

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 485 341**

51 Int. Cl.:

G01N 29/07 (2006.01)

G01N 29/48 (2006.01)

G01N 29/44 (2006.01)

G01N 29/22 (2006.01)

G01N 29/28 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.12.2011 E 11196272 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.05.2014 EP 2472254**

54 Título: **Método de inspección no destructiva por ultrasonidos, en particular para estructuras de material compuesto para aplicaciones aeronáuticas**

30 Prioridad:

30.12.2010 IT TO20101090

27.04.2011 IT TO20110368

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

13.08.2014

73 Titular/es:

ALENIA AERMACCHI S.P.A. (100.0%)

Via Ing. Paolo Foresio 1

21040 Venegono Superiore (VA), IT

72 Inventor/es:

CAVACCINI, GIOVANNI;

CILIBERTO, ANTONIO;

INCARNATO, CIRO;

MAIONE, GIACOMO y

SAGNELLA, GIOVANNI LUIGI

74 Agente/Representante:

TORO GORDILLO, Francisco Javier

ES 2 485 341 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 de inspección no destructiva por ultrasonidos, en particular para estructuras de material compuesto para aplicaciones aeronáuticas

5

La presente invención se refiere un método de control (o inspección) no destructivo, en particular para estructuras de materiales compuesto para la industria aeronáutica. Con más detalle, la presente invención se refiere a un método para la inspección, la detección y la clasificación de los defectos en el interior de estructuras comprendiendo, pero sin limitarse a, cavidades, deslaminaciones, separaciones, inclusiones y porosidad, e incluyendo la deformación de las capas de material (en particular bolsas y arrugas internas), usando una técnica de inspección no destructiva por ultrasonidos reflectante.

10

Tal como se conoce, el fin de la realización de ensayos no destructivos (NDT, *non-destructive testing*) es inspeccionar, calificar y evaluar la calidad de una estructura sin dar lugar a defectos o cualquier otro cambio en la estructura, en lo que concierne a los requisitos de diseño. Las metodologías de NDT van desde la simple inspección visual hasta técnicas más complejas, tal como una inspección basada en ultrasonidos.

15

Con el coste decreciente de los materiales para las fibras y resinas de uso más común, se aplican a gran escala materiales compuestos (en particular los de carbono / resina, constituidos por fibras de carbono impregnadas con resinas epoxídicas) para fabricar partes para medios de transporte, en especial en la industria aeroespacial. En esta área, su uso está vinculado fundamentalmente a la necesidad de reducir el peso de la nave con el fin de reducir el consumo de combustible y aumentar la carga útil; esto es sin perjudicar, o incluso mejorando, las características mecánicas de la nave. Otras características ventajosas conciernen a un buen aislamiento térmico, la eliminación de la corrosión y la simplificación (con la consecuente reducción de costes) de las programaciones de mantenimiento.

20

25

Las estructuras de carbono / resina más comunes pueden laminarse (capas preimpregnadas superpuestas) o ser del tipo "intercalado" (es decir, un material de bajo peso insertado entre dos laminados de carbono / resina); no obstante, se están usando cada vez más otras formas de fabricación (por ejemplo, usando fibras con técnicas de infusión de resina). Estas pueden tener defectos de fabricación, que se entienden como cualquier desviación con respecto a los requisitos de diseño. Estos defectos, si no se detectan y se eliminan, pueden deteriorar el rendimiento o la integridad física de las estructuras durante su vida en servicio. Determinados defectos no pueden repararse, caso en el que ha de descartarse la estructura fabricada.

30

35

Determinados defectos son superficiales o, en cualquier caso, detectables mediante una inspección visual. En su lugar, otros se encuentran en el interior de la estructura, por lo cual su detección y medición requieren unas metodologías instrumentales no destructivas más complejas, en general basadas en ultrasonidos. Los defectos internos más comunes en las estructuras laminadas son las deslaminaciones,

las inclusiones, la porosidad, las separaciones, las cavidades y la deformación de las capas preimpregnadas, que se conocen en general como arrugas internas cuando están orientadas en sentido perpendicular con respecto a la superficie. Excluyendo las arrugas, estos defectos son normalmente detectables, incluso si no siempre pueden clasificarse y medirse, por medio de las técnicas de ultrasonidos convencionales que se aplican durante las fases de control de calidad, o incluso durante el servicio, debido a defectos que se producen por daño accidental durante la vida en servicio de la estructura (por ejemplo, la deslaminación que se produce por un impacto).

Las inspecciones por ultrasonidos también se usan en otros campos diversos de la industria (naval, automovilística y energética).

En las inspecciones por ultrasonidos, se introducen ondas elásticas de vibración de alta frecuencia (mucho más allá del nivel auditivo) en el objeto que va a examinarse con el fin de revelar defectos internos, medir su profundidad o estimar las características mecánicas. Por lo general, las ondas se producen mediante sondas (por lo general, piezoeléctricas o piezocerámicas), pero también pueden generarse por otros mecanismos, por ejemplo por medio de excitación por láser de la superficie que va a inspeccionarse, que, en este punto, genera por sí misma las ondas elásticas. En particular, para el análisis de resinas de carbono, por lo general se usan ondas longitudinales con una frecuencia de entre 0,5 MHz y 15 MHz.

El haz de ultrasonidos generado, caracterizado por una ley de propagación en el tiempo y el espacio (que también da como resultado una forma geométrica específica) se transmite a la estructura que va a someterse a ensayo por medio de unos medios de acoplamiento oportunos (tal como agua o un gel, lo que deja el haz sustancialmente no perturbado). En general, la inspección por ultrasonidos de una estructura se lleva a cabo con la ayuda de un sistema de exploración (normalmente de dos ejes para las estructuras planas), que describe sustancialmente una malla, la cual se vuelve más estrecha a medida que el paso de exploración en cada dirección se vuelve más pequeño: un evento de inspección se realiza en cada nodo de la malla.

Una de las técnicas de ultrasonidos de uso más extendido se conoce como “eco de impulso” o reflexión. Esta técnica se basa en la detección de las reflexiones (ecos) que se generan cuando las ondas de ultrasonidos golpean las superficies de discontinuidad entre unos materiales que tienen diferentes impedancias acústicas. Estas superficies incluyen defectos en el interior de las estructuras sometidas a ensayo y la misma superficie que delimita la estructura con respecto al entorno circundante. Este método también se usa para localizar imperfecciones en general y para las mediciones de profundidad.

La señal de ultrasonidos recibida (señal de eco) se define por una amplitud basada en el tiempo, con unos picos que se corresponden con discontinuidades (por ejemplo un defecto interno) caracterizados, así como por la amplitud, por el tiempo de vuelo (TOF), a saber, el tiempo a partir del cual se recibe el

primer pico ("eco frontal"), que se corresponde con la superficie de entrada de la estructura que se está considerando, y el instante de la recepción del eco debido a la discontinuidad interna.

El tiempo de vuelo T se correlaciona con la trayectoria X seguida por la onda de ultrasonidos en el elemento sometido a ensayo (con $X = V_{us}T / 2$, siendo V_{us} la velocidad media de los ultrasonidos en el medio), y proporciona una medición indirecta de esta trayectoria.

Las ondas reflejadas se presentan visualmente por lo general en una forma gráfica en una pantalla usando la representación de la amplitud frente al tiempo, que aparece como una sucesión de picos, cada uno de los cuales se produce por una reflexión debido a una discontinuidad (en términos de impedancia acústica) en el material. La distancia entre dos picos es proporcional al tiempo empleado por los ultrasonidos para desplazarse el espacio entre las dos discontinuidades que los generaron. Además de la reflexión, se encuentran presentes en general fenómenos de absorción y de transmisión.

El dimensionamiento y la localización de defectos en general tiene lugar a través de un proceso de correlación entre las características del haz de ultrasonidos, las características físicas y geométricas del material, los parámetros de amplitud y de tiempo de vuelo que se han descrito previamente y las coordenadas de la trayectoria de exploración. Los resultados de la inspección pueden mostrarse de manera gráfica en diversas formas, siendo las más comunes aquellas que se conocen como exploración A (*A-scan*), exploración B (*B-scan*) y exploración C (*C-scan*).

La representación de exploración A es de particular relevancia, debido a que esta es la que contiene más información y pueden obtenerse otras representaciones a partir de la misma. La exploración A puede considerarse una representación en amplitud, en el dominio del tiempo, de una señal de eco. La señal de eco se recibe normalmente mediante un transductor que convierte la onda de sonido en una señal eléctrica, pero también puede reconstruirse mediante un proceso de interferometría en técnicas de láser. Esta señal eléctrica, oportunamente amplificada, puede mostrarse como un gráfico en un terminal de vídeo o muestrearse y procesarse por un ordenador.

En lo que concierne a las otras representaciones, la exploración B es un mapa de ultrasonidos de una sección del componente, en el que se representan las exploraciones A a lo largo de una línea de exploración (cada punto de la exploración A se representa mediante un color o tono de gris), mientras que la exploración C es un mapa en planta del componente, en el que el color o el tono de gris de cada punto representa la amplitud y / o el tiempo de vuelo de un pico de ultrasonidos que se refleja en ese punto.

Tal como ya se ha mencionado, las técnicas de inspección por ultrasonidos conocidas, a pesar de que son capaces de detectar la mayoría de defectos - tal como la porosidad, las deslaminaciones, etc. - no son capaces de proporcionar una caracterización precisa de un determinado tipo de defectos, o ni

siquiera son capaces de detectar los mismos. Esto tiene lugar, en particular, con las arrugas internas, con las cuales pueden asociarse las acumulaciones de resina, que se conocen como bolsas de resina. En algunos casos, las bolsas pueden cargarse con diferentes materiales (adhesivo, obturador, etc.). En lo sucesivo, por simplicidad de descripción, simplemente se hace referencia a bolsas.

5

El proceso de formación de las bolsas de resina es tal como sigue (otros tipos de bolsa se crean de una forma similar). Las arrugas pueden aparecer tanto en laminados planos como en áreas curvadas (tal como secciones que tienen forma de C, de T, de L, de I o de J, por ejemplo). Cuando las capas se deforman (en sentido ortogonal con respecto al plano de laminación) durante la fabricación, pueden aparecer espacios vacíos o unas condiciones de presión anómalas. Durante la fase de polimerización, la resina en la fase líquida puede cargar estos espacios, creando de ese modo unos canales de resina o, en su lugar "bolsas de resina" (en paralelo con respecto a la generatriz de la sección curvada en el caso de unas partes curvadas) que siguen el perfil de la primera capa afectada por la deformación.

10

El documento US 4.475.394 divulga un método de determinación de un eco de ultrasonidos y también un aparato que pone en práctica el método. Más particularmente, este se refiere a un método de determinación de un eco de ultrasonidos que está adaptado de manera específica para su uso cuando una pluralidad de imperfecciones que han de detectarse existen una adyacente a otra, y a un aparato que va a usarse para poner en práctica un método de este tipo.

15

El documento US 6.637.266 divulga instrumentalidades y metodologías para la inspección no destructiva, y en especial para la realización de ensayos y la evaluación de componentes de aeronaves. El objeto de la presente invención es la provisión de un método de inspección no destructiva carente de los problemas de la técnica conocida, y también capaz de detectar y de medir la profundidad y / o la anchura y / o la longitud de deformaciones de arruga internas.

20

25

De acuerdo con la presente invención, se proporciona por lo tanto un método de inspección no destructiva, tal como se define en la reivindicación 1.

Para una mejor comprensión de la presente invención, algunas realizaciones preferidas se describirán a continuación, puramente a modo de ejemplo no limitante y con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

30

- la figura 1 muestra una estructura, en particular una porción de una superficie de ala en carbono / resina de una aeronave que tiene un defecto, en particular una arruga interna con una bolsa;
- la figura 2 muestra las etapas de un método de inspección no destructiva de acuerdo con la presente invención, en particular un método para detectar y medir los defectos de la estructura en la figura 1;
- la figura 3 muestra de forma esquemática, de acuerdo con una representación de exploración A, una señal de sonido de eco indicativa de un posible defecto en la estructura analizada, con bajo ruido de

35

fondo;

- la figura 4 muestra de forma esquemática, de acuerdo con una representación de exploración A, una señal de sonido de eco indicativa de un posible defecto en la estructura analizada, con alto ruido de fondo;

5 - la figura 5 muestra las sub-etapas del método en la figura 2;

- la figura 6 muestra unas sub-etapas adicionales del método en la figura 2;

- la figura 7 muestra un espectrograma en el que el eco inicial es despreciable y en el que el pico relacionado con el eco posterior y el pico de un defecto se encuentran presentes;

10 - la figura 8A muestra de forma esquemática un sistema de exploración, que no es parte de la presente invención, adecuado para implementar el método de acuerdo con las etapas de la figura 2;

- la figura 8B muestra un detalle ampliado del sistema en la figura 8A; y

- la figura 9 muestra un cabezal de exploración del sistema de exploración en la figura 8A con mayor detalle.

15 El solicitante de la presente invención ha establecido que los defectos de arruga en estructuras de material compuesto, en particular las arrugas internas en estructuras de fibra de carbono y de resina, pueden aparecer durante la fabricación de una estructura, en asociación con la formación de bolsas. En particular, el solicitante de la presente invención ha establecido que durante la fabricación de estructuras de aeronaves con secciones en C, en T, en L, en I o en J, como por ejemplo en un estabilizador de cola,

20 estas arrugas se forman principalmente (pero no de manera exclusiva) en áreas curvadas. A modo de ejemplo, la figura 1 muestra una estructura 2, en particular una estructura de ala en un material compuesto, tal como carbono / resina, de una aeronave (que no se muestra como un todo). El solicitante de la presente invención ha establecido que las arrugas 4 (del tipo que se muestra de forma esquemática en la región ampliada en la figura 1 y asociado con bolsas de resina) se forman principalmente en las

25 regiones curvadas indicadas por el número de referencia 6. Por lo general, las arrugas implican la totalidad de las capas, desde las más profundas hasta la capa más superficial, que están cargadas con resina. Tal como puede observarse en la ampliación en la figura 1, una arruga 4 comprende sustancialmente una región interior 4a de la resina, con una profundidad (que se indica mediante la letra de referencia D) en general de entre aproximadamente 1 mm y unos pocos milímetros o más (el máximo

30 valor se correlaciona con el espesor de la parte en ese punto) y la amplitud (que se indica mediante la letra de referencia L), en una vista lateral, igual a unos pocos milímetros (por ejemplo, de entre aproximadamente 3 y 6 mm). La extensión a lo largo de la dirección que se identifica en la figura 1 por el eje Z puede variar de unos pocos milímetros a varios centímetros, hasta extenderse, en unas condiciones extremas, por la totalidad de la longitud de la estructura 2.

35 Con referencia a las figuras 2, 5 y 6, se describe un método para detectar defectos, incluyendo los defectos de arruga del tipo que se muestra en la figura 1, de acuerdo con una realización de la presente invención. Este método se basa en la adquisición de ondas de ultrasonidos reflejadas que se obtienen durante un proceso de exploración, con unas características específicas que se indican más adelante, a

partir de las superficies de interés. El sistema en la figura 8-13, que no es parte de la presente invención, representa un ejemplo de cómo puede llevarse a cabo esta exploración.

La figura 2 muestra, por medio de un diagrama de flujo, las sucesivas etapas del método de detección de defectos de acuerdo con una realización de la presente invención, con referencia explícita a la estructura 2 en la figura 1 para una mayor claridad descriptiva. Sin embargo, este método puede aplicarse a estructuras planas o curvadas genéricas en un material compuesto y para la detección de defectos en materiales compuestos en general.

