

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 644 882**

51 Int. Cl.:

**G01N 29/44**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.04.2009 PCT/EP2009/054379**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.10.2009 WO09130140**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.04.2009 E 09734018 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.07.2017 EP 2271928**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos de la porosidad de una pieza de material compuesto**

30 Prioridad:

**22.04.2008 FR 0852690**

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

**30.11.2017**

73 Titular/es:

**AIRBUS (100.0%)  
2 Rond-Point Émile Dewoitine  
31700 Blagnac, FR**

72 Inventor/es:

**DOMINGUEZ, NICOLAS**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 644 882 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**

Procedimiento y dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos de la porosidad de una pieza de material compuesto

5 La presente invención pertenece al ámbito del control no destructivo por ultrasonidos de piezas de material compuesto, en particular al control de la porosidad del material compuesto de las piezas en fase de producción.

Los procedimientos de control no destructivo por ultrasonidos son utilizados en numerosos ámbitos industriales, especialmente para el control de las piezas de material compuesto que comprenden fibras mantenidas en una matriz. Estos controles son particularmente importantes cuando debe garantizarse la integridad de las piezas en servicio, especialmente en el caso de construcciones aeronáuticas.

10 Un dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos comprende en general equipos para la inspección por ultrasonidos y equipos para el análisis de los datos recogidos durante la inspección.

Los equipos para la inspección consisten en al menos un transductor ultrasónico, que realiza una conversión de una señal, en general eléctrica, en una onda ultrasónica y viceversa, y en un generador/receptor de señales eléctricas que está conectado al transductor ultrasónico.

15 Los equipos para el análisis consisten en medios de visualización de los datos recogidos, y medios de cálculo para el tratamiento de los datos recogidos, como por ejemplo el aislamiento de ecos de ondas ultrasónicas, la determinación de niveles de potencia, etc.

20 En el caso de una pieza aeronáutica de material compuesto, la evaluación cuantitativa del nivel de porosidad del material compuesto que forma la citada pieza es una etapa particularmente importante del control de calidad en fase de producción de la citada pieza.

La porosidad corresponde a la presencia de burbujas en la matriz del material compuesto, que tienen dimensiones pequeñas (10  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ ) con respecto a las longitudes de las ondas ultrasónicas generalmente utilizadas (en general de 300  $\mu\text{m}$  a 3 mm).

25 La porosidad de la matriz del material compuesto reduce la resistencia mecánica máxima de la pieza, y conviene evaluar el nivel de porosidad correspondiente a fin de determinar si la resistencia mecánica de la citada pieza es suficiente para la aplicación que se haga de la misma.

Para evaluar este nivel de porosidad, es habitual medir la atenuación de una onda ultrasónica que atraviese la pieza.

30 Sin embargo, la interpretación del valor de atenuación medida, es decir la traducción en términos de nivel de porosidad del citado valor de atenuación, se considera compleja. La complejidad de interpretación reside en el hecho de que el valor de atenuación depende de numerosos parámetros, que dependen especialmente del transductor ultrasónico utilizado, del tipo de material compuesto que forma la pieza, del espesor de la citada pieza, etc.

35 Por la solicitud de patente US 2007/0089479, se conoce realizar una muestra en un material de referencia homogéneo (es decir que no sea de material compuesto) que presente inclusiones controladas representativas de las burbujas presentes en la matriz del material compuesto de la pieza, y efectuar una medición de atenuación ultrasónica sobre esta muestra, y comparar su resultado con el resultado de la inspección de la pieza de material compuesto cuya tasa de porosidad se busca determinar.

40 Esta solución presenta limitaciones debido a la no toma en cuenta de los fenómenos físicos que son la fuente de la atenuación en los materiales compuestos (presencia de fibras y viscoelasticidad de la resina), fenómenos que dependen de la frecuencia ultrasónica. Esto da como resultado una limitación de la gama de frecuencias para la cual la aproximación de un material compuesto por un material de referencia homogéneo es válida. La utilización de otro transductor cuya gama frecuencial no coincidiera con la que haya sido objeto de las validaciones induce por tanto errores en la evaluación del nivel de porosidad.

