con un ángulo de inclinación de fase ajustable en un espécimen de prueba, de modo que se hace interaccionar opcionalmente la onda térmica con estructuras y defectos verticales u horizontales.

El documento por Cellorio R. *et al.*, "Vertical cracks characterization using lock-in termography: II finite cracks", Measurement Science and Technology 25 (2014), página 115602, pretende caracterizar grietas verticales de tamaño finito y forma aleatoria usando termografía de bloqueo excitada ópticamente.

El documento por Dörr P. *et al.*, "Multi-parameter-fitting procedure for photothermal infrared radiometry on multilayered and bulk-absorbing solids", Journal of Applied Physics, vol. 89, n.º 12, página 7888, 15 de junio de 2001 da a conocer el uso de radiometría infrarroja fototérmica para la medición de propiedades termofísicas, ópticas, geométricas de muestras de múltiples capas de pintura en un sustrato metálico.

Los métodos dados a conocer en los documentos anteriormente mencionados no permiten la inspección termográfica para buscar defectos "volumétricos" (es decir defectos en los que ni la longitud, ni la anchura ni la profundidad pueden ignorarse), tales como las bolsas de resina que se producen en las estructuras de material compuesto, por ejemplo, en fibra de vidrio o fibra de carbono.

El objeto de la presente invención es, por tanto, proporcionar un método y sistema de inspección no destructiva termográfica para detectar y medir defectos de tipo volumétrico, especialmente en estructuras de material compuesto, tal como para superar las desventajas de la técnica conocida.

Según la presente invención, se proporcionan un método y sistema de inspección no destructiva termográfica para detectar y medir un defecto volumétrico, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

Para una mejor comprensión de la presente invención, se describirán ahora algunas realizaciones preferidas, únicamente a modo de ejemplo no limitativo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 muestra esquemáticamente un sistema de inspección termográfica;
- la figura 2 muestra una imagen térmica obtenida mediante la extracción a partir del procesamiento de un mapa térmico generado por el sistema en la figura 1, en el que puede observarse la presencia de un defecto con una forma alargada;
- la figura 3A representa la tendencia de diferencia de fase a lo largo de una línea de inspección mostrada en la figura 2, en un caso ideal con ningún ruido en la imagen de la figura 2;

- la figura 3B representa la tendencia de diferencia de fase a lo largo de una línea de inspección mostrada en la figura 2, en un caso real con ruido en la imagen de la figura 2;

- la figura 4 muestra la primera derivada de la señal en la figura 3A;

5 - la figura 5 muestra la tendencia de anchura del defecto en la figura 2 obtenida basándose en la primera derivada en la figura 4;

- la figura 6 muestra una curva de calibración, usada para calcular una profundidad del defecto en la figura 2; y

- la figura 7 muestra, por medio de un diagrama de flujo, las etapas de calcular la profundidad del defecto mostrado en la figura 2.

10 La presente invención se refiere al campo técnico de inspección no destructiva termográfica de una estructura de material compuesto, definida entre una superficie superior y una superficie inferior, para detectar y medir al menos un defecto volumétrico que se extiende desde la superficie superior hacia la superficie inferior sin tener que alcanzarlo. El defecto volumétrico anteriormente mencionado también se conoce como "bolsa de resina", y tiene una extensión espacial significativa en tres dimensiones definida por los ejes cartesianos X (longitud), Y (anchura) y Z (profundidad).

15 En este contexto, la anchura y la longitud identifican las dimensiones del defecto que se extienden a lo largo de las direcciones Y e X, respectivamente, encontrándose estas direcciones ortogonales de manera mutua, pero disponiéndose en paralelo a la superficie de incidencia (plano XY) de la onda térmica modulada emitida por la(s) lámpara(s) 3 halógena(s) sobre el artículo 4 (véase la figura 1). La anchura a lo largo de Y del defecto tiene un valor menor que la longitud a lo largo de X. En cambio, la profundidad del defecto a lo largo de Z identifica una extensión del defecto a lo largo de la dirección Z, ortogonal a ambas direcciones X e Y, y medida a partir de la superficie de incidencia hacia la superficie inferior del artículo 4, siendo la superficie inferior opuesta a la superficie de incidencia a lo largo de Z.

20 Los defectos del tipo de "grieta vertical" se consideran, habitualmente, bidimensionales o planos, dado que se extienden principalmente a lo largo de dos dimensiones (profundidad a lo largo de la dirección Z y longitud a lo largo de una dirección X), sin mostrar una anchura significativa (a lo largo de la dirección Y). Dicho de otro modo, la extensión del defecto a lo largo de Y es mucho menor que las extensiones respectivas a lo largo de X y Z y, normalmente, es menor de 1/10 con respecto a la menor de las extensiones a lo largo de X y a lo largo de Z. Los defectos del tipo de "grieta vertical" pueden detectarse térmicamente usando una fuente de calor no uniforme o usando el método descrito en el documento WO 2014/044986, basándose en aspectos que no forman parte de esta divulgación y que, sin embargo, no permitirían adquirir la información sobre profundidad, anchura y longitud (es decir en tres dimensiones) de defectos volumétricos, tales como bolsas de resina en estructuras de material compuesto.

30 Los defectos planos verticales, o las "grietas verticales", pueden ser detectables, pero no pueden caracterizarse por el método según la presente invención. Por el contrario, según una realización, la presente invención permite el uso de una fuente de calor uniforme (por ejemplo, lámpara halógena) para detectar defectos volumétricos. Un defecto puede definirse volumétrico, con los fines de la presente invención, cuando la relación entre la anchura a lo largo de Y la extensión mínima entre la profundidad a lo largo de Z y la longitud a lo largo de X es mayor de 1/10.

35 Por tanto, a continuación, se hará referencia a los denominados defectos "volumétricos" (por ejemplo, bolsas de resina), diferenciándolos de los denominados defectos "planos" (por ejemplo, grietas verticales). En cualquier caso, la distinción entre defecto plano y defecto volumétrico se conoce muy bien en el campo técnico de referencia de la presente invención (pruebas o inspecciones no destructivas).

40 Según la presente invención, se proporciona un sistema de termografía de bloqueo del tipo mostrado en la figura 1, y, por tanto, no se describirá adicionalmente (los elementos comunes se indican a continuación en el presente documento con los mismos números de referencia). Según un aspecto de la presente invención, el generador 5 de señal controla el funcionamiento de la lámpara 3 halógena por medio de una señal de control periódica, por ejemplo, del tipo de forma de onda cuadrada o triangular o de diente de sierra, que tiene, por ejemplo, un periodo de entre 10 y 60 segundos, en particular igual a 25 s y un ciclo de funcionamiento de entre el 40 y el 60%, en particular, igual al 50%. En general, con los fines de la presente invención, la señal de control periódica puede desarrollarse en una serie Fourier. Sin embargo, no puede usarse una señal de control puramente sinusoidal según la presente invención. El valor "elevado" de la señal de control determina la duración de tiempo durante el que la lámpara 3 halógena se enciende, mientras que el valor "bajo" de la señal de control determina la duración de tiempo durante el que la lámpara 3 halógena se apaga.

50 La señal térmica emitida desde el artículo 4 se adquiere durante la totalidad del intervalo de tiempo de funcionamiento necesario para obtener un número adecuado de ciclos térmicos (por ejemplo, tres). La información relacionada con la amplitud de la señal térmica adquirida no es relevante para los fines de la presente invención. En su lugar, se usa la información de fase. La información de fase de la señal recibida representa la diferencia, en cuanto a cambio de fase (medida en grados), entre la señal térmica emitida desde las regiones sin defectos del artículo 4 y las regiones del artículo 4 con defectos.