En primer lugar, en la etapa 10, se lleva a cabo una inspección usando ultrasonidos, en particular los que se reflejan en sentido longitudinal, de tipo conocido, con el fin de adquirir unos primeros datos de identificación de posible defectos en la estructura 2. La inspección de acuerdo con la etapa 10 tiene lugar usando una sonda de tipo conocido, que está configurada para emitir ultrasonidos con una frecuencia en el intervalo de entre 0,5 MHz y 15 MHz, por ejemplo a una frecuencia de 3,5 MHz, y una preparación dada.

En el presente caso, preparación se entiende en general como el conjunto de parámetros de soporte físico y de soporte lógico relacionados con la inspección y la adquisición para (una o más puertas de adquisición, filtros opcionales, frecuencias de muestreo de convertidores A / D, parámetros de la señal a adquirir, ganancias, etc.). No obstante, para los fines de la descripción, suponiendo que la totalidad de los otros parámetros se han configurado de manera apropiada para los fines de diagnóstico de inspección de acuerdo con prácticas convencionales, el parámetro de referencia útil para el proceso es solo la ganancia que se usa por el sistema de emisor (que no ha de confundirse con la tensión de excitación de cualesquiera transductores), que se indica en el presente caso como Go. Este parámetro puede ser, no obstante, una función (en general de crecimiento lineal) del espesor del material. El cambio en la ganancia con el espesor es fácil de implementar, por ejemplo, mediante un procedimiento que se conoce como "corrección de distancia - amplitud", que se indica comúnmente como DAC. Por lo tanto, de manera más específica, Go indica la ganancia que se usa en el intervalo de espesores de interés para la detección de defectos. Puede suponerse que Go es tal como para obtener un valor de amplitud de pico del eco posterior BE en el intervalo de un 80-100 % en un área libre de defectos. La suposición de que la primera etapa de inspección (la etapa 10 en la figura 2) es capaz de detectar, incluso si no lo es de medir, los defectos de interés, es una de tipo formal, en el sentido de que se implica que la inspección de acuerdo con la presente invención se propone, en general, como un examen más detenido de una primera inspección de tipo conocido que ya se ha llevado a cabo (de acuerdo con la etapa 10 en la figura 2). Sin embargo, la inspección de acuerdo con la presente invención puede considerarse como un sustituto para la inspección de acuerdo con la etapa 10, la cual por lo tanto no es necesaria, sino opcional. La exploración de superficies planas y curvadas que se considera en el presente caso se lleva a cabo usando el sistema en la figura 8; no obstante, con la condición de que se respeten los requisitos que se especifican en lo sucesivo, puede usarse cualquier tipo de sistema, tanto

para la inspección en la etapa 10 de la figura 2 como para la inspección de acuerdo con la presente invención.

La elección de los valores de frecuencia para los ultrasonidos que van a usarse depende de diversos factores, en particular del tipo de estructura (dimensiones y material) que se desea analizar y del tipo de defecto que se desea detectar.

Por lo general, las frecuencias de 3 MHz a 10 MHz se usan para la inspección de estructuras de unos pocos milímetros a unas pocas decenas de milímetros, y para defectos con unas dimensiones mínimas no por debajo de 2-3 mm.

Los datos que se adquieren mediante la inspección de acuerdo con la etapa 10 pueden representarse indiferentemente de acuerdo con una o más representaciones comunes, tal como la exploración A, la exploración B y la exploración C, por ejemplo.

Estos datos se convierten en un formato digital y se almacenan para las etapas de análisis subsiguientes.

A continuación, el procesamiento continúa, en la etapa 14, con el examen de los datos que se adquieren por medio de la técnica de ultrasonidos. Esta etapa puede incluir el análisis de una representación de exploración C, que se evalúa visualmente por un operario cualificado.

A través de la evaluación, posiblemente combinada, de exploraciones A y exploraciones C, es posible tener una primera indicación con respecto a la posible presencia de un defecto (en particular, de la presencia de arrugas y / o bolsas para el caso específico que se describe).

En el caso en el que las etapas 10-14 que se han descrito proporcionan unas indicaciones definitivamente negativas con respecto a la presencia de un defecto en la estructura analizada (la salida NO a partir de la etapa 16), se realiza un retorno a la etapa 10 y el análisis de la estructura continúa sobre una porción que no se ha analizado aún (la sonda y el transductor se mueven hasta esta porción, en la etapa 17). Si este no fuera el caso (arruga sospechada 4 y la salida SÍ a partir de la etapa 16), el procesamiento continúa con una nueva inspección local (la etapa 20) del área de la estructura 2 (por ejemplo, una porción que se indica mediante el número de referencia 6 en la figura 1) en la que, sobre la base de los datos que se han adquirido previamente, se sospecha de la presencia de una arruga 4.

Con el fin de proceder con la etapa 20, han de establecerse determinados parámetros que, como un todo, pueden indicarse como parámetros de inspección preliminar. Con más detalle, se identifican los siguientes (posiblemente por medio de pruebas específicas sobre una muestra con unas características dimensionales, geométricas y materiales similares a las de la estructura que se está considerando):

- a) la duración de tiempo T_w (más adelante se proporcionan más detalles) de la forma de onda adquirida y los picos que forman la exploración A, y el instante relativo T_{RMAX} en el que un pico típico tiene un máximo, comenzando a partir de su instante inicial;
- 5 b) la amplitud del eco frontal FE, que se entiende como el intervalo $(A_{FE} - \Delta A_{FE}, A_{FE} + \Delta A_{FE})$, en el que ΔA_{FE} es la oscilación estadística de las amplitudes de interés alrededor de la amplitud A_{FE} , y puede suponerse que es $2,5 \sigma$ (en la que σ es la desviación estándar que se calcula sobre las amplitudes de una muestra de alrededor de un centenar de ecos frontales) o establecerse por otras técnicas estadísticas convencionales;
- 10 c) la amplitud del eco posterior BE, que se entiende como el intervalo $(A_{BE} - \Delta A_{BE}, A_{BE} + \Delta A_{BE})$, en el que ΔA_{BE} es la oscilación estadística de las amplitudes de interés alrededor de la amplitud A_{BE} . ΔA_{BE} puede establecerse de una forma similar a ΔA_{FE} y, por lo general, es aproximadamente igual a ΔA_{FE} ;
- d) la velocidad media V_{US} de los ultrasonidos en el material del cual está compuesta la estructura sometida a análisis; esta puede estimarse a partir de la literatura de referencia o con métodos estadísticos convencionales; por ejemplo, es posible estimar esta por medio de un mejor ajuste con
- 15 mínimo χ^2 de la ecuación $V_{US} = 2S / t_{pico}$, tomando una pluralidad de mediciones (variando, por ejemplo, la velocidad de los ultrasonidos de cada medición en el intervalo de 2700-3400 m / s, con saltos de 50 m / s), sobre una muestra de, por ejemplo, alrededor de un centenar de ondas relacionadas con un área de un espesor constante y conocido S de un componente de referencia que
- 20 tiene una composición y una estratificación similares a las de la estructura de interés, sin defecto interno alguno, y midiendo, para cada onda, el tiempo t_{pico} entre los máximos del eco frontal y el eco posterior;
- e) la amplitud de ultrasonidos máxima $A_{n,max}$ del ruido en el material del cual está compuesta la estructura sometida a análisis; esto puede determinarse mediante métodos estadísticos
- 25 convencionales, o suponerse que es $m + 3 \sigma$ (en la que m y σ son, de forma respectiva, el valor medio y la desviación estándar de las amplitudes de la parte de la onda entre el eco frontal y el eco posterior que se adquieren a lo largo de aproximadamente un centenar de puntos de un componente de referencia similar al del punto previo);
- f) la amplitud del ruido, que se entiende como el intervalo $(A_n - \Delta A_n, A_n + \Delta A_n)$, en el que ΔA_n es la
- 30 oscilación estadística de las amplitudes de interés alrededor de un valor A_n y puede establecerse de una forma similar a ΔA_{FE} sobre las amplitudes de las partes de onda que se han especificado previamente;
- g) la entidad de la oscilación estadística de los picos en el tiempo ΔT ; ΔT puede establecerse mediante métodos estadísticos convencionales o suponerse que es $2,5 \sigma$, en la que σ es la
- 35 desviación estándar que se calcula sobre los tiempos de vuelo de una muestra de, por ejemplo, alrededor de un centenar de ecos posteriores;
- h) el máximo espesor P_{max} de la estructura sometida a análisis (para unas partes de espesor o geometría variables, P_{max} es una función de las variables de exploración);
- i) la máxima profundidad $Pd_{max} \leq P_{max}$, a la que se espera (o hay interés en) detectar un defecto;

l) la mínima reducción en porcentaje α de la amplitud del eco posterior que se produce por la presencia del defecto; este parámetro, para el cual se proporcionan más adelante algunos valores típicos, depende del tipo de defecto.

- 5 La duración T_w puede estimarse por medio de la medición de la duración del FE (T_{FE}) o BE (T_{BE}) en un componente de referencia tal como se ha definido previamente, o en un área de la parte sometida a examen que se encuentra libre de defectos y similar, en espesor y composición, a la porción sometida a análisis (véase la figura 4). En ausencia de fenómenos de interferencia sobre los ecos frontales y posteriores, T_{FE} y T_{BE} del eco posterior son como promedio iguales a T_w con un margen de ΔT , tal como
10 se expresa mediante las siguientes fórmulas (1) y (2):

$$T_{FE} = T_{FF} - T_{FI} = T_w \pm \Delta T \quad (1)$$

$$T_{BE} = T_{BF} - T_{BI} = T_w \pm \Delta T \quad (2)$$

- 15 en las que T_{FF} y T_{FI} , y T_{BF} y T_{BI} son, de forma respectiva, los casos inicial y final del eco frontal y del eco posterior. El instante inicial y el instante final pueden estimarse, de forma respectiva, como el instante relacionado con el flanco de entrada del impulso, en el que la amplitud se vuelve igual a A_n (o aproximadamente 18 dB de la máxima amplitud), y el instante relacionado con el flanco de salida del
20 impulso, en el que la amplitud se vuelve igual a A_n (o, también en este caso, aproximadamente 18 dB de la máxima amplitud). T_{RMAX} puede estimarse de una forma completamente similar.

La exploración local de acuerdo con la etapa 20 de la figura 2 tiene lugar preferiblemente mediante el establecimiento de los siguientes parámetros de exploración y con el siguiente post-procesamiento:

- 25 a) inspección por medio de una técnica de inspección por ultrasonidos (preferiblemente con una sonda de banda ancha, por ejemplo 2-8 MHz) y adquisición de ondas de reflexión completas (por ejemplo representadas como una exploración A) con una frecuencia de muestreo igual a o más grande que 100 MHz (en el dominio del tiempo) y con por lo menos una digitalización de 6 bits o
30 muestreo de las amplitudes de onda.
- b) ganancia G_o tal como se ha definido previamente;
- c) puerta de adquisición C_{adq} con una anchura más grande que $2(P_{max} / V_{US})$ y con un instante de partida en el origen del pico del eco frontal FE (que se supone, por simplicidad, como coincidente con el origen del eje del tiempo e igual a 0 μs);
- 35 d) puerta para una primera representación de exploración C (que se indica en lo sucesivo en el presente documento como "exploración C 1") con el instante de partida en $T_{FF} + \Delta T$, instante final de por lo menos $3.(P_{max} / V_{US})$, mínimo nivel de adquisición de $A_{n_{max}} + \Delta A_n$ (valor de amplitud por debajo del cual no se realiza la adquisición) y un modo de adquisición de "máximo pico". Este modo indica que cada punto de la exploración C generada está relacionado con la máxima amplitud de la

exploración A en ese punto en el interior de la puerta establecida, con la condición de que esta amplitud sea más grande que el nivel establecido;

e) puerta para una segunda representación de exploración C (que se indica en lo sucesivo en el presente documento como "exploración C 2") para supervisar el eco posterior, con el inicio y el fin en $2.(P_{\max} / V_{US}) - \Delta T$ y $3.(P_{\max} / V_{US})$ respectivamente, mínimo nivel de adquisición de $A_{n \max} + \Delta A_n$ y con un modo de adquisición de "máximo pico" o de "primer pico". Este último modo indica que cada punto de la exploración C generada está relacionado con el primer pico (con una amplitud más grande que el nivel establecido) de la exploración A en ese punto, dentro de la amplitud de puerta establecida.

A continuación, el procesamiento continúa con una exploración de ultrasonidos local cerca del defecto supuesto (preferiblemente en una pluralidad de puntos en el área del defecto supuesto). Para cada dirección de exploración, es preferible usar un paso de exploración igual a o menor que 1 mm, y en cualquier caso no más grande que un tercio de la mínima dimensión, en la dirección de exploración, del defecto que se desea detectar.

A continuación, el procesamiento continúa, en la etapa 22 de la figura 2, con la creación de una base de datos para organizar los datos que se adquieren mediante la etapa 20 previa y, en particular, los datos que se adquieren de acuerdo con los ajustes de Cadq, de exploración C 1 y de exploración C 2 o, en su lugar, de manera más precisa, la forma de onda completa con Cadq para cada punto de exploración, el valor de tiempo de vuelo (TOF) y la amplitud del eco posterior para la exploración C 1, y el valor de tiempo de vuelo (TOF) y la amplitud del eco posterior para la exploración C 2.

A continuación, en la etapa 24, el procesamiento continúa con el examen de la información recopilada en la etapa 22. Esta etapa puede realizarse visualmente por un operario cualificado o de forma automática, por un ordenador.

En particular, se lleva a cabo un análisis de la representación de acuerdo con la exploración C 1 y la exploración C 2: en lo sucesivo, se supone que las características del tiempo de vuelo y la amplitud del eco posterior, incluso en lo evaluado en la exploración C 1 (esto tiene lugar cuando no hay defectos o cuando los picos de los defectos producen unas amplitudes más pequeñas en el eco posterior), se confirman a continuación en la exploración C 2.

De hecho, el solicitante de la presente invención ha establecido que los defectos (en particular las arrugas 4) asociados con bolsas profundas, en especial unas profundidades que superan $(T_w + \Delta T) V_{US}$, dan lugar a la reflexión de la señal de ultrasonidos incidente (consúltase el ejemplo en la figura 3, con el segundo pico D) que tiene un valor de tiempo de vuelo más grande que $T_w + \Delta T$ y una amplitud normalmente más grande que la del eco posterior BE; también hay una reducción en la amplitud de pico del eco posterior BE igual a por lo menos α (normalmente más grande que un 70 %).

Incluso en el caso en el que el segundo pico D no es visiblemente perceptible (debido a que este se encuentra por debajo del umbral de ruido, por ejemplo), todavía hay una reducción en la amplitud de pico de la señal de eco posterior BE igual a por lo menos α (normalmente más grande que un 20 %), asociada con su traslación a lo largo del eje del tiempo en más de $T_{BE} + \Delta T$.

5 Además, el solicitante de la presente invención también ha establecido que, en la suposición adicional de unos defectos no asociados con bolsas, o asociados con bolsas que son indetectables debido a que estas son, por ejemplo, muy superficiales (de manera indicativa, a una profundidad de menos de $(T_w + \Delta T)V_{US}$), todavía hay una reducción en la amplitud de pico de la señal de eco posterior BE con un
10 valor en porcentaje de α (normalmente más grande que un 20 %).