45 Por la solicitud de patente US2004/0054474, se conoce también estimar las propiedades mecánicas de una pieza de material compuesto, propiedades mecánicas que varían en el tiempo, que comprende las etapas de: a) medición con un transductor de una señal correspondiente a ondas ultrasónicas tras propagación en la muestra, b) comparación de la señal medida en la etapa a) con una señal calculada según un modelo analítico que tiene en cuenta por una parte una función de transferencia del transductor y la electrónica de recepción, y por otra propiedades acústicas previamente estimadas de la pieza, es decir valores de atenuación de referencia, c) actualización de las propiedades acústicas de la pieza en función de las diferencias entre la señal medida y la señal calculada.

50 La presente invención propone resolver los mencionados problemas estableciendo un conjunto de resultados de referencia correspondientes a varias muestras de referencia representativas de diferentes niveles de porosidad del material compuesto considerado. Estos resultados de referencia son obtenidos por cálculo a partir de un conjunto restringido de datos experimentales y hacen posible la evaluación de un nivel de porosidad para cualquier espesor de material y cualquiera que sea el transductor ultrasónico utilizado.

En un procedimiento no destructivo de evaluación de un nivel de porosidad de una pieza de material compuesto por medio de al menos un transductor ultrasónico de acuerdo con la reivindicación 1, el nivel de porosidad de la pieza es estimado por comparación de un valor de atenuación por la citada pieza de una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico con valores de atenuación de referencia de una onda ultrasónica del citado al

5 menos un transductor ultrasónico por muestras de referencia  $R_n^m$  de espesor  $e_m$  y representativos de niveles de porosidad  $P_n$  conocidos diferentes del material compuesto en el cual la pieza está fabricada.

El procedimiento de acuerdo con la invención está caracterizado por que los valores de atenuación de referencia son calculados sobre la base:

10 - de una función de onda previamente memorizada, representativa de una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico,

- y del resultado de un cálculo de filtrado de la función de onda por funciones de transferencia  $F_n^m$  previamente memorizadas, representativas de atenuaciones frecuenciales experimentadas por ondas ultrasónicas que atraviesan a las muestras de referencia  $R_n^m$

15 La función de onda es determinada en una etapa previa sin la pieza y sin la muestra de referencia  $R_n^m$ , midiendo una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico en un medio de acoplamiento, en condiciones próximas a las que deben ser puestas en práctica para la pieza.

Ventajosamente, para mejorar la precisión del nivel de porosidad estimado, el citado nivel de porosidad de la pieza es estimado comparando el valor de atenuación por la pieza con valores de atenuación de referencia calculados por al menos N muestras de referencia  $R_n^m$ , siendo N superior o igual a dos, de niveles de porosidad  $P_n$  conocidos  
20 diferentes  $1 \leq n \leq N$ , estando caracterizada cada muestra de referencia por una función de transferencia  $F_n^m$  propia.

En un modo preferido de puesta en práctica, las funciones de transferencia  $F_n^m$  son establecidas tras la determinación de un espesor de la pieza, y el espesor  $e_m$  de cada muestra de referencia  $R_n^m$  es próximo al espesor de la pieza.

En otro modo preferido de puesta en práctica, se calculan valores de atenuación de referencia previamente a la  
25 determinación del espesor de la pieza para M muestras de referencia  $R_n^m$ , por nivel de porosidad, de espesores diferentes  $e_m$  ( $1 \leq m \leq M$ ), siendo M superior o igual a dos. En este caso se calculan valores de atenuación de referencia para un espesor sensiblemente próximo a un espesor de la citada pieza por interpolación o extrapolación de los valores de atenuación de referencia por las muestras de referencia  $R_n^m$ , de espesores  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ .

30 En los dos modos de puesta en práctica precedentes, el nivel de porosidad para la pieza es estimado comparando el valor de atenuación por la citada pieza con los valores de atenuación de referencia calculados para los espesores próximos al de la citada pieza; el nivel de porosidad estimado es por ejemplo igual al nivel de porosidad para el cual ha sido calculado el valor de atenuación de referencia más próximo al valor de atenuación por la pieza, eventualmente el más próximo por valores superiores.

El procedimiento comprende igualmente en un modo particular de puesta en práctica una etapa en la cual se  
35 determina la función de transferencia  $F_n^m$  de una muestra de referencia  $R_n^m$  de nivel de porosidad  $P_n$  y de espesor  $e_m$  en el ámbito de las frecuencias calculando para valores de frecuencias  $f$  discretos la expresión:

$$F_n^m(f) = \exp\left(\frac{e_m}{ad_n}\right) \cdot \frac{|S_n(f)|}{A|S(f)|},$$

40 expresión en la cual  $S_n(f)$  es una medición de un espectro frecuencial de una onda ultrasónica que haya atravesado una muestra de referencia real  $R_n$  de espesor  $d_n$ , realizada de material compuesto del mismo tipo que el de la pieza y de nivel de porosidad  $P_n$ ,  $S(f)$  es una medición de un espectro frecuencial de una onda ultrasónica de iguales características que no haya atravesado a la citada muestra de referencia real  $R_n$ , a y A son factores positivos que dependen del modo de medición de los citados espectros frecuenciales  $S(f)$  y  $S_n(f)$ .