55 La señal térmica captada por la cámara 8 termográfica se envía, tal como se comentó anteriormente, al ordenador 7. La señal enviada desde la cámara 8 termográfica al ordenador 7 es un mapa térmico del artículo 4. Este mapa térmico

representa el diferente comportamiento de difusión del calor de las regiones, superficial e interna, del artículo 4; la diferencia de flujo de calor con respecto a una zona definitivamente sin defectos indica una falta de homogeneidad en el interior del artículo 4, tal como para asumir la presencia de defectos, en particular defectos en forma de bolsas de resina que parten de la superficie del artículo 4 y se extienden hacia el interior del artículo 4. La señal generada por la cámara 8 termográfica se procesa por el ordenador 7 para extraer información relacionada con los armónicos primero y tercero

Tal como se describe mejor a continuación en el presente documento, los análisis de datos del primer armónico permiten determinar la anchura L de cualquier defecto detectado y, en determinadas condiciones, también la profundidad. Sin embargo, puede obtenerse una mejor estimación de la profundidad de cualquier defecto detectado a través de análisis conjuntos de los datos de los armónicos primero y tercero.

Tal como se ha mencionado, la información sobre el primer armónico se usa para estimar la anchura L del defecto. La figura 2 muestra, a modo de ejemplo, una imagen térmica de una parte del artículo 4 procesada para representar gráficamente (en escala de grises) el primer armónico de la señal térmica detectada por la cámara 8 termográfica. En la representación usada en la figura 2, las regiones más oscuras se relacionan con valores de diferencia de fase elevados (módulo), mientras que las regiones más claras identifican una diferencia de fase pequeña (módulo). Las regiones más oscuras se asocian con una imperfección o defecto de la parte del artículo 4 analizado (diferencia de fase elevada).

La señal relacionada con el primer armónico puede filtrarse de antemano, por ejemplo, con un filtro promedio móvil, con el fin de reducir el ruido.

La figura 3A muestra una señal $S_{\Delta P}$ que representa la tendencia de diferencia de fase a lo largo de la línea de inspección indicada por el número de referencia 13 en la figura 2. La tendencia de fase se monitoriza a lo largo de una pluralidad de líneas de inspección, paralelas a la línea 13 de inspección. Por ejemplo, es posible detectar la tendencia de diferencia de fase a lo largo de una pluralidad de líneas 13 de inspección adyacentes entre sí (en cuanto a píxeles), analizando la totalidad de la figura 2, o a lo largo de líneas de inspección separadas una con respecto a otra por una distancia predefinida (por ejemplo, separadas una con respecto a otra por unos pocos píxeles).

Las señales obtenidas de ese modo (similares a la señal $S_{\Delta P}$ en la figura 3A) se procesan de manera individual con el fin de realizar operaciones de diferencial respectivas sobre estas señales, generando señales derivadas respectivas.

La figura 4 muestra la primera derivada de la señal en la figura 3A (señal derivada S_{DER}). Los valores obtenidos por medio de operaciones de diferencial se muestran en el eje de las ordenadas, mientras que los valores que indican la posición a lo largo de la línea de inspección tenida en consideración (en este caso, a lo largo de la línea 13 de inspección) se muestran en el eje de las abscisas. A través del análisis de la señal derivada S_{DER} en la figura 4, es posible identificar la anchura del defecto que se somete a análisis midiendo la distancia L como la distancia entre el cruce nulo que precede de manera inmediata al punto 18 mínimo y el cruce nulo que sigue de manera inmediata al punto 19 máximo. Alternativamente, es posible usar un valor de cero o en las proximidades de cero como umbral.

Al realizar esta operación para todas las señales correspondientes a las líneas de inspección tenidas en consideración, se obtienen una pluralidad de valores de anchura L del defecto analizado, que pueden usarse para construir (de manera gráfica) la imagen monocroma en la figura 5. El conjunto de los valores de anchura L calculados de esta manera es para indicar la variación de anchura del defecto que se somete a análisis, a lo largo de una longitud de extensión del defecto.

En la figura 5, cada píxel que pertenece a una línea de inspección respectiva, paralela a la línea 13 de inspección en la figura 2, está coloreado de blanco en la región entre los cruces nulos de la señal derivada respectiva (región de anchura L en la figura 4), y coloreado de gris fuera de esta región. Por tanto, se obtiene la imagen en la figura 5, que muestra la anchura, y su variación a lo largo de la longitud, del defecto.

Entonces, comienza el cálculo de la profundidad del defecto que se tiene en consideración.

Las operaciones de cálculo de profundidad se realizan a lo largo de líneas de inspección respectivas del mapa térmico, para cubrir toda la extensión del defecto tenido en consideración, de manera similar a la anteriormente descrita para calcular la anchura del defecto.

Con el fin de calcular la profundidad del defecto, en primer lugar, se tiene en consideración la señal $S_{\Delta P}$ en la figura 3A, relacionada con el primer armónico. Basándose en esta señal $S_{\Delta P}$, se identifican los valores máximos alcanzados por la señal $S_{\Delta P}$ (valores Φ_{M1} y Φ_{M2} , iguales entre sí en la figura), y el valor mínimo alcanzado por la señal $S_{\Delta P}$ (valor Φ_{min} en la figura). Los valores máximos Φ_{M1} y Φ_{M2} son el valor máximo de la señal $S_{\Delta P}$ que precede al valor mínimo Φ_{min} , y el valor máximo de la señal $S_{\Delta P}$ que sigue al valor mínimo Φ_{min} , respectivamente. Entonces, se obtiene el parámetro $\Delta\Phi_1$ calculando el recorrido entre Φ_{min} y Φ_{M1} (o Φ_{M2}), es decir $\Delta\Phi_1 = \Phi_{min} - \Phi_{M1}$.

Dado que, en un caso real, normalmente, los valores Φ_{M1} y Φ_{M2} no son iguales, es recomendable calcular el parámetro $\Delta\Phi_1$ según la fórmula:

$$\Delta\phi_1 = \phi_{\min} - \frac{\phi_{M1} + \phi_{M2}}{2}$$

5 Las operaciones anteriormente comentadas para calcular $\Delta\Phi_1$ se realizan de una manera similar sobre la señal relacionada con el tercer armónico de la señal generada por la cámara 8 termográfica, tenida en consideración a lo largo de la línea 13 de inspección. La tendencia de la señal relacionada con el tercer armónico no se muestra en las figuras, pero es similar a la tendencia de señal $S_{\Delta P}$ en la figura 3A, y muestra dos puntos máximos (Φ_{M1}' y Φ_{M2}') que preceden y siguen de manera inmediata al punto mínimo Φ_{\min}' . Al seguir las mismas etapas, se calcula un valor de diferencia de fase $\Delta\Phi_2$ según la siguiente fórmula:

$$\Delta\phi_2 = \phi'_{\min} - \frac{\phi'_{M1} + \phi'_{M2}}{2}$$

10 Además, para calcular $\Delta\Phi_1$ y $\Delta\Phi_2$, las operaciones anteriormente comentadas se realizan para una pluralidad de líneas de inspección tenidas en consideración, con el fin de estimar el desarrollo espacial del defecto.

El solicitante ha encontrado que, en la práctica, la señal $S_{\Delta P}$ relacionada con el primer armónico es una señal altamente variable, del tipo mostrado en la figura 3B. Por tanto, la elección de valores máximos precisos Φ_{M1} y Φ_{M2} no puede proporcionar resultados precisos. También pueden aplicarse las mismas observaciones a la señal relacionada con el tercer armónico.