Debería observarse que las consideraciones que se han indicado previamente son aplicables tanto a las representaciones de exploración C individuales (en las que las amplitudes y los tiempos de vuelo se representan con dos imágenes diferentes) como a las representaciones combinadas (amplitudes y
15 tiempos de vuelo fusionados en una única imagen). En general, la indicación de una bolsa 4 asociada con una arruga 4 aparece como una indicación lineal (es decir, con una relación de anchura / longitud < 1) y con un tiempo de vuelo T_g casi constante dentro de la oscilación estadística. La siguiente relación (3) es aplicable para el tiempo de vuelo T_g de una arruga:

$$20 \quad (T_w \pm \Delta T) V_{US} < T_g < 2 (P_{max} / V_{US}) - \Delta T \quad (3)$$

El valor de amplitud A_g del pico de ultrasonidos asociado con la bolsa de resina, dentro de la oscilación estadística, viene dado por la relación (4):

$$25 \quad A_g = \alpha \cdot (A_{BE} - \Delta A_n) \quad (4)$$

Si las evaluaciones de acuerdo con la etapa 24, de acuerdo con lo que se ha descrito previamente, confirman la probable presencia de un defecto (la etapa 26), a continuación (la salida SÍ a partir de la etapa 26) el procesamiento pasa a la etapa 28. A la inversa, si la presencia de un defecto se excluye en
30 función de las evaluaciones de acuerdo con la etapa 24 (la salida NO a partir de la etapa 26), el procesamiento pasa a la etapa 17 y, por lo tanto, a la exploración de una nueva porción de la estructura 2.

La etapa 28 se basa en los mismos criterios de evaluación de la etapa 24. La etapa 24 establece si hay
35 indicaciones detectables de un defecto (en particular, una arruga 4), es decir, si hay indicaciones longitudinales formadas por: (i) unos picos en tiempo de vuelo antes de lo esperado con respecto al eco posterior (que se detectan a través de un análisis de exploración C 1) o (ii) unos picos de amplitud reducida y retardados con respecto al eco posterior en áreas libres de defectos (que se detectan a través de un análisis de exploración C 1 y de exploración C 2); en este último caso, no se revelan picos

relacionados con arrugas o las bolsas asociadas. La etapa 28 identifica cuál de los dos casos (i) y (ii) que se describen en el presente caso es aplicable. Por último, si ninguno de los dos casos (i) y (ii) se establece, la etapa de decisión 26 precedente genera un NO. A la inversa, la entrada a la etapa 28 quiere decir que por lo menos uno de los dos casos (i) y (ii) se ha establecido.

5 Si, a partir del análisis de acuerdo con la etapa 28, se determina que solo se ha presentado el caso (ii), a continuación la etapa de decisión 30 genera un NO, lo que conduce a la ejecución de la etapa 34.

10 A la inversa, si, a partir del análisis de acuerdo con la etapa 28, se determina que solo se ha presentado el caso (i), a continuación la etapa de decisión 30 genera un SÍ y el procesamiento pasa a la etapa 32.

Con mayor detalle, cuando se entra en la etapa de decisión 30, la presencia de un defecto 4 ya se ha confirmado mediante evaluaciones de amplitud sobre el eco posterior y / o por la presencia de un pico en el tiempo de vuelo asociado con el defecto. En la etapa 30, se evalúa si la confirmación se deriva solo de la presencia de un pico en el tiempo de vuelo asociado con el defecto, que, tal como se expone, genera la salida NO, con la entrada a la etapa 34. Esta etapa comprende sub-etapas de un procedimiento que se describe con mayor detalle más adelante con referencia al diagrama de flujo en la figura 5.

Si, en la etapa 30 la confirmación no proviene exclusivamente de la presencia de un pico en el tiempo de vuelo asociado con el defecto, sino también (o solo) de las evaluaciones de amplitud sobre el eco posterior, se genera la salida SÍ y se entra en la etapa 32. En esta etapa 32, a través del análisis de exploración C 1 y de exploración C 2, se evalúa si la amplitud del eco posterior BE es despreciable con respecto al caso libre de defectos. En el caso en el que la variación en el eco posterior BE es significativa (la salida NO a partir de la etapa 32), el procesamiento pasa a la etapa 38, que comprende etapas de un procedimiento que se describe con mayor detalle más adelante con referencia al diagrama de flujo en la figura 6. A la inversa (la salida SÍ a partir de la etapa 32), se hace un cambio a la preparación en términos de ganancia y el área se inspecciona de nuevo (la etapa 36). El principio básico que sustenta la etapa 36 es que, si las amplitudes tanto del defecto como del eco posterior son despreciables (por lo cual no hay datos útiles para la caracterización y medición de defectos), esto podría ser debido a una ganancia insuficiente (en esta etapa igual a G_0); por lo tanto es necesario incrementar esta y repetir la exploración (la etapa 40). No obstante, el solicitante de la presente invención ha establecido que, con la suposición ya indicada de que la G_0 se ha elegido de forma oportuna en función de prácticas convencionales, un incremento de más de 12 dB normalmente no da como resultado mejora significativa alguna, principalmente debido a la excesiva amplitud que podría asumir el ruido. El valor límite de 12 dB solo es indicativo, debido a que este depende de muchos factores (incluyendo el ruido de la instrumentación y del cableado, el rendimiento de las sondas, perturbaciones ambientales y el material que se está considerando). En cualquier caso, antes de pasar a la etapa 40, debería comprobarse que el valor límite no se ha superado (la etapa de decisión 36): en el caso de la salida SÍ, o bien es posible un examen adicional (incluyendo volver a explorar el área en el caso en el que se encuentren unas

condiciones que pudieran haber perturbado la exploración, tal como contaminaciones superficiales o irregularidades geométricas-dimensionales) o bien el defecto se encuentra por debajo del límite de susceptibilidad de medición.

- 5 El límite de susceptibilidad de medición debería comprobarse por medio de un proceso experimental (calibración experimental), sobre la base de un número estadísticamente suficiente de muestras representativas de las partes que van a inspeccionarse y que contienen defectos reales, simulados o inducidos de manera artificial similares a los de interés. La representatividad de las muestras ha de garantizarse en términos del material, el tipo de estratificación, los espesores y las geometrías.

10 Los espesores y los parámetros geométricos (radios, ángulos y curvaturas) han de discurrir desde el mínimo hasta el máximo valor para las partes de interés. Los defectos han de tener determinadas características con respecto a las dimensiones (por lo menos mínimo y máximo espesor a lo largo de la dirección de propagación de los ultrasonidos, la anchura máxima y mínima en la dirección de exploración
15 relacionada y mínima longitud en la dirección de exploración correspondiente), la posición (mínima y máxima profundidad con respecto a la superficie de entrada de ultrasonidos, la posición de arco cuando se trata con una parte con forma de T o similar, etc.) y la forma (cuadrada, parabólica, etc.). El proceso de medición se calibra de acuerdo con la totalidad de las configuraciones representadas por las muestras, las dimensiones de los defectos de las cuales también representan los límites documentados
20 de susceptibilidad de medición.

En el diagrama de flujo en la figura 2, la inspección de una nueva porción de la estructura que se está considerando (la etapa 17) se indica como la siguiente acción en cualquier caso.

- 25 Volviendo a la etapa 36, se calcula el valor de ganancia de corriente. En particular, se comprueba si la ganancia de corriente G_c supera un determinado umbral, por ejemplo, igual a $G_0 + 12$ dB. Dentro de los límites y las consideraciones que se han indicado previamente, una ganancia de corriente G_c por encima del umbral establecido (por ejemplo $G_c > G_0 + 12$ dB) se considera inaceptable y la exploración del área sometida a examen se interrumpe (la salida SÍ a partir de la etapa 36). En este caso, la exploración de la
30 estructura sometida a examen puede proceder con una nueva porción de la estructura (paso a la etapa 17). A la inversa, si la ganancia de corriente G_c no ha alcanzado un valor más allá del umbral, el procesamiento pasa (la salida NO a partir de la etapa 36) a la etapa 40.

En la etapa 40, la ganancia de corriente G_c se incrementa en un valor previamente definido, por ejemplo
35 6 dB, y el procesamiento continúa con una nueva inspección (la etapa 20) de la misma área ya analizada y para la cual no se ha conseguido un resultado que se considere aceptable.

El procesamiento continúa consecuentemente en la etapa 22 para adquirir nuevos datos a analizar y el procesamiento continúa de nuevo con las etapas que ya se han descrito.

Antes de pasar a la descripción del procedimiento de acuerdo con la etapa 34 de la figura 2, de manera preliminar, debería explicarse que, considerando una sección transversal dada de la parte, que puede expresarse como un número de capas (u hojas) comenzando a partir de la superficie de entrada de la señal de ultrasonidos, las deformaciones de arruga en general conciernen solo a un determinado número de capas. En lo sucesivo, la variable que indica la capa se indicará mediante el símbolo ζ . La distribución y la entidad de estas deformaciones dependen del material y el proceso de fabricación. En el caso de una arruga 4 del tipo en la figura 1, el solicitante de la presente invención ha establecido que, en una capa ζ dada comenzando a partir de la primera capa situada en la superficie de entrada de la señal de ultrasonidos, la relación de anchura / profundidad de la arruga 4 (relación $\rho = L_w / D_w$ con referencia a la figura 1, en la que L_w es la anchura L de la arruga en la dirección de exploración relacionada y D_w es la profundidad D de la arruga a lo largo de la dirección de propagación de los ultrasonidos) es una función de la relación de anchura / profundidad de la bolsa, tal como se expresa mediante la relación (5):

$$\rho_{\zeta} \equiv \frac{L_{w\zeta}}{P_{w\zeta}} = R \left(\frac{L_R}{P_R}, \zeta \right) = \frac{R_L(L_R, \zeta)}{R_P(P_R, \zeta)} \quad (5)$$

en la que: $L_{w\zeta}$ y $P_{w\zeta}$ son, de forma respectiva, la anchura y la profundidad de la arruga en la capa ζ , L_R y P_R son, de forma respectiva, la anchura y la profundidad de la bolsa, y R , R_L y R_P son funciones de L_R , P_R y ζ .

El método de medición que se propone por el solicitante de la presente invención es independiente de los detalles de la relación funcional (5). El solicitante de la presente invención ha verificado, no obstante, algunas de estas relaciones funcionales, tal como se detalla en lo sucesivo. En particular, una situación común es aquella en la que la deformación de la primera hoja, o capa - $\zeta = 1$ - de material en carbono / resina golpeada por el haz de ultrasonidos y definida por L_{w1} y P_{w1} con respecto a la superficie de entrada de ultrasonidos (supuesta en la dirección de la bolsa), sigue fielmente la deformación de la bolsa (definida por L_R y P_R) o, en su lugar:

$$\rho_1 = \frac{L_{w1}}{P_{w1}} = \frac{L_R}{P_R} \quad (6)$$

Esta arruga, para las deformaciones dirigidas hacia dentro, también es la más grave (p más pequeña). Las relaciones funcionales R , R_L y R_P pueden estimarse en la fase de calibración experimental del proceso y, si es necesario, a partir de un análisis destructivo o visual de arrugas en casos reales o con arrugas inducidas de manera artificial. No obstante, se ha verificado que, en el caso de una arruga que se origina a partir de la superficie de entrada de ultrasonidos, la gravedad de la arruga disminuye a medida que el espesor aumenta (es decir, p aumenta como una función de ζ). Más en general, el

solicitante de la presente invención también ha establecido que, indicando la relación de L_R / P_R de la arruga más grave (arruga principal) que se detecta en una sección dada del material como ρ_{sev} , las deformaciones delante y detrás (en espesor, que se entiende como la dirección de propagación de las ondas de ultrasonidos) se vuelven de manera gradual menos graves, es decir, la ρ relacionada aumenta.

- 5 Una deformación se considera menos grave en el presente caso con respecto a la principal si, aproximadamente, $\rho > 4,5 \rho_{sev}$. Sobre esta base, indicando el número de capas (comenzando a partir de la primera con la arruga más grave) más allá del cual las arrugas pierden gravedad como n_ζ , el solicitante de la presente invención ha establecido que es aplicable la siguiente fórmula de aproximación (6a):

$$\rho_\zeta = \rho_1 e^{\omega \left(\frac{m}{m+1-\zeta} - 1 \right)} \quad (6a)$$

con $\omega \cong (4,6m - 20) / \sqrt{n_\zeta^3}$

- 15 en la que m es el número total de capas de la porción de estructura sometida a análisis. El solicitante de la presente invención ha establecido que la fórmula (6a), que puede refinarse mediante el proceso de calibración experimental, describe de manera apropiada el tipo de arrugas que se considera hasta un número de capas $n_\zeta \approx 0,5 m$ que representa una de las situaciones más frecuentes. Para unos valores más grandes, esta se vuelve de manera progresiva una aproximación peor a medida que crece n_ζ . La fórmula (6a) también es aplicable en el caso en el que no hay bolsas, para el cual L_w / P_w ya no puede seguir expresándose en términos de L_R / P_R , pero todavía es dependiente de ζ .

Una situación más genérica que la que se da con respecto a la fórmula (6a) es aquella en la que la arruga principal se encuentra al nivel de una capa $\zeta = n > 1$. En este caso, el solicitante de la presente invención ha establecido que es aplicable la siguiente fórmula (6b):

$$\rho_\zeta = [(m + 1 - n) (n - 1) / (m + 1 - \zeta) (\zeta - 1)] \rho_n e^{\Omega |n - \zeta|} \quad (6b)$$

- 25 en la que Ω es un parámetro que puede obtenerse a través de calibración experimental. La fórmula (6b) puede refinarse por medio del proceso de calibración. Considerando el espesor de la porción sometida a análisis (que se entiende en la dirección de propagación de las ondas de ultrasonidos), Ω depende de m y es una función decreciente del número de capas por encima ($n_u < n$) y por debajo ($n_1 > n$) de la capa con la deformación más grave. En cualquier caso, la deformación se considera grave para estas capas (es decir, aproximadamente $\rho \leq 4,5 \rho_{sev}$). El solicitante de la presente invención ha establecido que, para $m < 80$, la dependencia de Ω con m y n_u (con $n_1 \approx n_u$) viene dada aproximadamente por la fórmula (6c):

$$\Omega = (0,008 m + 2,7) \cdot e^{-(0,004 m + 0,65)n_u} \quad (6c)$$

En las fórmulas (6a) y (6b), se supone que las arrugas desaparecen de manera progresiva (ρ tiende a

infinito) en los extremos de la parte (las superficies de entrada y posterior para los ultrasonidos). Otro caso encontrado por el solicitante de la presente invención es aquel en el que un determinado número de capas tienen una deformación constante ($\rho = \text{constante}$) que a continuación desaparece en las capas inmediatamente suprayacentes y subyacentes. El último caso encontrado por el solicitante de la presente invención se refiere a la situación en la que las arrugas (con o sin bolsa), comenzando a partir de la principal en una capa n , disminuyen de manera progresiva en cuanto a la gravedad (ρ aumenta), pero sin volverse despreciables, hasta las superficies de la parte. En el caso en el que la deformación comienza en una capa n y solo se propaga al interior de las capas subyacentes, el solicitante de la presente invención ha establecido que la siguiente fórmula (6d) es aproximadamente aplicable:

$$\rho_{\zeta} = [A (m + 1 - n) (n - 1) / n \zeta] (m - s)] \rho_n e^{B |n - \zeta| / |n - s|} \quad (6d)$$

en la que A y B (con $B \approx 1$) son unos parámetros que pueden obtenerse mediante calibración experimental. También en este caso, la fórmula (6d) puede refinarse por medio del proceso de calibración. Una fórmula similar es aplicable para una deformación que se propaga al interior de las capas suprayacentes.