Ventajosamente, para reducir la cantidad de datos que deben ser memorizados, la función de transferencia  $F_n^m$  de la muestra de referencia  $R_n^m$ , de nivel de porosidad  $P_n$  y de espesor  $e_m$  es determinada según la expresión:

$$F_n^m(f) = \exp\left(-\frac{\alpha_n(f) \cdot e_m}{20}\right),$$

5 donde  $\alpha_n(f)$  es una función de atenuación de referencia previamente establecida que es determinada según la expresión:

$$\alpha_n(f) = \frac{1}{ad_n} \cdot 20 \cdot \log\left(\frac{A \cdot |S(f)|}{|S_n(f)|}\right),$$

10 Para amentar el número de niveles de porosidad conocidos utilizados para determinar el nivel de porosidad de la pieza, en un modo próximo de puesta en práctica se calculan valores de atenuación de referencia para niveles de porosidad intermedios por interpolación o extrapolación de los valores de atenuación de referencia obtenidos para las muestras de referencia  $R_n^m$  de niveles de porosidad  $P_n$ .

La descripción que sigue de modos de realización de la invención se hace refiriéndose a las figuras, en las cuales referencias idénticas designan elementos idénticos o análogos, que representan de manera no limitativa:

- Figura 1: una representación esquemática de un dispositivo de control no destructivo por ultrasonidos de acuerdo con la invención,
- 15 - Figura 2: una representación esquemática de las etapas de un procedimiento de evaluación de nivel de porosidad de acuerdo con la invención,
- Figura 3: una representación esquemática de un modo de determinación de una función de onda de un transductor ultrasónico,
- Figuras 4a y 4b: un ejemplo de una función de onda en los ámbitos temporal y frecuencial,
- 20 - Figuras 5a y 5b: una representación esquemática de un modo de caracterización de una muestra de referencia real,
- Figuras 6a y 6b: ejemplos de funciones de atenuación de referencia y de funciones de transferencia de acuerdo con la invención,
- 25 - Figuras 7a y 7b: un ejemplo de filtrado de una función de onda por una función de transferencia en los ámbitos frecuencial y temporal,
- Figuras 8a y 8b: ejemplos de modos de representación de valores de atenuación de referencia de acuerdo con la invención.

30 La presente invención concierne a un procedimiento de evaluación 6 de un nivel de porosidad de una pieza 2 de material compuesto que comprende fibras mantenidas en una matriz, por un control no destructivo por ultrasonidos de la citada pieza. La invención concierne igualmente a un dispositivo 1 para el control no destructivo del nivel de porosidad de la pieza de material compuesto 2.

35 Como está representado en la figura 1, el dispositivo 1 utilizado para el control no destructivo por ultrasonidos de la pieza de material compuesto 2 comprende equipos para la inspección ultrasónica, especialmente un transductor ultrasónico 100 y un generador/receptor 101 de señales, generalmente eléctricas, y equipos para el análisis de los datos recogidos en el transcurso de la inspección, tales como medios de cálculo 110 (un microcontrolador, un ordenador que dispone de un microprocesador, etc.) y medios de almacenamiento 111 (una memoria electrónica magnética, etc.) para memorizar los resultados de la inspección ultrasónica.

La pieza de material compuesto 2 es sumergida, de manera conocida, al menos parcialmente en un medio de acoplamiento 3.

40 El transductor 100 es colocado en general, para la evaluación de la porosidad, de modo que emita ondas ultrasónicas que tengan una incidencia sensiblemente normal a una cara delantera 2a de la pieza de material compuesto, enfrente del citado transductor.

El transductor 100 de la figura 1 es utilizado en emisión y en recepción, y mide ecos debidos a discontinuidades de impedancias acústicas.

Un eco, denominado « de cara » es recibido de una interfaz entre la cara delantera 2a de la pieza 2 y el medio de acoplamiento 3, y un eco, denominado « de fondo » es recibido en general de una interfaz entre el citado medio de acoplamiento y una cara trasera 2b de la citada pieza, situada en el lado de la pieza opuesto al transductor 100.