15 En este caso, el valor de punto Φ_{M1} se sustituye por el valor promedio que asume la señal $S_{\Delta P}$ antes de comenzar a “caer” al valor mínimo Φ_{\min} , y el valor de punto Φ_{M2} se sustituye por el valor promedio que asume la señal $S_{\Delta P}$ tras el final de la “elevación” del valor mínimo Φ_{\min} . Para ello, se identifica una primera pluralidad 23 de píxeles que precede al comienzo de inversión de pendiente de la señal $S_{\Delta P}$ (por ejemplo, un número de píxeles que oscila entre 2 y 10, por ejemplo 5 píxeles que preceden de manera inmediata la inversión de pendiente que identifica el comienzo del defecto).
 20 Un valor de fase respectivo (tal como se identifica en el eje de las ordenadas) se asigna a cada píxel de la primera pluralidad 23 de píxeles, y, entonces, se calcula el valor promedio Φ_{avg1} de los valores de fase obtenidos de este modo. Entonces, siempre basándose en la señal $S_{\Delta P}$, se identifica una segunda pluralidad 24 de píxeles que sigue el final de la inversión de pendiente de la señal $S_{\Delta P}$ que identifica el final del defecto tenido en consideración (por ejemplo, un número de píxeles que oscila entre 2 y 10, por ejemplo 5 píxeles que siguen de manera inmediata la inversión de pendiente que
 25 identifica el final del defecto). Se asigna un valor de fase respectivo (tal como se identifica en el eje de las ordenadas) a cada píxel de la segunda pluralidad 24 de píxeles, y, entonces, se calcula el valor promedio Φ_{avg2} de los valores de fase obtenidos de este modo.

Entonces, se calcula el valor de diferencia de fase $\Delta\Phi_1$ según la siguiente fórmula:

$$\Delta\phi_1 = \phi_{\min} - \frac{\phi_{avg1} + \phi_{avg2}}{2}$$

30 en donde se calculan Φ_{avg1} y Φ_{avg2} tal como se describió anteriormente y Φ_{\min} es el valor de fase mínimo asumido por la señal $S_{\Delta P}$.

Para el cálculo de $\Delta\Phi_1$, se realizan las operaciones anteriormente comentadas de una manera similar sobre la señal relacionada con el tercer armónico de la señal detectada (medida) por la cámara 8 termográfica, tenida en consideración a lo largo de la línea 13 de inspección. Según las mismas etapas, el valor de diferencia de fase $\Delta\Phi_2$ se calcula según la
 35 siguiente fórmula:

$$\Delta\phi_2 = \phi'_{\min} - \frac{\phi'_{avg1} + \phi'_{avg2}}{2}$$

en donde Φ'_{avg1} y Φ'_{avg2} son valores promedio calculados de una manera similar a la anteriormente descrita para calcular los valores promedio Φ_{avg1} y Φ_{avg2} , respectivamente, mientras que Φ'_{\min} es el valor de fase mínimo asumido por la señal de cambio de fase relacionada con el tercer armónico.

40 El solicitante ha verificado, por medio de pruebas experimentales, que los valores de fase de diferencia $\Delta\Phi_1$ y $\Delta\Phi_2$ (parámetros normalmente proporcionados por sistemas de termografía de bloqueo conocidos) pueden correlacionarse de manera más correcta con el volumen del defecto (bolsa de resina) en lugar de con su profundidad.

Según un aspecto de la presente invención, la profundidad p del defecto tenido en consideración se calcula en función de los valores anteriormente calculados de la longitud L , la diferencia de fase $\Delta\Phi_1$ relacionada con el primer armónico, y
 45 la diferencia de fase $\Delta\Phi_2$ relacionada con el tercer armónico. Por tanto, también en este caso, el cálculo de la profundidad se realiza para cada línea de inspección tenida en consideración. Para adquirir información sobre la variación de profundidad a lo largo de toda la longitud del defecto tenido en consideración, es necesario, por tanto,

ES 2 780 224 T3

calcular el valor de profundidad p para una pluralidad de líneas de inspección paralelas entre sí.

Por tanto, se proporciona una estimación p_E de la profundidad (teniendo solo en consideración el primer armónico) por la siguiente fórmula:

$$p_E = \Delta \Phi_1 \cdot (L + L_0) e_1$$

5 en donde L es la anchura del defecto, obtenida tal como se describió anteriormente sobre la línea de inspección a lo largo de la que se desea calcular la profundidad, L_0 es un parámetro de corrección determinado de manera empírica tal como se describe a continuación, por ejemplo, con un valor igual a $-0,1$, y e_1 es un parámetro de corrección determinado de manera empírica, por ejemplo, con un valor igual a -1 , que relaciona la profundidad, anchura y diferencia de fase en conjunto.

10 Se obtiene una curva de calibración practicable comparando el valor estimado p_E de una pluralidad de muestras de referencia (teniendo cada una un defecto de diferente profundidad) con un valor de profundidad real p_{opt} , obtenido por medición directa (por ejemplo, óptica) con análisis destructivo de la muestra de referencia respectiva. Obsérvese la figura 6, en donde se muestran los valores estimados p_E de las muestras de referencia respectivas en el eje de las abscisas y los valores medidos p_{opt} se muestran en el eje de las ordenadas. Cada punto identificado en el sistema de
15 referencia en la figura 6 representa un par (p_E, p_{opt}) relacionado con una muestra de referencia. Al interpolar estos puntos con una función lineal se proporciona una línea recta del tipo $p_{opt} = m \cdot p_E + q$, en donde m es el coeficiente angular y q es el punto de corte de la línea dibujada. Al sustituir la ecuación $p_E = \Delta \Phi_1 \cdot (L + L_0) e_1$ en la ecuación de la línea obtenida de este modo da como resultado una primera estimación de la medición de profundidad del defecto tenido en consideración, obtenido según un aspecto de la presente invención, que se proporciona mediante:

20
$$P_1 = m_1 \cdot (-\Delta \Phi_1) \cdot (L + L_0) e_1 + q_1.$$

Realizar las mismas operaciones para el tercer armónico, da como resultado una segunda estimación de la medición de profundidad del defecto tenido en consideración, obtenido según un aspecto de la presente invención, que se proporciona mediante:

$$P_2 = m_2 \cdot (-\Delta \Phi_2) \cdot (L + L_0) e_1 + q_2.$$

25 En el caso de defectos forma de bolsas de resina en estructuras de material compuesto tales como fibra de carbono, el solicitante ha verificado que, para el material y el componente sometido al supuesto práctico, los valores de los parámetros pueden obtenerse en intervalos tales como, por ejemplo: m_1 en el intervalo entre $0,85$ y $0,95$ (y, en particular, el valor $m_1 = 0,89$); q_1 en el intervalo entre $-0,4$ y $-0,8$ (y, en particular, el valor $q_1 = -0,62$); m_2 en el intervalo entre $0,78$ y $0,85$ (y, en particular, el valor $m_2 = 0,81$); y q_2 en el intervalo entre $-1,0$ y $-1,8$ (y, en particular, el valor $q_2 = -1,5$).
30

Los valores obtenidos para P_1 y P_2 representan estimaciones de la profundidad del defecto, a lo largo de la línea de inspección tenida en consideración.

Entonces, con referencia al diagrama de flujo en la figura 7, se lleva a cabo el cálculo de la profundidad del defecto.

35 En primer lugar, etapa 100, se comprueba si $|P_2 - P_1| > \Delta$, en donde Δ es igual a un valor muy pequeño, y en cualquier caso no superior a un valor de incertidumbre de medición predefinido y elegido libremente (en el supuesto práctico, por ejemplo, se eligió un valor de $0,2$ mm para la incertidumbre de medición, y de modo que se eligió el valor para Δ para encontrarse por debajo de la incertidumbre de medición según varios órdenes de magnitud, entre $0,00005$ mm y $0,0005$ mm, en particular igual a $0,0001$ mm). El valor de Δ también puede elegirse igual a cero. En general, la etapa 100 tiene la función de comprobar si los valores de profundidad obtenidos usando los armónicos primero y tercero son sustancialmente iguales entre sí. En esta condición, resulta innecesario avanzar adicionalmente y el valor de profundidad del defecto tenido en consideración se proporciona por el valor de P_1 (NO salida de la etapa 100, y ejecución de la etapa 101). De otro modo, Sí sale de la etapa 100, el procesamiento avanza a la etapa 102, en la que se comprueba si $|P_2 - P_1| > \delta$ en donde δ tiene un valor superior a Δ y menor que dos veces la incertidumbre de medición (en el supuesto práctico, el valor de δ está comprendido, por ejemplo, entre $0,0005$ y $0,002$ mm, en particular igual a $0,001$ mm). En general, la etapa 102 tiene la función de comprobar si los valores de profundidad obtenidos usando los armónicos primero y tercero son muy similares entre sí, incluso si no son idénticos.