El procedimiento de acuerdo con la etapa 34 de la figura 2, que habilita estimar la anchura y la profundidad de la arruga en las condiciones que se han definido previamente, se describirá a continuación, con referencia a la figura 5. En lo sucesivo, para simplificar la descripción del procedimiento, se omitirá la dependencia con ζ , suponiendo que los parámetros de arruga se determinan para la arruga principal y se extienden a las otras capas por medio de la fórmula (5). Con referencia a las notaciones que se usan en la fórmula (5), L_w y P_w indican, de forma respectiva, la anchura $L_{w\zeta}$ y la profundidad $P_{w\zeta}$ de la arruga principal en la capa ζ .

El procedimiento en la figura 5 comienza con la etapa 50. Una nueva inspección por ultrasonidos se lleva a cabo sobre la porción de estructura que incluye la arruga sospechada 4, los resultados de la cual se muestran por medio de una representación de exploración C (a la que se hace referencia en lo sucesivo en el presente documento como exploración C 3 por simplicidad). Para los fines de la representación de exploración C 3, los parámetros que han de considerarse son: una anchura de puerta igual a $1,5T_{BE}$ en la que T_{BE} es, tal como se expone, la duración de tiempo del pico de la señal relacionada con el eco posterior BE; un instante de partida igual a $T_{BI} - \Delta T$; y un nivel de amplitud igual a $A_{n_max} + \Delta A$. El modo de adquisición es, preferiblemente, del tipo de pico máximo. La exploración C 3 puede obtenerse o bien durante la misma exploración en la etapa 20 que ya se ha descrito o bien con una nueva exploración.

La etapa 52 subsiguiente indica encontrar la indicación de la bolsa en la exploración C 3. En particular, la sección S_R relacionada con la bolsa que va a medirse (a lo largo de la dimensión de la anchura) se identifica en la etapa 52 en función de la representación de exploración C 3.

Después de esta identificación, el procesamiento pasa a la etapa 54. Esta etapa concierne a la medición de la anchura de S_R , que se indica en el presente caso como L_a , por medio de valores de amplitud. La secuencia de las amplitudes de S_R sobre la base del eje de exploración relacionado forma una curva que puede aproximarse por medio de procedimientos de mejor ajuste convencionales. En particular, el solicitante de la presente invención ha establecido que, para estructuras con una forma de T o, en cualquier caso, con áreas curvadas y para las arrugas que se originan en las curvas, la secuencia de las amplitudes de ultrasonidos de S_R a lo largo de la anchura puede aproximarse con una función gaussiana para los fines de la medición en cuestión. Está $G_a(k)$, con $k = 1, \dots, q$ como los valores que se obtienen a partir de la función de mejor ajuste (gaussiana, por ejemplo) y q como el número de puntos de exploración (con un paso de exploración s , por ejemplo, igual a aproximadamente 1 mm) que cubren por completo S_R , así como $\max[G_a(k)]$, el máximo de $G_a(k)$. L_a se estima usando la fórmula (7):

$$L_a = \varphi (|k_2 - k_1| \cdot s) \quad (7)$$

en la que φ es una función que puede definirse en función de una función de mejor ajuste. El solicitante de la presente invención ha establecido que esta es normalmente una función lineal, que puede aproximarse con la misma función. En cualquier caso, esta puede estimarse por medios experimentales en la fase de calibración; k_2 y k_1 son los índices de $G_a(k)$ tales que: $k_1 < \text{índice de } \max[G_a(k)] < k_2$; $G_a(k_1)$ y $G_a(k_2)$ son los valores más cercanos (aproximación por defecto) a $h_1 \cdot \max[G_a(k)]$. Por lo general, el factor h_1 es igual a 0,126 (18 dB) y, si es necesario, puede estimarse de manera más precisa en la fase de calibración.

A continuación, el control pasa a la etapa 56, que comprueba las mediciones de anchura y de profundidad de la arruga, determinando si el máximo valor de tiempo de vuelo detectado (que se indica como $T_M(S_R)$) relacionado con la bolsa de sección S_R es más grande que un valor umbral, en particular el de $2 T_g$.

Si $T_M(S_R)$ es más grande que dos veces la duración de tiempo T_g de los picos (que se calculan con la representación de exploración A), entonces el pico de la bolsa está separado con claridad del eco frontal y el procesamiento pasa a las etapas 58-65 a través de la salida SÍ a partir de la etapa 56.

No cumpliendo esto (la salida NO a partir de la etapa 56), el control pasa a una etapa de decisión 66 adicional: si $T_M(S_r)$ es más grande que T_g , el tiempo de vuelo asociado con la bolsa todavía puede identificarse y el procesamiento pasa a las etapas 68-70; en su lugar, si $T_M(S_r) \leq T_g$, el proceso termina, debido a que la reflexión relacionada con la bolsa no puede separarse de la relacionada con el eco frontal.

Con referencia a las etapas 58-64, a saber, en el caso en el que la reflexión de la bolsa está separada por completo del eco frontal, en primer lugar se calcula la profundidad P_w de la arruga (la etapa 58),

usando $T_M(S_R)$ y la velocidad media V_{US} de los ultrasonidos, de acuerdo con la fórmula (8):

$$P_w = [T_M(S_R) + \tau_1] \cdot \frac{V_{US}}{2} \quad (8)$$

5 Por lo general, el término algebraico τ_1 tiene un valor de cero; sin embargo, durante la fase de calibración, el término τ_1 puede ser distinto de cero y es útil para la transformación de los tiempos de vuelo en profundidad.

10 A continuación, se realiza el paso a las etapas 60-65, que conciernen a la medición de la anchura (que se indica en el presente caso como L_t) de S_R por medio de valores de tiempo de vuelo y el cálculo subsiguiente de la anchura de la arruga.

En la etapa 60, se comprueba si el valor de α (que indica el factor de reducción en porcentaje del eco posterior debido al defecto) es más de un 50 %.

15 Si $\alpha \leq 0,5$ (la salida NO a partir de la etapa 60), L_t puede estimarse (la etapa 62) con la medición del segmento en la exploración C 3 (en tiempo de vuelo) que delinea la anchura de S_R ; a continuación se realiza el paso a la etapa 65 para la evaluación de L_w .

20 Si $\alpha > 0,5$ (la salida SÍ a partir de la etapa 60), L_t puede estimarse (la etapa 64) por medio de un procedimiento similar al que se emplea para las amplitudes en la etapa 54. En este caso, la secuencia de los tiempos de vuelo de S_R sobre la base del eje de exploración relativa forman una curva que puede aproximarse por medio de procedimientos de mejor ajuste convencionales. Para los tiempos de vuelo, el solicitante de la presente invención también ha establecido que, para estructuras con una forma de T o, en cualquier caso, con áreas curvadas y para las arrugas que se originan en las curvas, la secuencia de los tiempos de vuelo de S_R a lo largo de la anchura puede aproximarse con una función gaussiana para los fines de la medición en cuestión. Está $G_t(j)$, con $j = 1, \dots, q$ como los valores que se obtienen a partir de la función de mejor ajuste (gaussiana, por ejemplo) y q como el número de puntos de exploración (con un paso de exploración s , por ejemplo, igual a aproximadamente 1 mm) que cubren por completo S_R , así como $\max[G_t(j)]$, el máximo de $G_t(j)$. L_t se estima usando la fórmula (9):

$$L_t = \psi(|j_2 - j_1| \cdot s) \quad (9)$$

35 en la que ψ es una función que puede definirse en función de una función de mejor ajuste. El solicitante de la presente invención ha establecido que esta es normalmente una función lineal, que puede aproximarse con la misma función. En cualquier caso, esta puede estimarse por medios experimentales en la fase de calibración. Los índices j_2 y j_1 son los índices de $G_t(j)$ de tal modo que $j_1 < \text{índice de } \max[G_t(j)] < j_2$, y $G_t(j_1)$ y $G_t(j_2)$ son los valores más cercanos (aproximación por defecto) a $h_2 \cdot \max$

[Gt(j)]. Por lo general, el factor h_2 es igual a 0,126 (18 dB) y, si es necesario, puede estimarse de manera más precisa en la fase de calibración. Esta etapa también conduce a la etapa 65.

La etapa 65 sustancialmente consiste en evaluar la anchura de la arruga usando la fórmula (10):

5

$$L_w = \frac{L_d + L_t}{2} \quad (10)$$

El proceso finaliza tras la compleción de la etapa 65.

10 Tal como se ha anticipado, las etapas 68-70 (la salida SÍ a partir de la etapa 66) están dedicadas a evaluar la anchura (la etapa 68) y la profundidad (la etapa 70) de la arruga en el caso en el que el eco de defecto no esté separado con claridad del del eco frontal.

En la etapa 68, debido a que los valores de tiempo de vuelo no pueden usarse de manera fiable en este caso, L_w solo se calcula por medio de L_d , usando la fórmula (11):

15

$$L_w = L_d \quad (11)$$

20 La profundidad de arruga P_w en la etapa 70 se calcula usando la fórmula (12):

$$P_w = [T_M(S_r) - T_g + T_{RMAX} + \tau_2] \cdot \frac{V_{US}}{2} \quad (12)$$

También en este caso, el solicitante de la presente invención ha establecido que podría necesitarse un término algebraico adicional (τ_2 en la fórmula (12)) en la fase de calibración para la transformación de los tiempos de vuelo en profundidad. Debería recordarse que T_{RMAX} es el instante en el que un pico típico se encuentra en su máximo, comenzando a partir de su instante inicial.

25

Las etapas del procedimiento de acuerdo con la etapa 38 de la figura 2 se describirán a continuación, con referencia a la figura 6. Tal como ya se ha expuesto, se entra en la etapa 38 cuando la indicación de la presencia de un defecto se proporciona solo por un descenso de la amplitud de pico del eco posterior BE y la señal de eco debido un defecto podría estar enmascarada por un alto ruido de fondo.

30

Los datos de partida que se consideran para su análisis son los de la exploración C 3 y el conjunto de ondas completas reflejadas (que se consideran en el presente caso en radiofrecuencia) que se adquieren con Cadq.

35

Un área que contiene el defecto (Z_w) y un área libre de defectos (Z_b) se identifican en la exploración C 3. Esta última área ha de encontrarse tan cerca como sea posible de la primera o, en cualquier caso, estar relacionada con una porción de la parte o una muestra patrón de referencia con las mismas características geométricas y dimensionales que las del área con el defecto. Z_w y Z_b por lo general son

5 unas áreas rectangulares de pequeño tamaño que contienen un número suficiente de puntos para un análisis estadístico, por ejemplo 100 puntos (que se corresponden con 100 mm², en el caso en el que los pasos de exploración en las dos dimensiones relevantes son ambos de 1 mm). Debería recordarse que una onda completa se corresponde con cada punto de la representación de exploración C. Las ondas se toman de ambas áreas y se guardan en unas matrices respectivas, a las que se hace referencia usando

10 las mismas referencias de Z_w y de Z_b que se usan para indicar las áreas respectivas, con unas dimensiones respectivas de $w1 \cdot w2$ y $b1 \cdot b2$ (por ejemplo, $w1$ y $b1$ hacen referencia a las filas y $w2$ y $b2$ a las columnas de las matrices Z_w y Z_b respectivas). En lo sucesivo, por simplicidad de descripción, se supone que el defecto tiene una longitud y una anchura orientadas, de forma respectiva, en la dirección de las columnas y las filas de la matriz Z_w . También se supone que $w2$ es más grande que la anchura del defecto y que este se encuentra dentro del intervalo (1, $w2$), y que $w1$ coincide con la longitud del

15 defecto que se desea caracterizar (de otro modo, el procedimiento debería repetirse para áreas adicionales hasta que todas las de interés están completadas).

En la etapa 91, la totalidad de las ondas en Z_w y Z_b se normalizan. La normalización consiste en dos

20 operaciones consecutivas: normalización en amplitud y compensación de desplazamiento de los tiempos de vuelo.

La normalización en amplitud asegura que la totalidad de las ondas tienen el máximo y el mínimo iguales a dos valores previamente determinados (que se indican en lo sucesivo en el presente documento como

25 A_{MAX} y A_{MIN} ; normalmente, $A_{MAX} = -A_{MIN}$). Esto se realiza tal como sigue. $A_{wMAX}(i, j)$ y $A_{wMIN}(i, j)$ son, de forma respectiva, el máximo y el mínimo de la amplitud de la onda en la posición (i, j) de la matriz Z_w (con $i = 1, \dots, w1$ y $j = 1, \dots, w2$). De forma similar, $A_{bMAX}(l, m)$ y $A_{bMIN}(l, m)$ son, de forma respectiva, el máximo y el mínimo de la amplitud de la onda en la posición (l, m) de la matriz Z_b (con $l = 1, \dots, w1$ y $m = 1, \dots, w2$). Si $A_w(i, j; t)$ y $A_b(l, m; t)$ son, de forma respectiva, las amplitudes basadas en el tiempo de

30 la onda en la posición (i, j) en la matriz Z_w , y de la onda en la posición (l, m) en la matriz Z_b , mediante la aplicación de las siguientes las fórmulas lineales:

$$A_{w1}(i, j; t) = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{A_{wMAX}(i, j) - A_{wMIN}(i, j)} (A_w(i, j; t) - A_{wMIN}(i, j; t)) + A_{MIN} \quad (13)$$

$$A_{b1}(l, m; t) = \frac{A_{MAX} - A_{MIN}}{A_{bMAX}(l, m) - A_{bMIN}(l, m)} (A_b(l, m; t) - A_{bMIN}(l, m; t)) + A_{MIN} \quad (14)$$

se obtienen los valores normalizados correspondientes $A_{w1}(i, j; t)$ y $A_{b1}(l, m; t)$. Debería observarse que el tiempo t varía de una forma discreta (por simplicidad, se supone que $t = 0$ se corresponde con 0 μs) y,

por lo tanto, que:

- cada salto δt depende de la frecuencia de muestreo ν_f (por ejemplo, para $\nu_f = 100$ MHz, $\delta t = 0,01 \mu s$) y, por lo tanto, los valores de t pueden producirse a partir de la variable discreta τ ($\tau = 0, 1, \dots$), de tal modo que $t = \delta t \cdot \tau$. En lo sucesivo, cuando sea necesario, las funciones de tipo $F(t)$ también se indicarán como F_τ ;
- el máximo valor de t depende de la preparación elegida (o en su lugar del extremo superior de la puerta de adquisición $Cadq$).

La compensación de desplazamiento de los tiempos de vuelo, que se implementa en las amplitudes A_{w1} y A_{b1} , asegura que la máxima amplitud del eco frontal se encuentra en el origen del eje del tiempo, es decir, en $t = 0$. Si para la onda $A_{x1}(p, q)$, en la que con referencia a las fórmulas (13) y (14) el subíndice x puede ser $x = w$ o $x = b$, el eco frontal tiene su máximo en t_{MAX} , a continuación, suponiendo que $t = 0, \dots, t_f$, la compensación con la cual se generan las ondas compensadas $A_{xn}(p, q)$ se obtiene usando la fórmula (15):

$$A_{xn}(p, q; t) = \begin{cases} A_{x1}(p, q; t - t_{MAX}) & \text{si } 0 \leq t \leq t_f - t_{MAX} \\ 0 & \text{si } t > t_f - t_{MAX} \end{cases} \quad (15)$$

Después de la normalización, en la que se generan las matrices Z_{wn} y Z_{bn} que contienen las ondas normalizadas A_{wn} y A_{bn} , la etapa 92 se ejecuta, de acuerdo con la cual se obtienen dos ondas medias, $A_{wm}(t)$ y $A_{bm}(t)$, las cuales sintetizan, de forma respectiva, las características del área defectuosa y el área libre de defectos. $A_{wm}(t)$ y $A_{bm}(t)$ se obtienen a través de las fórmulas (16) y (17):

$$A_{wm}(t) = \frac{1}{w1 \cdot w2} \sum_{i=1}^{w1} \sum_{j=1}^{w2} A_{wn}(i, j; t) \quad (16)$$

$$A_{bm}(t) = \frac{1}{b1 \cdot b2} \sum_{l=1}^{b1} \sum_{m=1}^{b2} A_{bn}(l, m; t) \quad (17)$$

A continuación, en la etapa 93, se genera la matriz de los valores de pico a pico $V_{pp}(i, j)$ de los ecos posteriores (situados ahora entre $t_i = T_{BI} - T_{MAX}$ y $t_f = T_{BF} - T_{MAX}$) de las ondas $A_{wn}(t)$, usando la fórmula (18):

$$V_{pp}(i, j) = \max \{A_{wn}(i, j; t)\} - \min \{A_{wn}(i, j; t)\} \quad (18)$$

con t entre $(t_i$ y $t_f)$.