5 En el ejemplo representado en la figura 1, un eco puede ser recibido igualmente de una interfaz entre el medio de acoplamiento 3 y una placa reflectante 4, por ejemplo de vidrio, que está colocada enfrente de la cara trasera 2b de la pieza 2. La inspección es denominada entonces por « doble transmisión » debido a que las ondas ultrasónicas atraviesan dos veces la pieza 2

Es igualmente posible efectuar una inspección denominada por « transmisión », utilizando un transductor para la emisión en el lado de la cara delantera 2a, y un transductor para la recepción en el lado de la cara trasera 2b.

10 Para evaluar el nivel de porosidad de la pieza 2, se mide la atenuación por la citada pieza de una onda ultrasónica emitida por el transductor 100.

15 Por nivel de porosidad, hay que comprender un valor representativo de características estructurales o mecánicas de la pieza inducidas por la presencia de burbujas en la matriz del material compuesto. El nivel de porosidad es evaluado por ejemplo en forma de un porcentaje volúmico de « vacío » (es decir de burbujas) o de un nivel de abatimiento de la resistencia mecánica de la pieza.

En lo que sigue de la exposición, se utilizan las notaciones siguientes para las representaciones en los ámbitos frecuencial y temporal de funciones: una función indicada por H puede corresponder a una o a la otra de las representaciones, H(f) es la representación frecuencial de la función H, y H(t) es la representación temporal de la citada función H.

20 El procedimiento de evaluación 6 comprende una pluralidad de etapas 61, 62, 63, 64 y 65 que están representadas esquemáticamente en la figura 2. Hay que observar que en la práctica las etapas 62, 63 y eventualmente 64 son puestas en práctica preferentemente antes que la etapa 61. La etapa 65 es ejecutada en último lugar.

Los resultados de ciertas etapas son reproducibles y, si los citados resultados son memorizados para ser reutilizados, las citadas etapas no son necesariamente ejecutadas de nuevo.

25 En la etapa 61 del procedimiento de evaluación 6, se realiza la inspección por el transductor 100 de la pieza 2 de material compuesto y se calcula al menos un valor de atenuación por la citada pieza de una onda ultrasónica emitida por el transductor 100.

Las pérdidas en las interfaces, por ejemplo entre el medio de acoplamiento 3 por una parte y las caras delantera 2a y trasera 2b por otra, son igualmente medidas o calculadas, o compensadas por calibración.

30 En la etapa 62 del procedimiento de evaluación 6, se caracteriza el transductor 100, utilizado en la etapa 61.

La caracterización del transductor 100 consiste en la determinación de una función de onda  $F_0$ , representativa de las ondas ultrasónicas emitidas por el citado transductor, con las mismas regulaciones que las utilizadas para hacer el control de la etapa 61, y recibidas en ausencia de pieza de material compuesto.

35 La función de onda  $F_0$  es determinada por ejemplo colocando una placa reflectante 4 enfrente del transductor 100 en el medio de acoplamiento 3, tal como está representado en la figura 3, y midiendo el eco de una onda ultrasónica reflejada por la placa reflectante 4.

Preferentemente, la placa reflectante 4 está colocada a una distancia d del transductor 100, sensiblemente igual a la distancia entre el citado transductor y la cara delantera 2a de la pieza 2 en la etapa 61, especialmente en el caso de un transductor ultrasónico focalizado.

40 Un ejemplo de eco medido está representado en la figura 4a, Tal eco es una representación temporal  $F_0(t)$  de la función de onda  $F_0$  asociada al transductor 100.

La función de onda  $F_0(t)$  es preferentemente traspasada al ámbito de las frecuencias por ejemplo por transformada de Fourier, a fin de tener una función de onda  $F_0(f)$  en forma de un espectro frecuencial. El espectro frecuencial asociado al eco representado en la figura 4a está representado en la figura 4b.

45 Las frecuencias f consideradas para la función de onda  $F_0(f)$  son preferentemente valores discretos comprendidos en un intervalo  $[f_{\text{MIN}}, f_{\text{MÁX}}]$ . El intervalo  $[f_{\text{MIN}}, f_{\text{MÁX}}]$  es elegido de modo que lo fundamental de la potencia de las ondas ultrasónicas emitidas por cada transductor ultrasónico que pueda ser utilizado esté comprendido en el citado intervalo. En el ejemplo de la figura 4b,  $f_{\text{MIN}} = 0$  Hz y  $f_{\text{MÁX}} = 10$  MHz.