45 Si es positivo, Sí sale de la etapa 102, el procesamiento avanza a la etapa 103, en la que el valor de profundidad del defecto tenido en consideración se define según la fórmula:

$$P_1 + \alpha \cdot (P_1 - P_2)^b,$$

50 en donde α es una constante elegida en el intervalo $0,08-0,15$, por ejemplo igual a $0,1$, y b es una constante elegida en el intervalo $1-1,5$, por ejemplo igual a 1 .

Las constantes α y b son constantes obtenidas de manera empírica por medio de un procedimiento de calibración

descrito a continuación.

En caso de que salga NO de la etapa 102, el procesamiento avanza a la etapa 104, en la que el valor de profundidad del defecto tenido en consideración se calcula según la fórmula:

$$\left[\left(1 - \left((P2 - P1) - \Delta \right) \cdot (\delta - \Delta) \right) \cdot P1 \right] + \left[\left((P2 - P1) - \Delta \right) \cdot (\delta - \Delta) \cdot \left(P1 + \alpha \cdot (P1 - P2)^b \right) \right]$$

- 5 Los valores de parámetros α , Δ , δ y b pueden ser diferentes de los indicados, especialmente en el caso de materiales o procesos de fabricación diferentes de los del supuesto práctico. En general, la norma es que los parámetros anteriormente mencionados se eligen de manera que, en las diversas condiciones asumidas en las etapas 100 y 102, se minimiza el error entre el valor de profundidad calculado y el valor de profundidad real, medidos en muestras de prueba por medio de métodos destructivos. En esta fase, teniendo en cuenta el pequeño número de parámetros que deben configurarse, es posible avanzar por medio de un enfoque de ensayo y error, por ejemplo, de tipo automático (por ordenador).

- 10 Resulta obvio a partir de lo que se ha descrito que, teniendo en cuenta la posibilidad de reducir significativamente la incertidumbre en la cuantificación de los valores de anchura y de profundidad de un defecto tal como una bolsa de resina, el método según la presente invención representa un desarrollo significativo con respecto al reportado en los documentos y conocido en el estado de la técnica.

- 15 Finalmente, resulta evidente que pueden realizarse modificaciones y variantes a la invención descrita e ilustrada en el presente documento sin alejarse del alcance de la presente invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Método de inspección no destructiva termográfica de una estructura (4) de material compuesto, que incluye una superficie de incidencia y una superficie inferior dispuesta a una distancia de la superficie de incidencia para detectar y medir al menos un defecto volumétrico que, comenzando desde la superficie de incidencia, se extiende hacia la superficie inferior, que comprende las etapas de:
- 5 a- suministrar una onda no sinusoidal térmica periódica en la superficie de incidencia;
- b- generar una señal de temperatura que identifica un cambio de fase entre la onda térmica modulada y una onda térmica de retorno emitida desde la estructura (4) en respuesta a la onda térmica modulada, que comprende generar un mapa térmico de al menos una parte de la estructura (4) que incluye el defecto, representando el mapa térmico el comportamiento de difusión del calor de regiones, superficial e interna, de dicha al menos una parte de la estructura (4), en el que dicho cambio de fase indica las regiones sin defectos de la estructura (4) y las regiones de la estructura (4) con defectos;
- 10 c- procesar la señal de temperatura para obtener una primera subseñal relacionada con la fase del primer armónico de la señal de temperatura;
- 15 d- identificar una primera dimensión (L) de dicho defecto en función de la fase del primer armónico de la señal de temperatura, siendo dicha primera dimensión (L) la anchura del defecto;
- e- calcular un primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$) calculando la diferencia, en grados, entre un valor mínimo y un valor máximo, o entre un valor mínimo y un valor medio de una pluralidad de valores en las proximidades del valor máximo, de la primera subseñal;
- 20 f- procesar la señal de temperatura para obtener una segunda subseñal relacionada con la fase del tercer armónico de la señal de temperatura;
- g- calcular un segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$) como la diferencia, en grados, entre un valor mínimo y un valor máximo, o el promedio de una pluralidad de valores en una proximidad del valor máximo, de la segunda subseñal;
- 25 h- identificar (101) una segunda dimensión del defecto en función de la primera dimensión (L), el primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$) y el segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$).
2. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa que identifica la primera dimensión (L) comprende:
- calcular la primera derivada de la subseñal relacionada con la fase del primer armónico;
- identificar un primer punto de corte entre dicha primera derivada y un valor umbral que sigue de manera inmediata un valor máximo de la primera derivada, y un segundo punto de corte entre dicha primera derivada y el valor umbral que precede de manera inmediata un valor mínimo de la primera derivada; e
- 30 - identificar la primera dimensión (L) de dicho defecto en función de la distancia entre dichos puntos de corte primero y segundo.
3. Método según la reivindicación 1 o 2, que incluye, además, la etapa de definir una pluralidad de líneas de inspección en una región de dicho mapa térmico que incluye el defecto, extendiéndose dichas líneas de inspección en paralelo entre sí a lo largo de la primera dimensión, de dicho defecto, que va a calcularse, y en el que las etapas de c- a f- se realizan para cada línea de inspección.
- 35 4. Método según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la etapa h- de identificar la segunda dimensión (P₁) comprende:
- calcular una primera estimación de profundidad, P₁, del defecto en función del primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$), según la fórmula
- 40
$$P_1 = m_1 \cdot (-\Delta\Phi_1 \cdot (L + L_0)^{e_1}) + q_1,$$
- en donde m₁ es el coeficiente angular de una primera aproximación lineal de una sucesión de puntos obtenida a partir de la comparación entre una medición real de la segunda dimensión en una muestra de prueba y una estimación de la segunda dimensión en la muestra de prueba realizada basándose en la primera subseñal, q₁ es el punto de corte de dicha primera aproximación lineal, $\Delta\Phi_1$ es dicho primer parámetro intermedio, L es la primera dimensión del defecto, y L₀ y e₁ son factores de corrección; y
- 45 - asociar la primera estimación de profundidad P₁ con la segunda dimensión del defecto.
5. Método según la reivindicación 4, en el que la etapa h- de identificar la segunda dimensión comprende, además, calcular una segunda estimación de profundidad, P₂, del defecto en función del segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$),

según la fórmula

$$P2 = m_2 \cdot (-\Delta\Phi_2 \cdot (L + L_0)^{e_1}) + q_2,$$

en donde m_2 es el coeficiente angular de una segunda aproximación lineal de una sucesión de puntos obtenidos a partir de la comparación entre una medición real de la segunda dimensión en una muestra de prueba y una estimación de la segunda dimensión en la muestra de prueba realizada basándose en la segunda subseñal, q_2 es el punto de corte de dicha segunda aproximación lineal, $\Delta\Phi_2$ es dicho segundo parámetro intermedio, L es la primera dimensión del defecto, y L_0 y e_1 son factores de corrección; e

- identificar la segunda dimensión del defecto en función de la primera estimación de profundidad P_1 y de la segunda estimación de profundidad P_2 .