Siguiendo esto, en la etapa 94, a través de la fórmula (19), el vector fila $V_{ppm}(j)$ se obtiene al promediar las columnas de $V_{pp}(i, j)$ e invertir con respecto al máximo valor:

$$V'_{ppm}(j) = \frac{1}{w_1} \sum_{i=1}^{w_1} V_{pp}(i, j) \quad V_{ppm}(j) = |V_{ppm}(j) - V'_{\max}| \quad (19)$$

con $V'_{\max} = \max(V'_{ppm}(j))$.

5

La secuencia de los valores $V_{ppm}(j)$ forma una curva que puede aproximarse por medio de un procedimiento de mejor ajuste convencional. En particular, el solicitante de la presente invención ha establecido que la secuencia que puede aproximarse con una función gaussiana, caracterizada por una desviación estándar σ_{ppm} , para los fines de la medición en cuestión. La anchura de la arruga se calcula en la etapa 95 sucesiva usando la fórmula (20):

10

$$L_w = 2 \cdot \sigma_{ppm} \quad (20)$$

La parte del procedimiento dedicada a medir la profundidad de arruga P_w comienza en la etapa 96, empezando con la generación de la señal de diferencia $D(t)$ según la fórmula (21):

15

$$D(t) = A_{gm}(t) - A_{bm}(t) \quad (21)$$

El espectrograma logarítmico $\Gamma(v, \tau)$ de este vector se construye usando la fórmula (22):

$$\Gamma(v, \tau) = 20 \log_{10} \left| \sum_{n=0}^{n_f} D_{n+\tau} e^{-\frac{2\pi i}{n_f+1} n \tau} \right| \quad (22)$$

20

en la que $v = 0, \dots, n_f$, n_f es normalmente igual a 255 e i es la unidad imaginaria.

Tal como se conoce, el espectrograma es una representación espectral variable en el tiempo que muestra cómo la densidad espectral de una señal varía con el tiempo. Las variables v y τ ya se han definido en lo que antecede y están relacionadas con los valores de frecuencia de muestreo (v) y tiempo (τ). En particular, τ es una variable discreta ($\tau = 0, 1, \dots$) de tal modo que los valores de tiempo t pueden construirse a partir de la variable discreta τ como $t = \delta t \cdot \tau$ (por lo tanto, el tiempo puede representarse tanto con variable t como con variable τ).

30

En la etapa 97, el espectrograma se genera y a continuación se evalúa. La representación es un mapa de color, que tiene los valores de profundidad $X = \delta t \cdot \tau \cdot (V_{us} / 2)$ en el eje de abscisas, las frecuencias $f = -v / \delta t$ del eje de ordenadas y los valores $\Gamma(v, \tau)$ en el intervalo Y_1 e Y_2 para el color de los píxeles. Por lo general, $Y_1 = 0,73 \cdot \Gamma_{\max}$ e $Y_2 = 0,90 \cdot \Gamma_{\max}$ en las que $\Gamma_{\max}$ es el máximo de $\Gamma(v, \tau)$ en v y τ ; los valores de Y_1 e Y_2 pueden establecerse con más precisión en la fase de calibración. Aparecen picos en esta representación (por favor, consúltase la figura 7 para un ejemplo). El pico relacionado con el eco

35

inicial tiende a ser despreciable, mientras que normalmente aparecen el pico relacionado con el eco posterior y el pico de defecto. Suponiendo el pico de defecto se encuentra entre X_1 y X_2 , la profundidad de la arruga puede calcularse usando la fórmula (23):

$$P_w = x_2 - x_1 \quad (23)$$

En este punto, el proceso termina.

El método de acuerdo con la presente invención se implementa preferiblemente mediante un sistema de exploración y de inspección por ultrasonidos automático capaz de asegurar la adquisición, con la exactitud, la precisión y la resolución solicitadas, de las ondas de ultrasonidos reflejadas de acuerdo con los parámetros de preparación que se han especificado previamente. En particular, más allá de los parámetros específicamente de ultrasonidos (por ejemplo, la frecuencia de las ondas) y los de adquisición (frecuencia dinámica y de muestreo de la conversión de analógico a digital), los procesos también requieren que la totalidad de las superficies de la parte que van a inspeccionarse se exploren de manera apropiada. En la actualidad, mientras que la exploración de superficies planas o curvadas abiertas puede conseguirse comúnmente por medio de sistemas comerciales, la exploración de superficies (planas o curvadas) internas de estructuras cerradas grandes no se implementa con facilidad.

La figura 8A muestra un sistema de exploración 100, que no es parte de la presente invención, que está configurado para implementar el método que se ha descrito previamente.

El sistema de exploración 100 también está configurado para implementar metodologías de exploración que podrían usarse de forma genérica para la inspección por ultrasonidos usando reflexión de ondas internas, con o sin carga, de los núcleos de las estructuras abiertas o cerradas en materiales compuestos o metal, que tienen, por ejemplo, un tipo de geometría en C, en T, en L, en I o en J, o aún otro tipo de geometría.

El sistema de exploración 100 incluye unos medios para implementar una exploración curvilínea (por ejemplo, de la región 102 de la porción de estructura 101 en la figura 8A) y una exploración de acimut (por ejemplo, de la región 104 de la porción de estructura 101 en la figura 8A). El sistema de exploración 100 se mueve, por ejemplo, a lo largo de la dirección del eje Z. La porción de estructura que se muestra en la figura 8A es, por ejemplo, una porción de la estructura 2 en la figura 1. En este caso, la región 102 en la figura 8A se corresponde con una de las regiones 6 en la figura 1.

Con el fin de llevar a cabo una exploración de las áreas curvilíneas (la región 102), el sistema de exploración 100 comprende un cuerpo 105, con el que está conectado un primer cabezal de exploración 106, que está configurado para moverse a lo largo del eje Z en los saltos ΔZ . El primer cabezal de exploración 106 incluye una porción rotatoria 108, fijada por ejemplo mediante un pasador 107 oportuno

capaz de girar alrededor del eje Z (por favor, véanse las flechas que indican la rotación en la vista ampliada en la figura 8B). La rotación del pasador 107 se controla, por ejemplo, mediante un motor (que se describe con mayor detalle más adelante), y da lugar a una rotación correspondiente de la porción rotatoria 108, que aproximadamente sigue la curvatura de la región 102. La porción rotatoria 108 está configurada para portar una sonda 110, en particular una sonda de ultrasonidos capaz de generar unas ondas de ultrasonidos incidentes sobre la superficie de la región 102, y de adquirir señales de ultrasonidos reflejadas (señales de eco), tal como ya se ha descrito en lo que antecede con referencia al método de exploración en la figura 2.

El primer cabezal de exploración 106 está conectado de forma rígida con el cuerpo 105 por medio de una varilla 112 fabricada, por ejemplo, de una aleación de aluminio, plástico u otro material de una rigidez equivalente y no sometido a fenómenos de deterioro rápido (debido a relajación, corrosión, etc.) que se produce por la acción de exploración y por el fluido de acoplamiento que se usa posiblemente entre la sonda 110 y la superficie de la región 102 con la que está acoplada la sonda 110.

La posición de reposo (0°) de la porción rotatoria 108 del cabezal de exploración 106 se corresponde, por ejemplo, con una orientación de la sonda 110 ortogonal con respecto a la superficie de soporte del cuerpo 105 (en la representación en la figura 8A, el cuerpo 105 descansa sobre el plano XZ). La máxima apertura depende del ángulo $\theta_{\max}$ entre la superficie de soporte (tal como se menciona, sobre el plano XZ) y la superficie de la región 104 (en la figura 8A, este ángulo es de aproximadamente 90° , debido a que la región 104 sobre el plano YZ es ortogonal con respecto al plano XZ). Por lo tanto, la porción rotatoria 108 puede controlarse por medio del ángulo θ , que describe la rotación entre 0° y $\theta_{\max}$ con unos saltos de rotación previamente definidos $\Delta\theta$. Para cada salto ΔZ a lo largo del eje Z, se acciona la rotación de la porción rotatoria 108 de 0° a la máxima apertura permitida ($\theta_{\max}$), con un salto $\Delta\theta$. Para cada uno de estos saltos $\Delta\theta$, se genera una señal de ultrasonidos y se adquiere una señal de retorno respectiva. Es obvio que el cabezal rotatorio 108 puede girar cualquier ángulo de entre 0° y 360° de acuerdo con las necesidades que se derivan de la aplicación específica y la estructura que va a analizarse.

Los valores de salto $\Delta\theta = r \cdot \Delta\theta$ (siendo r el radio del círculo osculatriz que se corresponde con el área 102) y ΔZ son variables y dependen de la aplicación específica; en general, estos están comprendidos en el intervalo de entre aproximadamente 0,1 mm y 3,0 mm.

La figura 9 muestra una porción del sistema de exploración 100 con mayor detalle; en particular, esta muestra el primer cabezal de exploración 106.

El primer cabezal de exploración 106 comprende un motor 116 con o sin un encóder, con un par motor típico de 24 Kg • cm (por ejemplo, un motor Hitec HSR 5990-TG) que está conectado con la porción rotatoria 108 y configurado para mover la porción rotatoria 108 a lo largo del perfil de radio, con el salto

$\Delta\theta$ tal como se ha descrito previamente; la velocidad de exploración típica se encuentra en el intervalo de 0,01-0,03 m / s. No obstante, el solicitante de la presente invención ha establecido que unas velocidades más grandes son posibles y no invalidan los objetivos y características de la exploración.

5 El primer cabezal de exploración 106 comprende además unos primeros medios de movimiento 118a-118d, por ejemplo, en forma de ruedas capaces de mover el primer cabezal de exploración 106 sobre el plano YZ; unos segundos medios de movimiento 120a, 120b, por ejemplo, en forma de ruedas capaces de mover el primer cabezal de exploración 106 sobre el plano XZ; y unos terceros medios de movimiento 122a-122d, por ejemplo, en forma de ruedas libres que están conectadas con un extremo de la porción rotatoria 108, y capaces de descansar contra la región 102 y seguir el perfil curvado durante las etapas de análisis de ultrasonidos de acuerdo con el método de inspección de acuerdo con la presente invención.

De una forma equivalente, que no se muestra, es posible usar películas deslizantes (perforadas en el centro, cerca de la sonda) que coinciden de manera dinámica con el perfil curvado de la región 102, o sistemas de seguimiento de perfil basado en láser y el subsiguiente accionamiento robotizado de la trayectoria adquirida.

La porción rotatoria 108 incluye una cavidad 124a capaz de alojar la sonda 110. De acuerdo con la realización que se describe y que se ilustra, la porción rotatoria 108 aloja una única sonda 110. Como alternativa, la porción rotatoria 108 podría alojar una pluralidad de sondas 110 o un vector de sonda 110.

La porción rotatoria 108 puede fabricarse de poli(metacrilato de metilo), por ejemplo Plexiglas; metal, por ejemplo una aleación de aluminio; un material elastomérico, por ejemplo Aqualene; o aún otro material, con la condición de que este sea indeformable en la etapa de exploración y no se deteriore con rapidez (debido a relajación, corrosión, etc.) debido a la acción de exploración y el fluido de acoplamiento; este último se aplica directamente sobre la superficie explorada o se transfiere a la misma a través del orificio 126 que sale de la cavidad 124a, que está conectada mediante un paso con la cavidad 124b, conectada a su vez con una fuente de fluido.

El acoplamiento también puede conseguirse por medio de sondas con cristales sumergidos en unos geles oportunos de tipo conocido, encerrados en unas membranas que se autoadaptan a las superficies exploradas. La autoadaptación de la porción rotatoria 108 a diversos tipos de superficies curvilíneas, o a una superficie con un radio de curvatura desigual, así como la autoadaptación de la presión de acoplamiento, se obtiene por medio de un sistema basado en los pistones 127 capaz de funcionar en extensión y compresión, y / o unos resortes de precisión 130. Con más detalle, los resortes 130 están conectados entre la estructura rotatoria 108 y los pistones 127. De acuerdo con una realización alternativa, los pistones se sustituyen por soportes no extensibles, o aún otro tipo de soporte. Por lo general, la constante elástica de los resortes es de aproximadamente 0,09 N / mm, dependiendo de la

aplicación específica. Como alternativa, pueden usarse otros sistemas conocidos, tal como por ejemplo unos hidráulicos.

5 Con referencia a la figura 8A, para llevar a cabo una exploración de acimut (explorando de la región 104, sobre el plano YZ) el sistema de exploración 100 comprende además un segundo cabezal de exploración 128, que está conectado con el cuerpo 105 mediante una varilla 130 similar a la varilla 112 que se ha descrito previamente.

10 Durante la exploración de acimut, después de cada avance de salto ΔZ a lo largo del eje Z, el segundo cabezal de exploración 128 se mueve a lo largo de trayectorias que describen unos arcos de circunferencia C a lo largo de la región 104. Debido a que el movimiento está limitado, el movimiento se determina mediante el salto utilizado; en cada uno de estos saltos, se genera y se adquiere una señal de ultrasonidos.

15 El segundo cabezal de exploración 128 es similar al primer cabezal de exploración 106 y aloja una sonda 132 respectiva, que está configurada para generar una señal de ultrasonidos y adquirir una señal de eco que se genera por la estructura sometida a análisis en respuesta a la señal de ultrasonidos generada. Como alternativa, dependiendo de las aplicaciones, el segundo cabezal de exploración 128 podría alojar una pluralidad de sondas, vectores de sonda o dispositivos de conjunto de antena en fase.

20 El segundo cabezal de exploración 128 comprende además sus propios medios de soporte y de movimiento, por ejemplo ruedas, capaces de permitir un movimiento fluido y delicado del segundo cabezal de exploración 128 sobre la superficie de la región 104.

25 Además del movimiento circular en el plano YZ, también es posible realizar un tipo radial de exploración. En este caso, la varilla 130 incluye un mecanismo de extensión de un tipo hidráulico controlado por presión, o un sistema telescópico, con el fin de permitir que se varíe la longitud de la varilla 130. La velocidad de exploración típica, con independencia del tipo de exploración, se encuentra en el intervalo de 0,2-0,5 m / s.

30 El movimiento del segundo cabezal de exploración 128, por medio de la varilla 130, se realiza usando un motor 138 que está alojado en el cuerpo 105 y conectado con la varilla 130 mediante unos medios oportunos de transmisión, por ejemplo una transmisión de correa o cadena. El motor 138 es del tipo con o sin un encóder, por ejemplo, un motor paso a paso, con un par motor típico de 12 Kg • cm, e incluso
35 más particularmente, un motor de la serie 103-H7123-0740 de SANYODENKI.

El segundo cabezal de exploración 128 puede comprender el inicio / fin de unos detectores de deslizamiento 142a, 142b, fabricados usando microconmutadores de palanca (por ejemplo, un microconmutador de palanca Saia-Burgess V4NSUL de 5 A a 250 Vca previamente cableado), para

reconocer de forma automática un punto de inicio de exploración y un punto de fin de exploración de la región 104 en el caso en el que la región 104 está delimitada en sentido lateral por restricciones, por ejemplo paredes capaces de interactuar, durante el uso, con el inicio / fin de los detectores de desplazamiento 142a, 142b. De una forma equivalente, es posible usar un sistema de seguimiento de láser sobre el perfil de la región 104, con el subsiguiente accionamiento robotizado de la trayectoria que se ha adquirido de este modo (que no se muestra).

También en el caso del segundo cabezal de exploración 128, tal como ya se ha descrito con referencia al primer cabezal de exploración 106, el acoplamiento entre la sonda 132 portada por el segundo cabezal de exploración 128 y la superficie de la región 104 se obtiene por medio de una columna de agua (u otro fluido de acoplamiento). Como alternativa, pueden usarse sondas con cristales sumergidos en gel de acoplamiento encerrado en unas membranas que se autoadaptan a las superficies exploradas. De forma similar, es posible proporcionar un sistema de acoplamiento autoadaptable entre el segundo cabezal de exploración 128 y la región 104, que está configurado para generar una presión de acoplamiento oportuna. Este sistema autoadaptable incluye, por ejemplo, resortes de precisión (con una constante elástica típica de 0,09 N / mm), y / o pistones, similares a los que se describen y se muestran con referencia al primer cabezal de exploración 106. Como alternativa, podría usarse un sistema hidráulico.

El cuerpo 105 del sistema de exploración 100 incluye además un motor 150, integrado en el cuerpo 105 o externo a este, preferiblemente un motor con un encóder (similar al motor 138 por ejemplo). El motor 150 está configurado para controlar el sistema de exploración 100 a lo largo del eje Z. La velocidad de avance V_a del sistema de exploración 100 depende del tiempo que necesitan el primer y el segundo cabezal de exploración para completar sus exploraciones respectivas, en la totalidad de los puntos de exploración planificados. Teniendo en cuenta que el movimiento longitudinal del sistema de exploración 100 a lo largo del eje Z tiene lugar sobre unas superficies en general rugosas y en la presencia del fluido de acoplamiento (en general agua, tal como se expone), el dispositivo usa unas ruedas cauchutadas para moverse (una mezcla blanda con una dureza de aproximadamente 50 Shore), conformadas con el fin de garantizar un agarre óptimo sobre la superficie recorrida, sin deslizamiento y / o fluctuación. En general, las ruedas pueden ser de diferentes materiales, con la condición de que el rozamiento no induzca fenómenos abrasivos sobre la superficie recorrida.

El sistema de exploración 100 comprende además un microprocesador 200 y una memoria 202, que están alojados en el cuerpo 105 por ejemplo, y conectados con los motores 116, 138 y 150. El microprocesador 200 está configurado para controlar el funcionamiento del motor 150 con el fin de impulsar el sistema de exploración 100 a lo largo del eje Z (en saltos de ΔZ), controlar el funcionamiento del motor 138 con el fin de mover el segundo cabezal de exploración 128 (en saltos de ΔY) por encima de las superficies que van a analizarse (por ejemplo, la región 104), y para controlar el funcionamiento del motor 116 con el fin de mover la porción rotatoria 108 del primer cabezal de exploración 106 (en saltos de $\Delta \Theta$) por encima de las superficies que van a analizarse (por ejemplo, la región 102).

El microprocesador 200 implementa las etapas del método de análisis de acuerdo con la presente invención (que se describe con referencia a la figura 2). Las instrucciones para el microprocesador 200 que definen las etapas del método en la figura 2, se almacenan, por ejemplo, en la memoria 202 en forma de un programa de soporte lógico. Como alternativa, el microprocesador 200 y la memoria 202 podrían sustituirse por un soporte lógico implementado en un ordenador externo que está conectado con el sistema de exploración 100.

El solicitante de la presente invención también ha establecido que el sistema de exploración 100 podría moverse sobre una pista (que no se muestra), dispuesta a lo largo del eje Z, y que aloja una correa de caucho dentada y calibrada. En este caso, el motor 150 no necesita un encóder, debido a que es la correa la que garantiza el accionamiento de los saltos de ΔZ . Una alternativa adicional para el sistema de exploración 100 se basa en unas tecnologías conocidas como "orugas para tuberías": por lo tanto, el primer y el segundo cabezal de exploración 106 y 128 pueden montarse sobre sistemas de oruga (por ejemplo, el INSPECTOR Tipo 1000 / 2000 de Inspector Systems). Esta última solución también permite asociar inspecciones ópticas (por ejemplo, usando láser, pero no solo esto) con la inspección por ultrasonidos.

En el caso de las estructuras con un número de áreas curvadas (es decir, de tipos en C, en T, en I y en J), la inspección alrededor de las regiones curvadas (véanse, por ejemplo, las regiones 6 en la figura 1 o la región 102 en la figura 8A) puede llevarse a cabo de forma simultánea sobre una pluralidad de estas regiones curvadas. Por ejemplo, un único sistema de exploración 100 podría comprender una pluralidad de primeros cabezales de exploración 106, cada uno de los cuales es capaz de acoplarse con una región curvada respectiva por medio de una varilla respectiva de una longitud y una forma oportunas que está conectada con el cuerpo 105. De esta forma, por ejemplo, para las estructuras del tipo que se muestra en la figura 1, es posible inspeccionar de forma simultánea las cuatro regiones que se indican mediante el número de referencia 6.

Como alternativa, para evitar fabricar una pluralidad de sistemas de movimiento, comprendiendo cada uno un número diferente de varillas con unos cabezales de exploración respectivos, es posible acoplar entre sí, solo cuando sea necesario, dos o más sistemas de movimiento 100 del tipo que se muestra en la figura 8A. El acoplamiento puede realizarse de forma magnética mediante imanes permanentes en neodimio-hierro-boro sinterizado con las siguientes especificaciones típicas: remanencia. 12 kGs; coercividad = 11 kOe; coercividad intrínseca - 12 kOe; máxima densidad de energía magnética = 270 kJ / m².

Para las estructuras con una dimensión Z larga con respecto a la del sistema de exploración 100, el solicitante de la presente invención también ha verificado la posibilidad de usar unos vectores que comprenden una pluralidad de sistemas de movimiento 100 dispuestos en línea uno con otro, reduciendo

de ese modo los tiempos de inspección. De hecho, si n es el número de dispositivos que se usan, el tiempo de exploración es aproximadamente $(1/n)$ veces el de un sistema de único dispositivo.

De una forma que no se muestra en la figura, el dispositivo de movimiento 100 puede comprender además un tercer cabezal de exploración, similar al segundo cabezal de exploración 128, que está configurado para llevar a cabo una inspección sobre una superficie en paralelo con respecto al plano XZ.

Como alternativa, el dispositivo de movimiento 100 puede comprender un único cabezal de exploración que está configurado para llevar a cabo tanto los movimientos del primer cabezal de exploración 106 como los del segundo cabezal de exploración 128 (y si es necesario, los del tercer cabezal de exploración, si se encuentra presente).

A partir de un examen de las características del método implementado de acuerdo con la presente invención, las ventajas que pueden conseguirse con esta son evidentes.

En general, aparte de los defectos más comunes que pueden diagnosticarse, tal como las deslaminaciones, la porosidad, las cavidades, las inclusiones y las separaciones, la posibilidad de detectar arrugas internas en una estructura de material compuesto de cualquier forma y de medir las dimensiones principales, ya estén o no asociadas con bolsas, posibilita que la calidad del producto se aumente de manera significativa, reduciendo el número de partes aceptadas por error y, al mismo tiempo, reduciendo los costes de producción de las estructuras mediante la reducción del número de partes rechazadas por error.

La ampliación de la capacidad de diagnóstico para defectos en las capas de material también extiende el intervalo de configuraciones de estructura posibles en la fase de diseño en lo que concierne a los criterios de tolerancia a daños.

En el caso específico, el método de análisis y de medición no depende de un equipo, instrumentos o sondas particulares o especialmente fabricados. Este se basa en unas inspecciones por ultrasonidos que pueden realizarse al mismo tiempo que las convencionales, que se usan normalmente en la producción. El método es aplicable a unas partes de cualquier geometría y tamaño, tanto estructuras abiertas por medio de los sistemas de exploración comercialmente disponibles como estructuras cerradas, para las cuales es preferible usar el sistema de exploración 100.

Por último, el método se presta a sí mismo a una automatización total, tanto en la fase de exploración como en la fase de procesamiento y de diagnóstico.

En conclusión, se entiende que pueden hacerse cambios y modificaciones al método que se describe y se muestra en el presente documento sin abandonar el alcance de protección de la presente invención,

tal como se define en las adjuntas reivindicaciones.

En particular, lo siguiente cae dentro del alcance de protección de la invención:

- 5 - diferentes elecciones para las características, también en frecuencia, de las sondas y el aparato de medición, los métodos y curvas de “mejor ajuste”, la calibración experimental, los umbrales, los parámetros de puerta y los métodos de exploración;
- aplicación del método a técnicas de ultrasonidos reflectantes que no sean las que se indican a modo de ejemplo en la descripción; tales técnicas incluyen, pero no se limitan a, ultrasonidos por el aire,
10 ultrasonidos por láser y conjunto de antena en fase;
- aplicación del método para complementar o sustituir una inspección convencional;
- un diagrama de flujo de proceso diferente con respecto a la figura 2, en el que las etapas se realizan en un orden diferente del que se muestra y se describe;
- aplicación del método a materiales o combinaciones de materiales que no sean materiales
15 compuestos en carbono / resina;
- aplicación del método a defectos de cualquier tipo, incluyendo, pero sin limitarse a, deformaciones ortogonales con respecto al plano de inspección de las capas que forman un material, e inclusiones o cavidades que dan lugar a deformaciones internas ortogonales con respecto al plano de inspección.

REIVINDICACIONES

1. Un método de inspección no destructiva por ultrasonidos para una estructura de material compuesto (2) que incluye una superficie de incidencia y una superficie posterior dispuesta a una distancia con respecto a la superficie de incidencia, para detectar por lo menos un defecto (4) que se encuentra entre la superficie de incidencia y la superficie posterior, que comprende las etapas de:

- definir (20; 50) una pluralidad de primeros puntos de inspección a lo largo de una primera dirección de exploración de la estructura (2);

- para cada uno de dichos primeros puntos de inspección, generar (20; 50) una señal de ultrasonidos incidente sobre dicha superficie de incidencia y adquirir (20; 50) una señal de ultrasonidos reflejada indicativa de la presencia del defecto (4);

- para cada uno de dichos primeros puntos de inspección, procesar (24; 52; 91-93) la señal de ultrasonidos reflejada para extraer una primera señal de eco relacionada con una reflexión de defecto (D) que se genera por el defecto en respuesta a la señal de ultrasonidos incidente;

- asociar (24; 52; 91-93) un valor de amplitud y un valor de tiempo de vuelo con la primera señal de eco, siendo el valor de tiempo de vuelo el valor de la duración de tiempo transcurrida entre un instante de tiempo inicial y un instante de tiempo de la adquisición de la primera señal de eco;

- ajustar (54; 94), por medio de unas funciones de interpolación primera y segunda respectivas, los valores de amplitud y de tiempo de vuelo asociados con las primeras señales de eco extraídas para la totalidad de los puntos de inspección de dicha pluralidad de primeros puntos de inspección; y

- estimar (58; 65; 68; 70; 95; 97) una primera dimensión (Lw) de dicho defecto (4) en función de por lo menos un parámetro de la primera o la segunda función de interpolación, siendo la primera dimensión una anchura del defecto (4) considerada a lo largo de la primera dirección de exploración;

caracterizado por comprender además las etapas de:

- definir (90) una pluralidad de segundos puntos de inspección a lo largo de una segunda dirección de exploración de una estructura de referencia, teniendo la estructura de referencia una superficie de incidencia propia, una superficie posterior propia y encontrándose libre de defectos (4) entre la superficie de incidencia y la superficie posterior;

- generar (90), para cada uno de los segundos puntos de inspección, una señal de referencia de ultrasonidos incidente respectiva sobre dicha superficie de incidencia y adquirir (90) una señal de referencia reflejada respectiva;

- procesar (91-93), para cada uno de los segundos puntos de inspección, la señal de referencia reflejada respectiva para extraer una segunda señal de eco respectiva relacionada con una reflexión de la porción de la estructura de referencia entre la superficie de incidencia y la superficie posterior;

- asociar (91), para cada uno de los segundos puntos de inspección, una referencia de amplitud respectiva con el segundo valor de señal de eco respectivo;

- normalizar (91), para cada uno de los primeros puntos de inspección, los valores de amplitud de la

primera señal de eco, obteniendo una primera señal normalizada;

- normalizar (91), para cada uno de los segundos puntos de inspección, los valores de amplitud de la segunda señal de eco, obteniendo una segunda señal normalizada;

- generar una primera señal de media mediante el cálculo del valor medio de los valores de amplitud de las primeras señales de eco relacionadas con los primeros puntos de inspección;

- generar una segunda señal de media mediante el cálculo del valor medio de los valores de amplitud de las segundas señales de eco relacionadas con los segundos puntos de inspección;

- sustraer (96) las señales de media primera y segunda una de otra, obteniendo una señal de diferencia (D(t));

- definir (96) una representación espectral variable en el tiempo de dicha señal de diferencia (D(t)), mediante el cálculo de la densidad espectral de la señal de diferencia con el tiempo; y

- obtener (97) una segunda dimensión (Pw) del defecto (4) en función de dicha representación espectral, siendo la segunda dimensión una profundidad (Pw) del defecto (4).

2. El método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dicha representación espectral es un espectrograma logarítmico.

3. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que las funciones de interpolación primera y segunda son funciones gaussianas, incluyendo dicho parámetro de la primera o la segunda función de interpolación el valor de la desviación estándar de la función gaussiana respectiva, comprendiendo la etapa de estimar la primera dimensión (Lw) calcular (95) un valor igual a dos veces la desviación estándar.

4. El método de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que la primera función de interpolación es una función gaussiana, comprendiendo dicha estimación las etapas de:

- calcular (54) un máximo valor ($\max[Ga(k)]$) de la función gaussiana;

- calcular (54) un valor umbral ($h_1 \cdot \max[Ga(k)]$) como una fracción del máximo valor de la función gaussiana;

- determinar (54) un primer y un segundo punto intermedio (k_1 , k_2) a lo largo de la primera dirección de exploración de tal modo que la función gaussiana que se calcula en el primer y en el segundo punto intermedio tiene un valor igual al valor umbral ($h_1 \cdot \max[Ga(k)]$); y

- calcular (54, 64, 70) la primera dimensión (Lw) como una función lineal de la distancia entre el primer y el segundo punto intermedio (k_1 , k_2).

5. El método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además las etapas de:

- para cada uno de dichos primeros puntos de inspección, normalizar los valores de amplitud de la primera señal de eco, obteniendo una señal normalizada respectiva con un máximo valor de amplitud

de pico y un mínimo valor de amplitud de pico,

- para cada señal normalizada, calcular un valor de amplitud de pico a pico respectivo, siendo dicho valor de amplitud de pico a pico el intervalo de amplitudes incluido entre el máximo valor de amplitud de pico y el mínimo valor de amplitud de pico,

5

comprendiendo dicha etapa de asociar (24; 52; 91-93) un valor de amplitud con la primera señal de eco asociar el valor de amplitud de pico a pico respectivo con la primera señal de eco, y comprendiendo dicha etapa de ajustar (54; 94) los valores de amplitud ajustar los valores de amplitud de pico a pico.