6. Método según la reivindicación 5, en el que la etapa de identificar la segunda dimensión del defecto en función de la primera estimación de profundidad P_1 y de la segunda estimación de profundidad P_2 comprende las subetapas de:

i.- verificar si $|P_2 - P_1| > \Delta$, siendo Δ un valor inferior a un valor de incertidumbre de medición predefinido;

ii.- si la subetapa i. tiene un resultado negativo, entonces ajustar la segunda dimensión del defecto al valor de la primera estimación de profundidad P_1 ; de otro modo:

iii.- ajustar la segunda dimensión del defecto al valor obtenido según la fórmula $P_1 + \alpha \cdot (P_1 - P_2)^b$, en donde α y b son constantes elegidas para minimizar el error de estimación de la segunda dimensión del defecto.

7. Método según la reivindicación 6, que comprende, además, antes de la etapa iii., la etapa de verificar si $|P_2 - P_1| > \delta$, en donde δ es un valor mayor que Δ e inferior al doble del valor de incertidumbre de medición, y realizar la etapa iii. solo si la etapa de verificar si $|P_2 - P_1| > \delta$ tiene un resultado positivo; de otro modo: iv.- ajustar la segunda dimensión del defecto al valor obtenido según la fórmula.

$$\left[(1 - ((P_2 - P_1) - \Delta) \cdot (\delta - \Delta)) \cdot P_1 \right] + \left[((P_2 - P_1) - \Delta) \cdot (\delta - \Delta) \cdot (P_1 + \alpha \cdot (P_1 - P_2)^b) \right]$$

8. Sistema de inspección no destructiva termográfica de una estructura (4) de material compuesto, que incluye una superficie de incidencia y una superficie inferior dispuesta a una distancia de la superficie de incidencia para detectar al menos un defecto volumétrico que, comenzando desde la superficie de incidencia, se extiende hacia la superficie inferior, que comprende:

- un generador (3, 5) de señal periódica, configurado para suministrar una onda térmica no sinusoidal periódica a la superficie de incidencia;

- una cámara (8) termográfica, configurada para adquirir una onda térmica de retorno emitida desde la estructura (4) en respuesta a la onda térmica modulada; y

- medios (7) informáticos, acoplados de manera operativa a la cámara termográfica, configurados para:

a.- recibir desde la cámara (8) termográfica una señal correlacionada con la onda térmica de retorno y generar una señal de temperatura que identifica un cambio de fase entre la onda térmica modulada y la onda térmica de retorno, que comprende generar un mapa térmico de al menos una parte de la estructura (4) que incluye el defecto, representando el mapa térmico el comportamiento de difusión del calor de regiones, superficial e interna, de dicha al menos una parte de la estructura (4), en el que dicho cambio de fase indica las regiones sin defectos de la estructura (4) y las regiones de la estructura (4) con defectos;

b.- procesar la señal de temperatura para generar una primera subseñal relacionada con la fase del primer armónico de la señal de temperatura;

c.- calcular la primera derivada de la primera subseñal relacionada con la fase del primer armónico;

d.- identificar una primera dimensión (L) de dicho defecto en función del primer armónico de la señal de temperatura, siendo dicha primera dimensión (L) la anchura del defecto;

e.- calcular un primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$) calculando la amplitud, en grados, entre un valor mínimo y un valor máximo, o entre un valor mínimo y un valor medio de una pluralidad de valores en las proximidades del valor máximo, de la primera subseñal;

f.- procesar la señal de temperatura para obtener una segunda subseñal relacionada con la fase del tercer armónico de la señal de temperatura;

g.- calcular un segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$) calculando la diferencia, en grados, entre un valor mínimo y un valor máximo, o promediar una pluralidad de valores en las proximidades del valor máximo, de la segunda subseñal; e

h- identificar la segunda dimensión (P_1) del defecto en función de la primera dimensión (L), del primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$) y del segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$).

5 9. Sistema según la reivindicación 8, en el que, la primera dimensión (Y, L) y la segunda dimensión (X) de dicho defecto volumétrico son coplanares con la superficie de incidencia y son de manera que la primera dimensión (Y) es menor que la segunda dimensión (X), incluyendo el defecto volumétrico, además, una profundidad (Z) que se extiende de manera ortogonal a las dimensiones primera y segunda, en el que la relación entre la primera dimensión (Y, L) y el valor más bajo de la profundidad (Z) y la segunda dimensión (X) es mayor de 1/10.

10. Sistema según la reivindicación 8 o 9, en el que, para identificar la primera dimensión (L), los medios (7) informáticos están configurados adicionalmente para:

10 - identificar un primer punto de corte entre dicha primera derivada y un valor umbral que sigue de manera inmediata un valor máximo de la primera derivada, y un segundo punto de corte entre dicha primera derivada y el valor umbral que precede de manera inmediata un valor mínimo de la primera derivada; e

- identificar una primera dimensión (L) de dicho defecto en función de la distancia entre dichos puntos de corte primero y segundo.

15 11. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 8-10, en el que dichos medios (7) informáticos están configurados adicionalmente para:

definir una pluralidad de líneas de inspección en una región de dicho mapa térmico que incluye el defecto, extendiéndose dichas líneas de inspección en paralelo entre sí a lo largo de la primera dimensión, de dicho defecto, que va a calcularse; y

20 realizar las etapas b.-h. para cada línea de inspección.

12. Sistema según la reivindicación 11, en el que los medios (7) informáticos están configurados adicionalmente para:

- calcular, para cada línea de inspección, una primera estimación de profundidad, P_1 , del defecto en función del primer parámetro intermedio ($\Delta\Phi_1$), según la fórmula

$$P_1 = m_1 \cdot (-\Delta\Phi_1 \cdot (L + L_0)^{e_1}) + q_1$$

25 en donde m_1 es el coeficiente angular de una primera aproximación lineal de una sucesión de puntos obtenida a partir de la comparación entre una medición real de la segunda dimensión en una muestra de prueba y una estimación de la segunda dimensión en la muestra de prueba realizada basándose en la primera subseñal, q_1 es el punto de corte de dicha primera aproximación lineal, $\Delta\Phi_1$ es dicho primer parámetro intermedio, L es la primera dimensión del defecto, y L_0 y e_1 son factores de corrección; y

30 - asociar la primera estimación de profundidad P_1 con la segunda dimensión del defecto.

13. Sistema según la reivindicación 10, en el que los medios (7) informáticos están configurados adicionalmente para calcular una segunda estimación de profundidad, P_2 , del defecto en función del segundo parámetro intermedio ($\Delta\Phi_2$), según la fórmula

$$P_2 = m_2 \cdot (-\Delta\Phi_2 \cdot (L + L_0)^{e_1}) + q_2,$$

35 en donde m_2 es el coeficiente angular de una segunda aproximación lineal de una sucesión de puntos obtenidos a partir de la comparación entre una medición real de la segunda dimensión en una muestra de prueba y una estimación de la segunda dimensión en la muestra de prueba realizada basándose en la segunda subseñal, q_2 es el punto de corte de dicha segunda aproximación lineal, $\Delta\Phi_2$ es dicho segundo parámetro intermedio, L es la primera dimensión del defecto, y L_0 y e_1 son factores de corrección; e

40 - identificar la segunda dimensión del defecto en función de la primera estimación de profundidad P_1 y de la segunda estimación de profundidad P_2 .

14. Sistema según la reivindicación 13, en el que los medios (7) informáticos están configurados adicionalmente para identificar la segunda dimensión del defecto en función de la primera estimación de profundidad P_1 y de la segunda estimación de profundidad P_2 realizando las subetapas de:

45 i.- verificar si $|P_2 - P_1| > \Delta$, en donde Δ es un valor inferior a un valor de incertidumbre de medición predefinido;

ii.- si la subetapa i. tiene un resultado negativo, entonces ajustar la segunda dimensión del defecto al valor de la primera estimación de profundidad P_1 ; de otro modo:

iii.- ajustar la segunda dimensión del defecto al valor obtenido según la fórmula $P_1 + \alpha \cdot (P_1 - P_2)^b$, en donde α y b son

constantes elegidas para minimizar el error de estimación de la segunda dimensión del defecto.

15. Sistema según la reivindicación 14, en el que los medios (7) informáticos se configuran adicionalmente, antes de la etapa iii., para verificar si $|P_2 - P_1| > \delta$, en donde δ es un valor mayor que Δ e inferior al doble del valor de incertidumbre de medición, y realizar la etapa iii. solo si la etapa de verificar si $|P_2 - P_1| > \delta$ tiene un resultado positivo; de otro modo:

5 iv.- ajustar la segunda dimensión del defecto al valor obtenido según la fórmula.

$$\left[\left(1 - \left((|P_2 - P_1| - \Delta) \cdot (\delta - \Delta) \right) \right) \cdot P_1 \right] + \left[\left((|P_2 - P_1| - \Delta) \cdot (\delta - \Delta) \right) \cdot \left(P_1 + \alpha \cdot (P_1 - P_2)^{\psi} \right) \right]$$

16. Sistema según la reivindicación 8 o 9, en el que dicho material compuesto de la estructura (4) es fibra de carbono y dicho defecto volumétrico es una bolsa de resina.

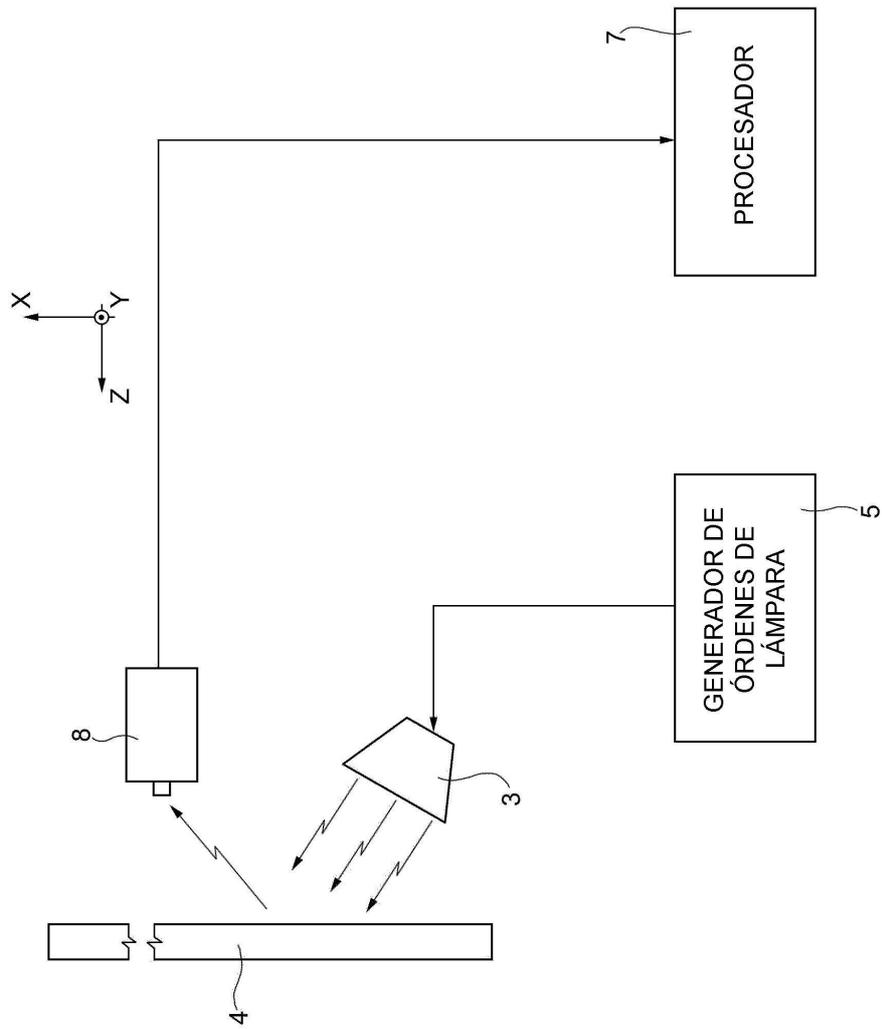


FIG. 1

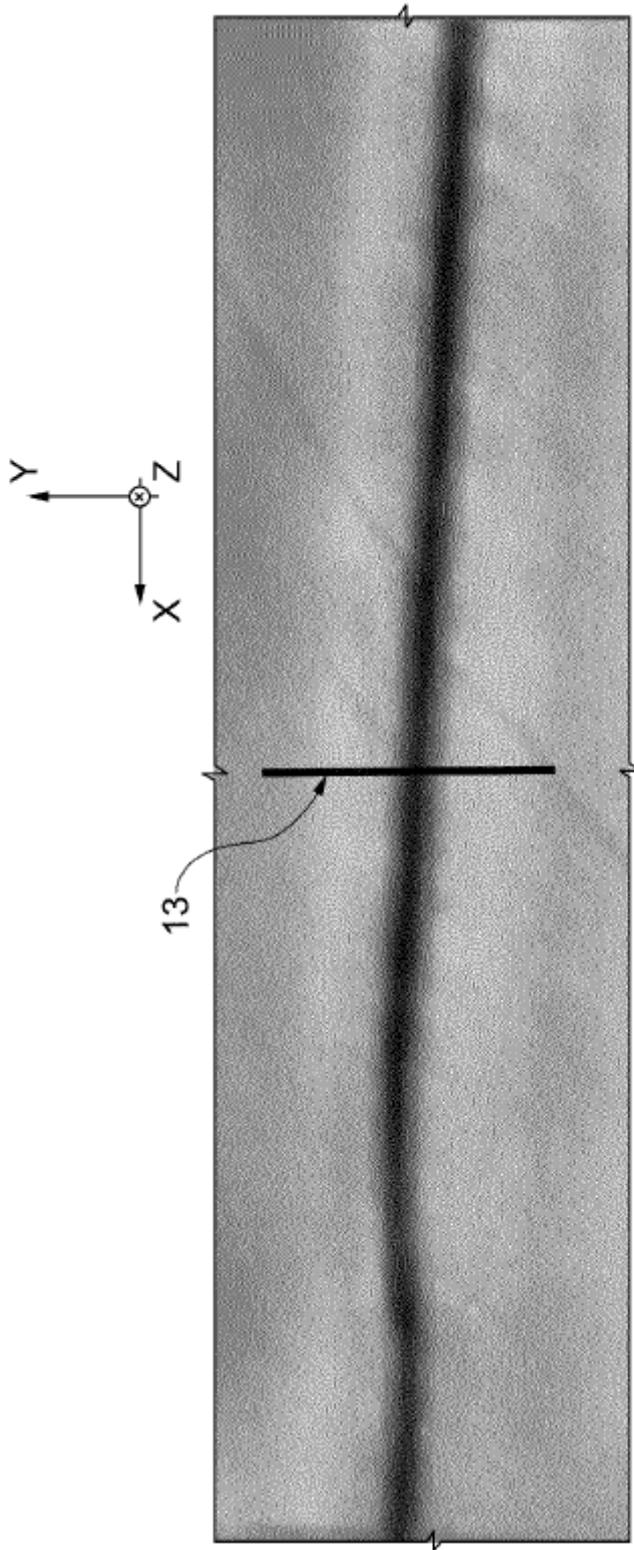


FIG. 2

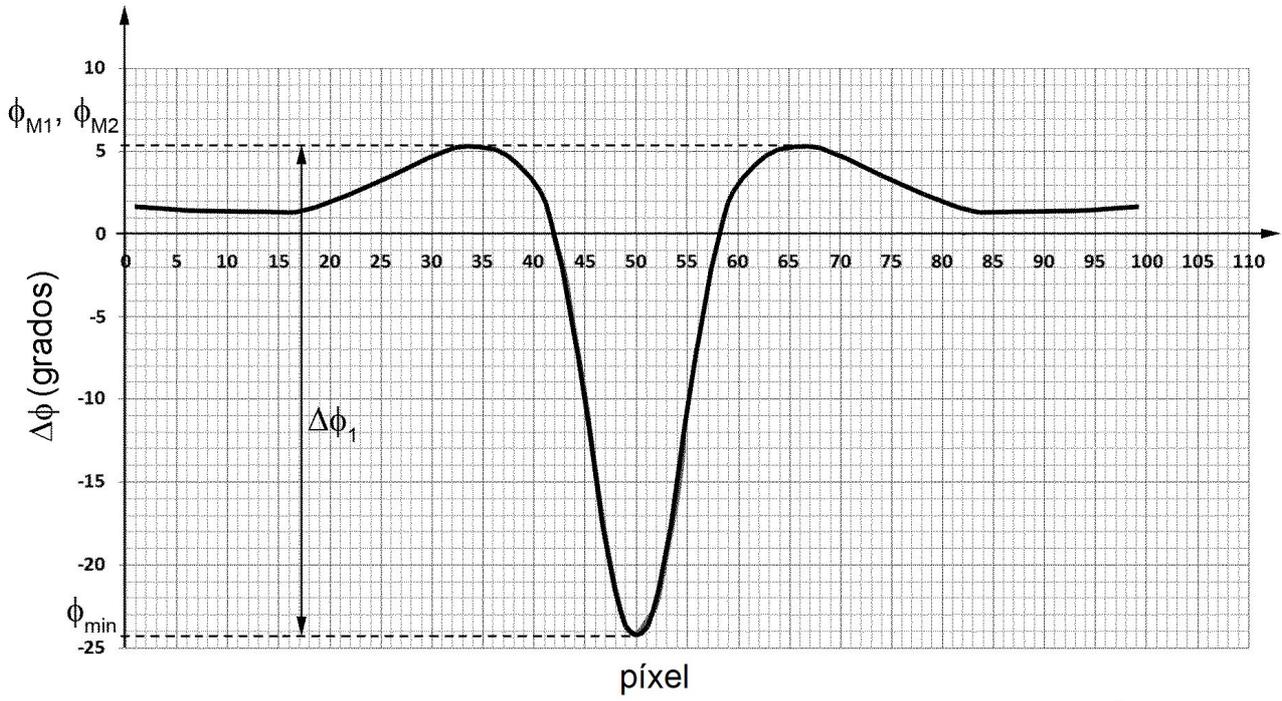


FIG. 3A

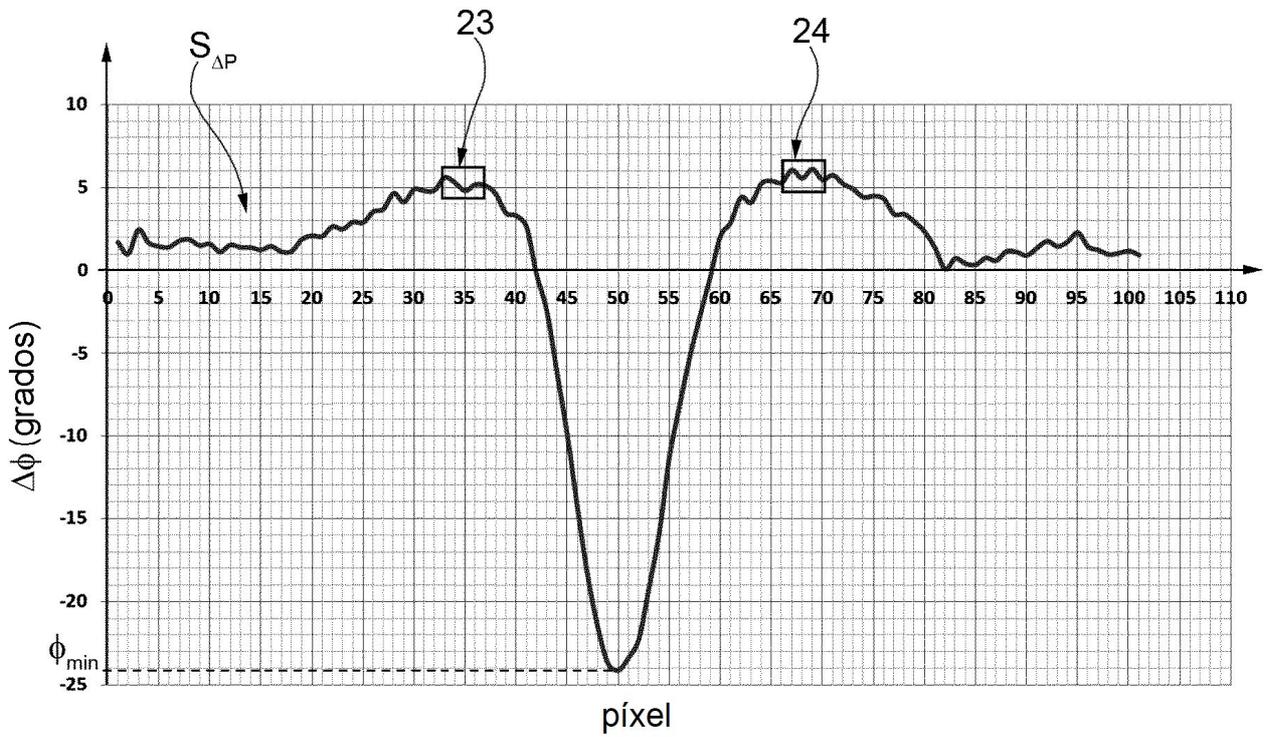


FIG. 3B

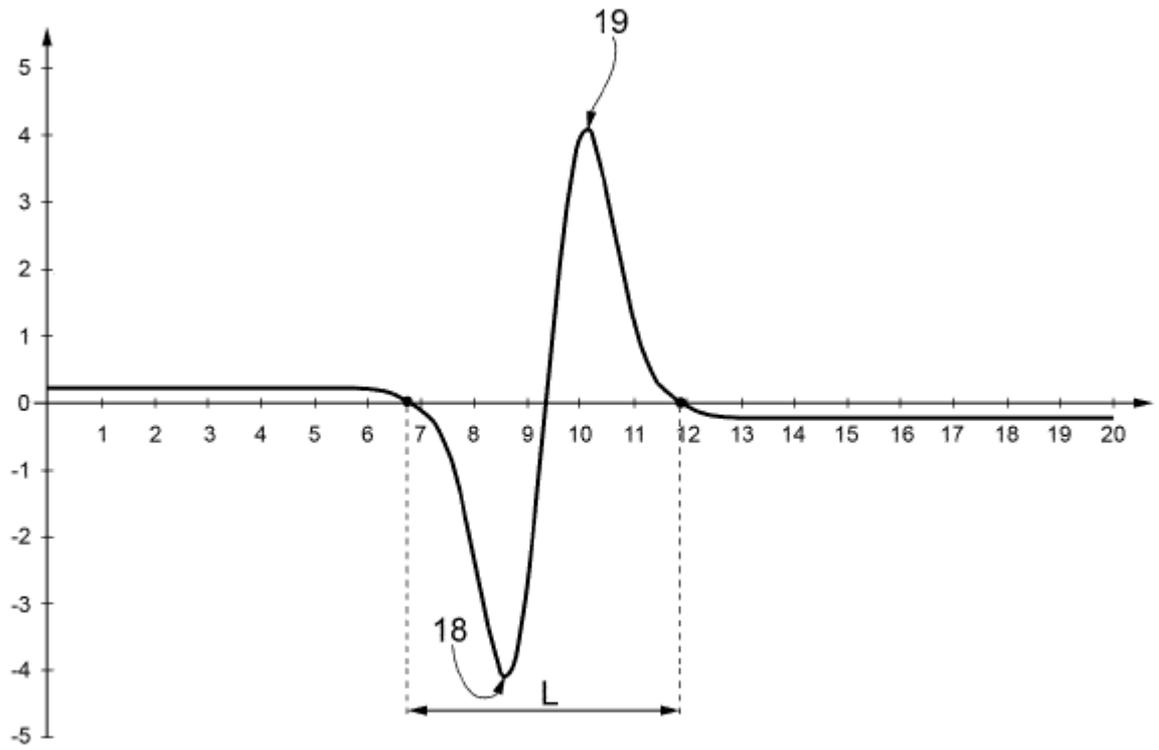


FIG. 4

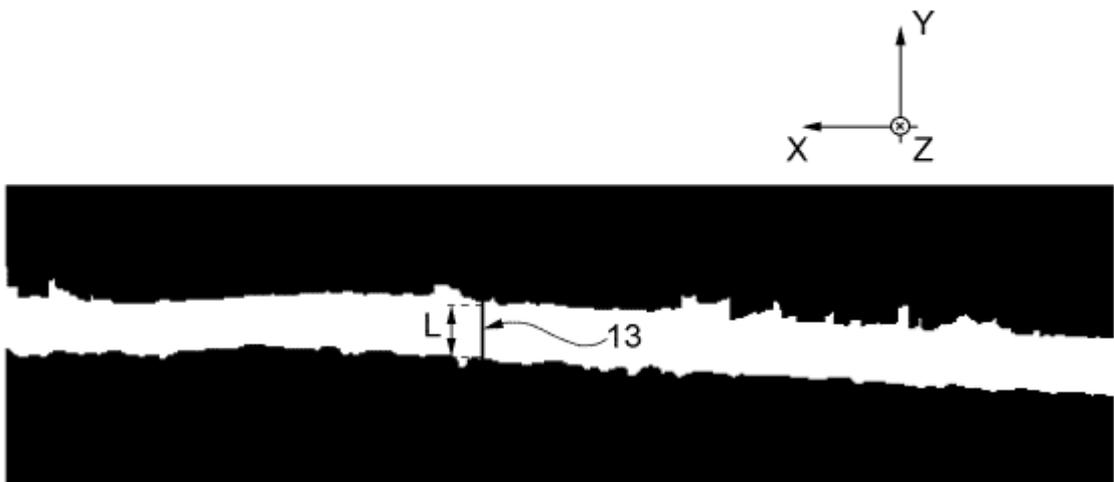


FIG. 5

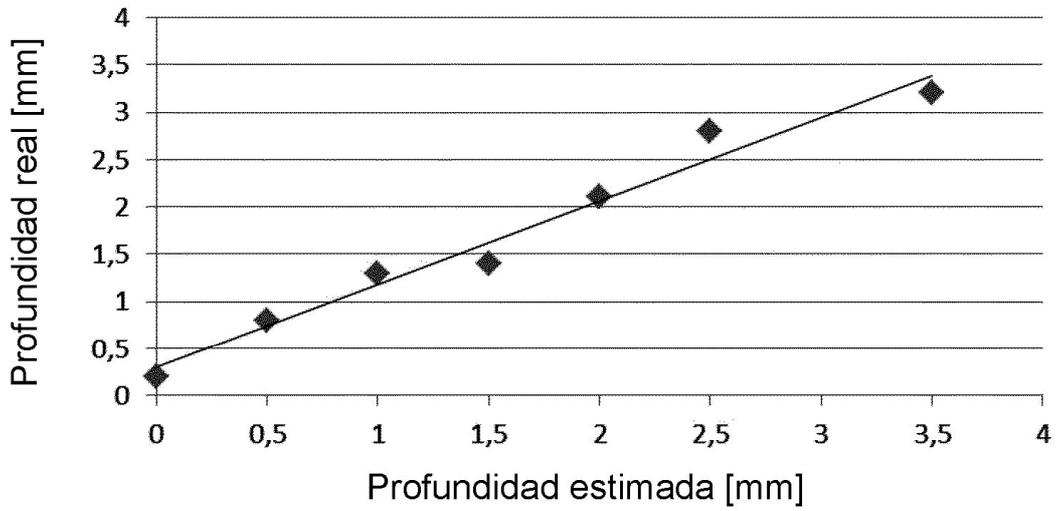


FIG. 6

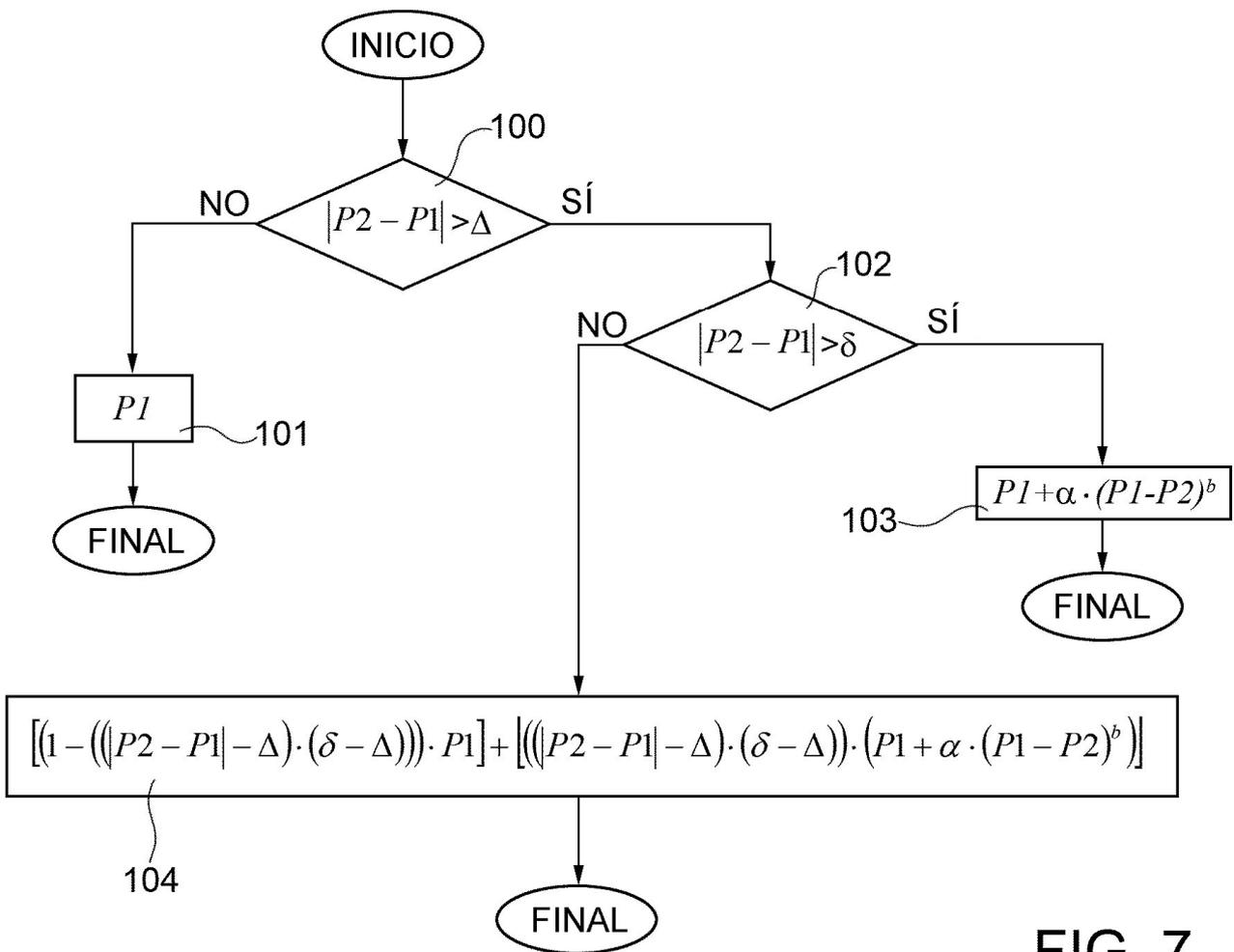


FIG. 7