10

6. El método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además, antes de dicha etapa de generar una señal de ultrasonidos incidente, las etapas de:

- llevar a cabo (10) una inspección por ultrasonidos preliminar de la estructura (2); y

15

- analizar (14) un resultado de dicha inspección por ultrasonidos preliminar.

7. Un programa informático que puede cargarse en los medios de procesamiento (200, 202) de un sistema de inspección no destructiva por ultrasonidos (100) y diseñado de tal modo que, cuando se ejecuta, el método de inspección tal como se reivindica en una cualquiera de las reivindicaciones 1-6 se lleva a cabo por el sistema de inspección no destructiva por ultrasonidos (100).

20

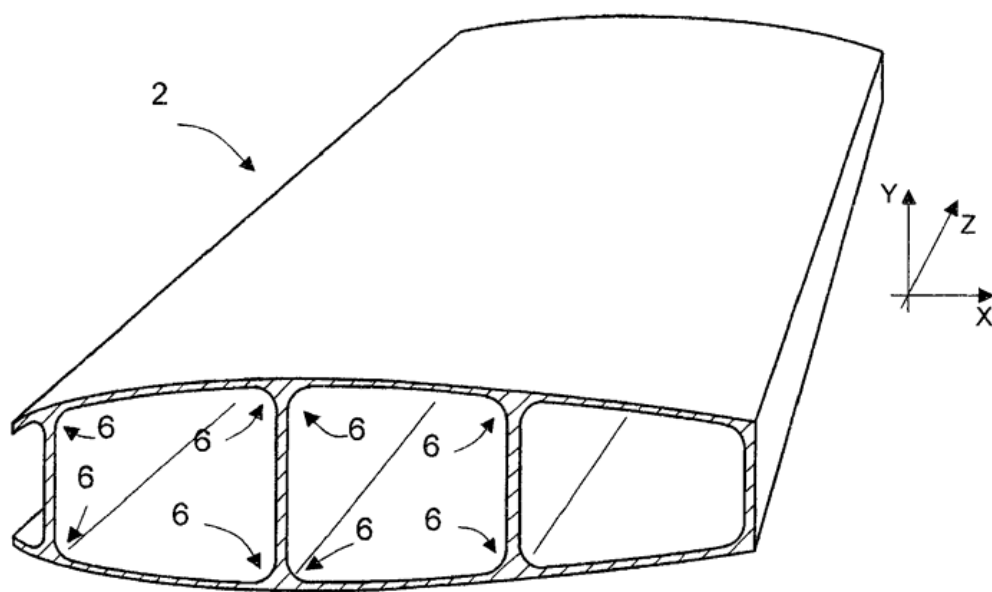


Fig.1a

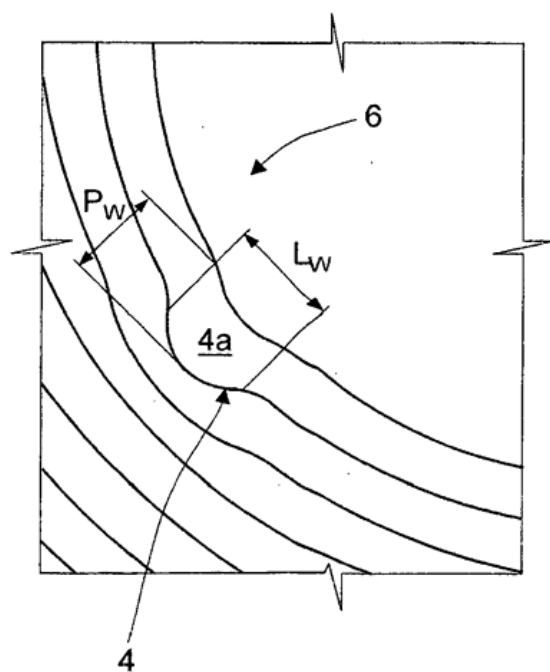
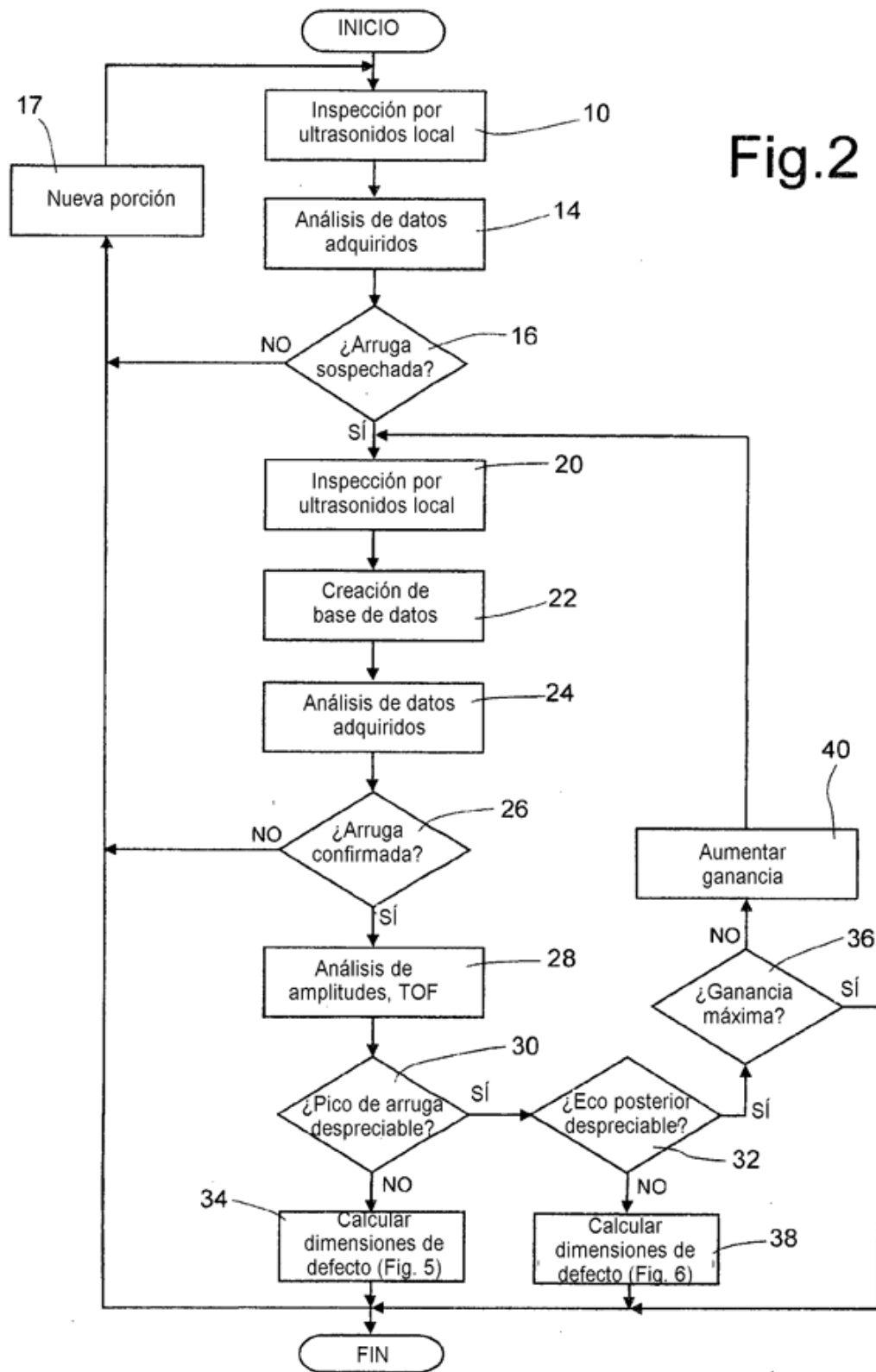


Fig.1b



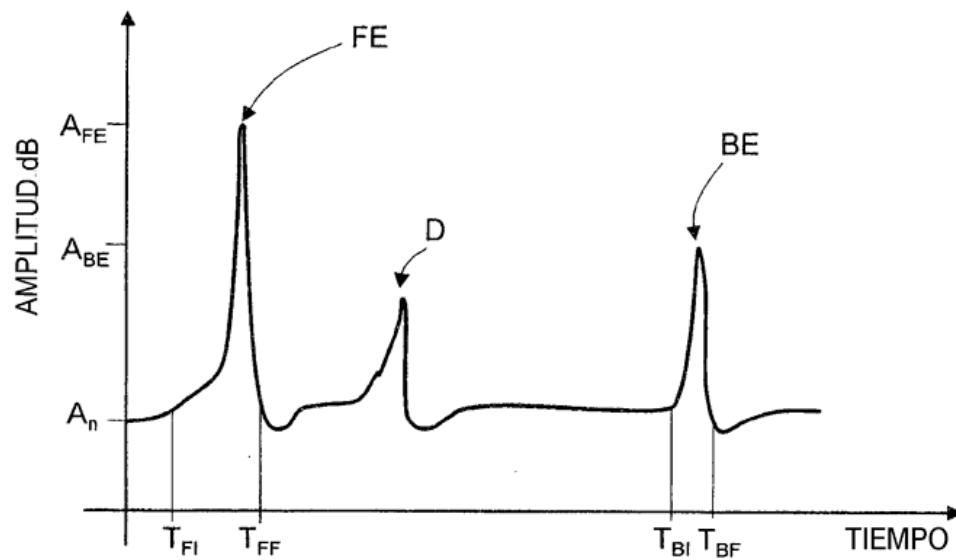


Fig.3

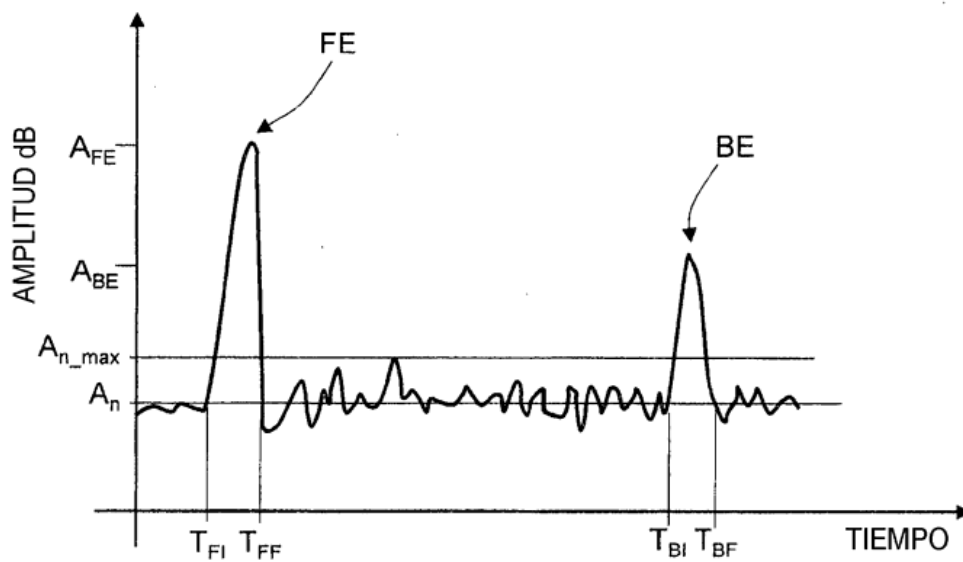


Fig.4

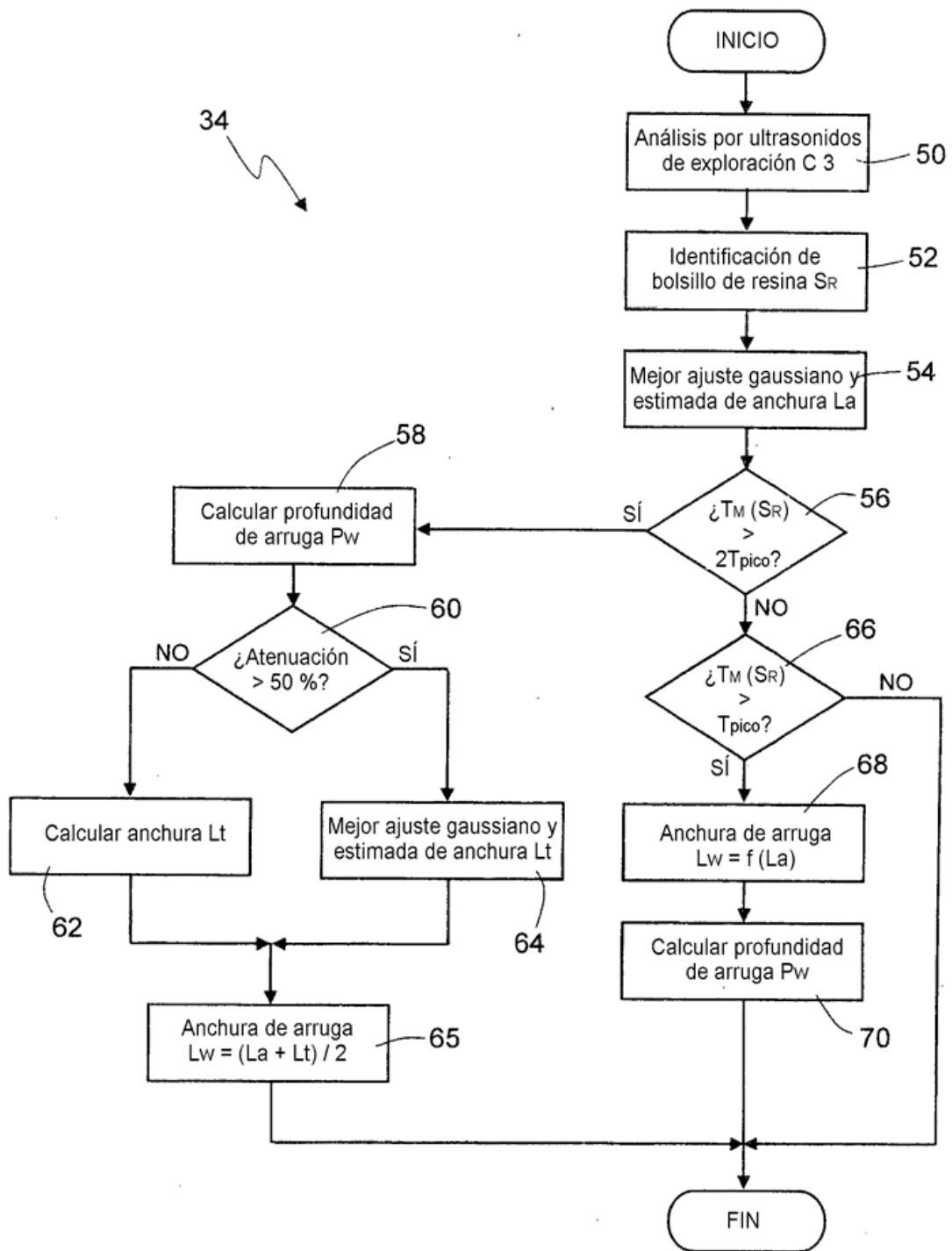


Fig.5

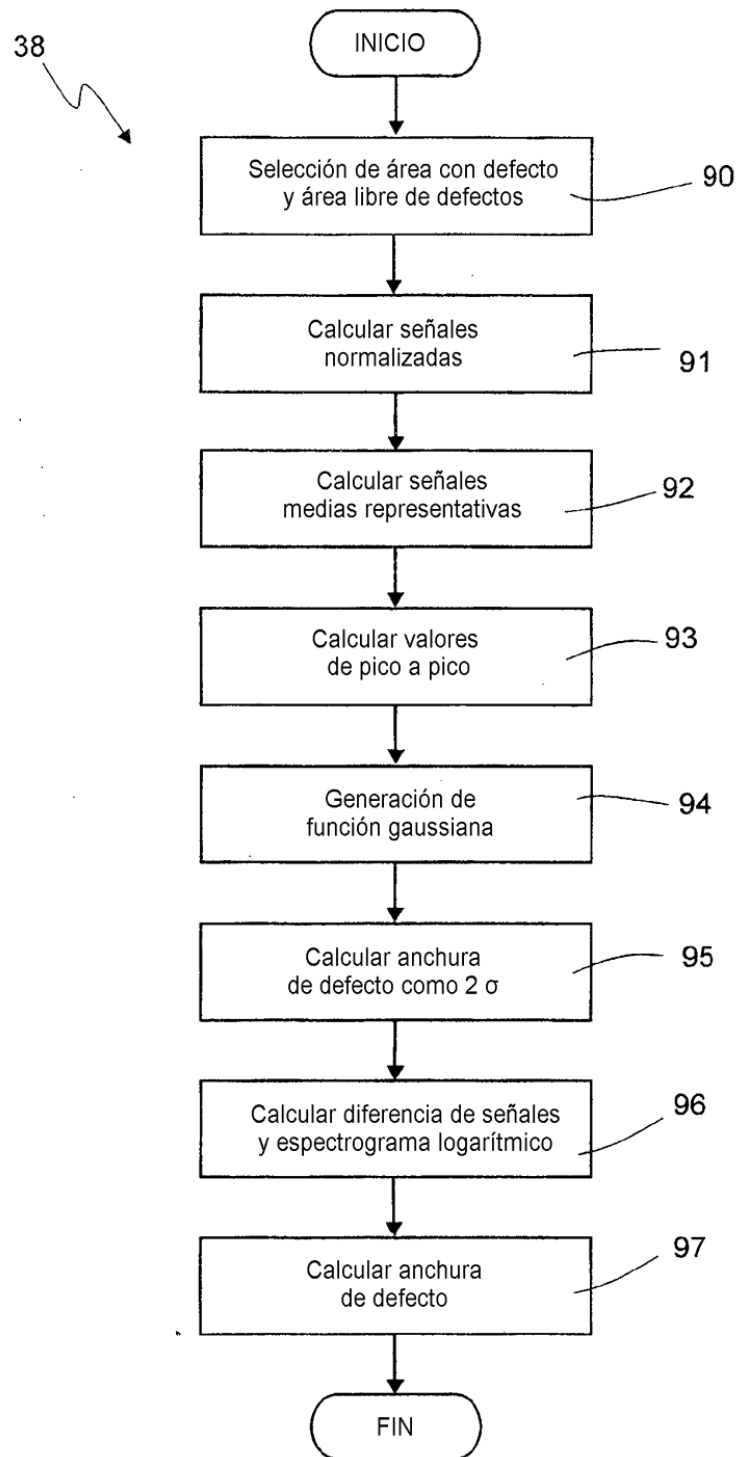


Fig.6

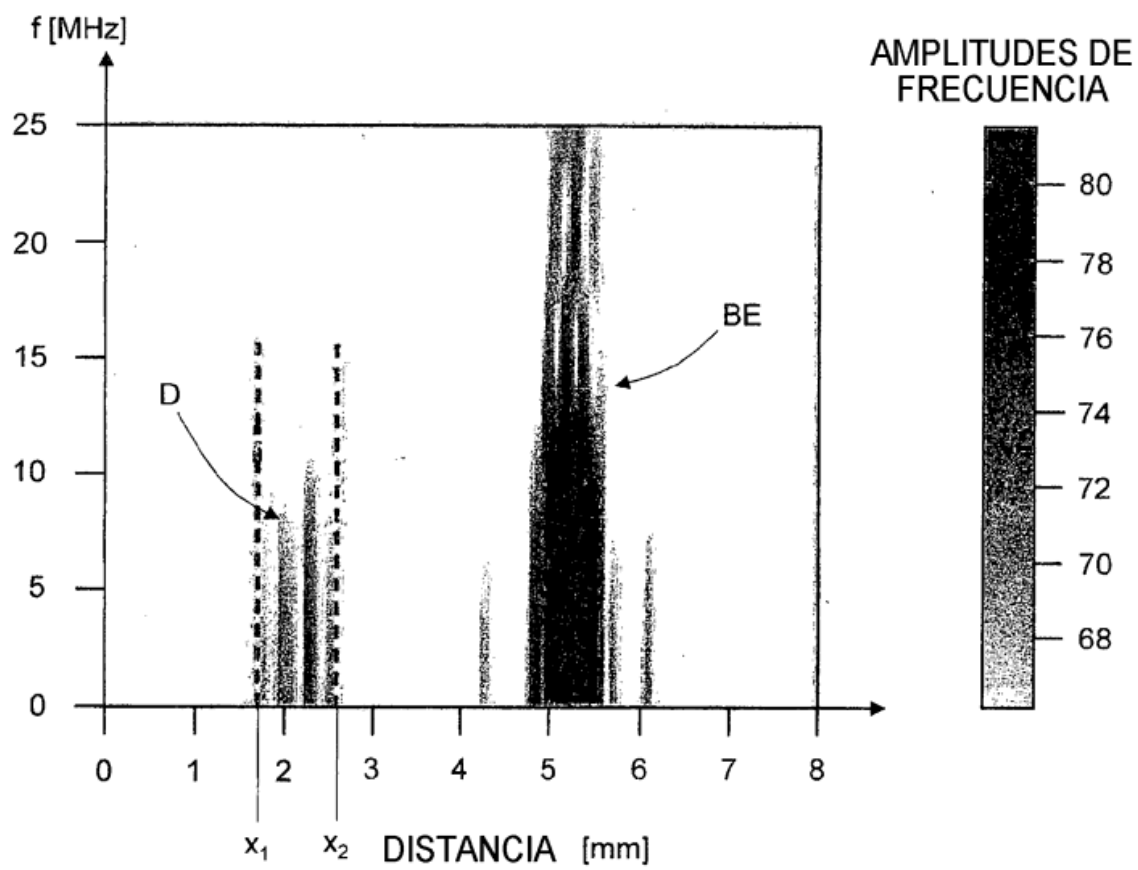


Fig.7

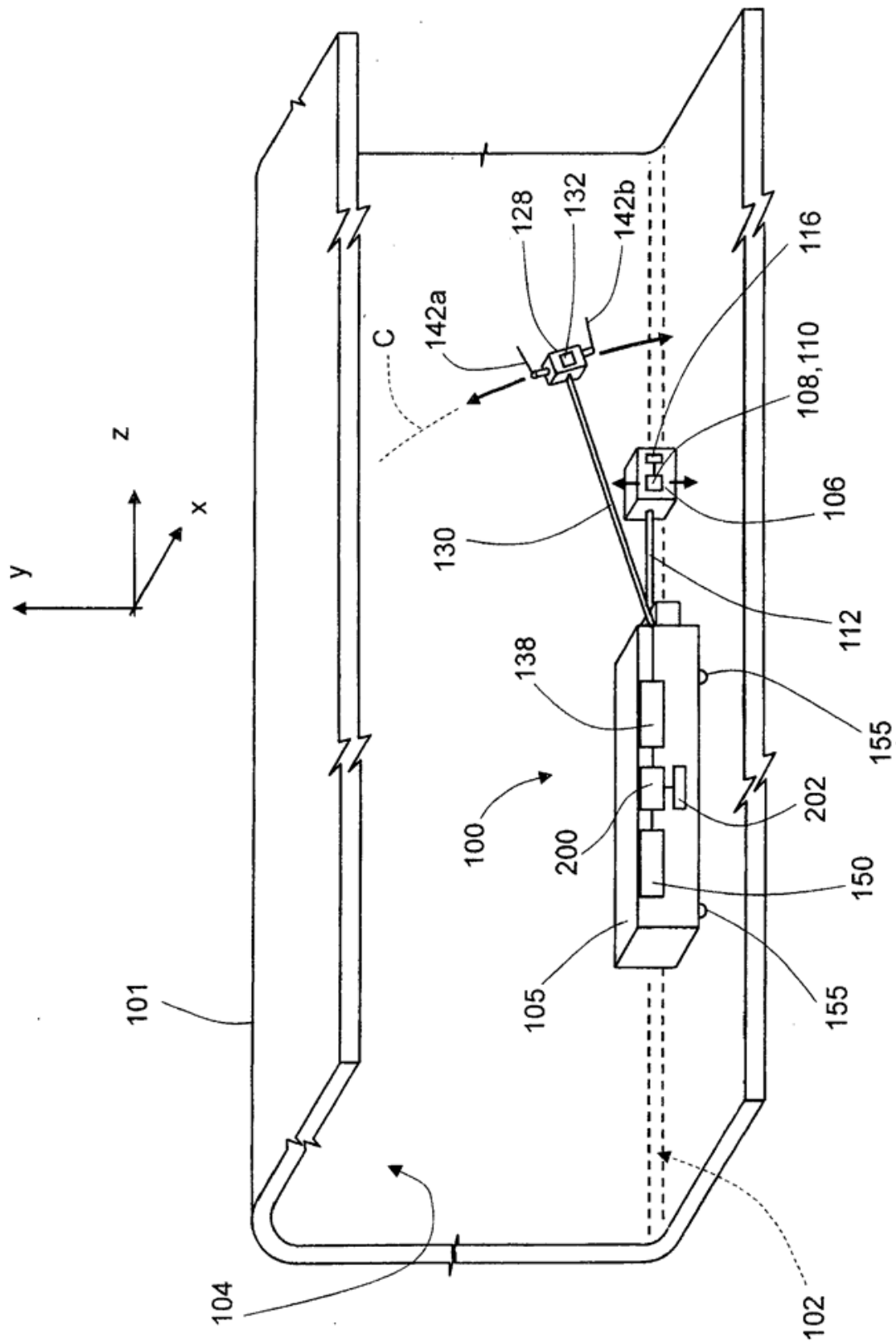


Fig. 8a

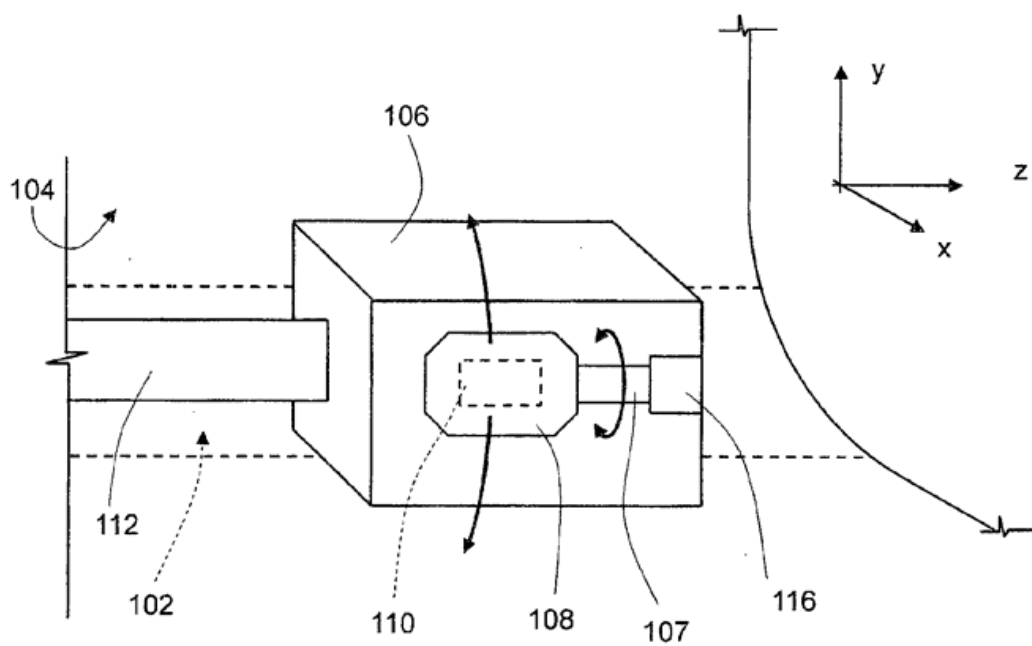


Fig.8b

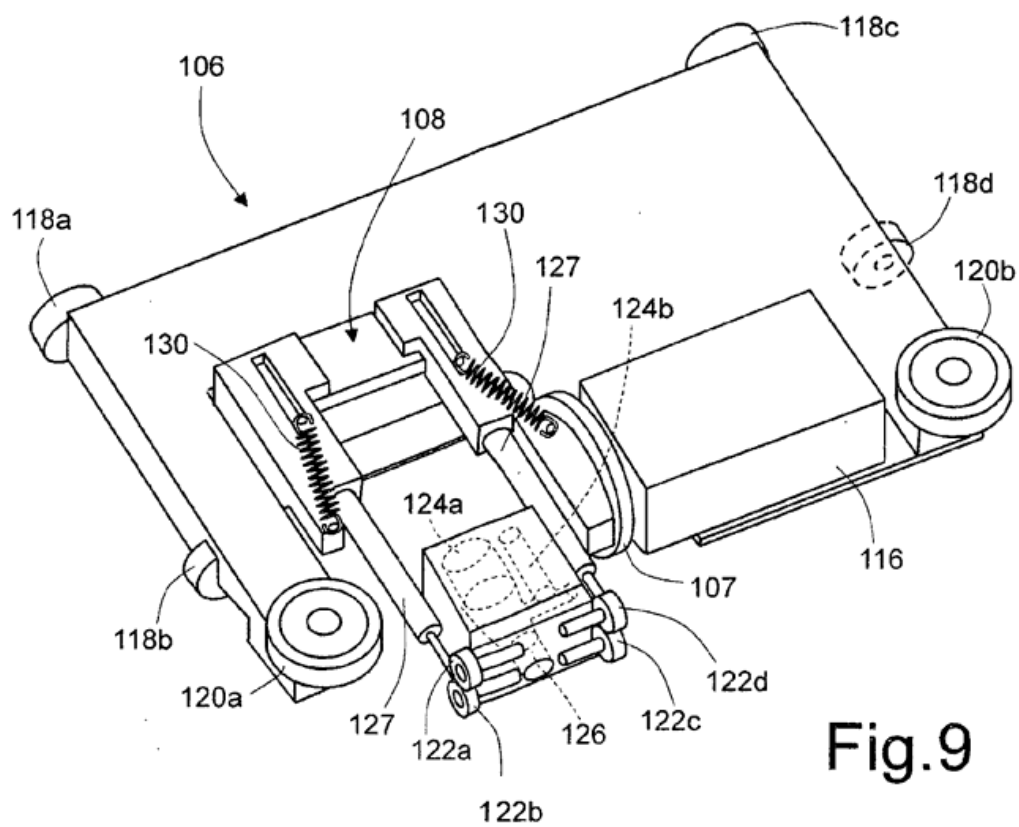


Fig.9

REFERENCIAS CITADAS EN LA DESCRIPCIÓN

5 Esta lista de referencias citadas por el solicitante es para conveniencia del lector. No forma parte del documento de la Patente Europea. Aunque se ha tenido mucho cuidado en la compilación de las referencias, no pueden excluirse errores u omisiones y la EPO declina responsabilidades por este asunto.

Documentos de patentes citadas en la descripción

10 * US 4475394 A [0018] * US 6637266 B [0019]