50 La función de onda  $F_0$  asociada al transductor 100 depende únicamente del transductor 100 y no depende de la pieza de material compuesto 2 que haya que controlar.

5 La función de onda asociada al transductor 100 es por tanto memorizada para ser reutilizada para evaluar el nivel de porosidad para otras piezas que la pieza 2 por medio del mismo transductor 100. En este caso, si la función de onda  $F_0$  ha sido previamente establecida y memorizada, la etapa 62 no es ejecutada necesariamente salvo por ejemplo de modo sensiblemente periódico para tener en cuenta la evolución en el tiempo de las características del transductor 100.

En el caso en que la inspección de la etapa 61 sea efectuada por transmisión es preferible determinar la función de onda asociada al par de transductores utilizados, en una configuración comparable a la representada en la figura 5a.

10 En la etapa 63 del procedimiento de evaluación 6, se determina al menos una función de transferencia  $F_n^m$ , representativa de una muestra de referencia  $R_n^m$  de espesor  $e_m$  y representativa de un nivel de porosidad  $P_n$  del material compuesto de la pieza 2.

Preferentemente, se determinan funciones de transferencia  $F_n^m$  para un número  $N$ , preferentemente superior o igual a 3, de niveles de porosidad  $P_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , diferentes, elegidos en un intervalo de interés de los niveles de porosidad, por ejemplo comprendido entre un nivel de porosidad representativo de un material compuesto sano, y un nivel de porosidad representativo de un material compuesto de resistencia mecánica insuficiente.

15 En la etapa 63, se determinan las funciones de transferencia  $F_n^m$  a partir de muestras de referencia, denominadas reales  $R_n$ ,  $1 \leq n \leq N$  cuyos espesores  $d_n$  pueden ser diferentes del espesor  $e_m$ .

Cada muestra de referencia real  $R_n$  es fabricada efectivamente en un material compuesto del mismo tipo que aquél en que es fabricada la pieza 2, y es representativa del nivel de porosidad  $P_n$  que es conocido.

20 En lo que sigue de la exposición, se considera que cuanto mayor es  $n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , más elevado es el nivel de porosidad  $P_n$ :  $P_1 < P_2 < \dots < P_n$ .

La al menos una función de transferencia  $F_n^m$  para el nivel de porosidad  $P_n$ ,  $1 \leq n \leq N$  es determinada emitiendo ondas ultrasónicas en dirección a la muestra de referencia real  $R_n$ , con un transductor ultrasónico (o dos transductores en el caso de una inspección por transmisión) que no es necesariamente el transductor 100 utilizado en la etapa 61.

25 La al menos una función de transferencia  $F_n^m$  para el nivel de porosidad  $P_n$ ,  $1 \leq n \leq N$  es determinada por ejemplo a partir de un espectro frecuencial  $S(f)$  de una onda ultrasónica que no haya atravesado la muestra de referencia real  $R_n$  y de un espectro frecuencial  $S_n(f)$  de una onda ultrasónica que haya atravesado la citada muestra de referencia real, que son medidos preferentemente en el intervalo  $[f_{\text{MÍN}}, f_{\text{MÁX}}]$  anteriormente descrito.

30 En el caso de una medición de los espectros frecuenciales por transmisión, tal como está representado en las figuras 5a y 5b, utilizando un transductor en emisión 50 y un transductor en recepción 51, el espectro frecuencial  $S(f)$  es medido sin la muestra de referencia real  $R_n$  (véase la figura 5a) y el espectro frecuencial  $S_n(f)$  es medido intercalando la citada muestra de referencia entre los transductores 50 y 51 (véase la figura 5b).

35 En un modo preferido de puesta en práctica, se determina una función intermedia  $\alpha_n(f)$ , denominada función de atenuación de referencia, calculando, para cada frecuencia  $f$  considerada en el intervalo  $[f_{\text{MÍN}}, f_{\text{MÁX}}]$ , la expresión siguiente:

$$\alpha_n(f) = \frac{1}{d_n} \cdot 20 \cdot \log \left( \left( \frac{T \cdot |S(f)|}{|S_n(f)|} \right) \right)$$

Expresión en la cual  $T$  es un coeficiente de transmisión, que tiene en cuenta las pérdidas en las interfaces correspondientes a una cara delantera y una cara trasera de la muestra de referencia real  $R_n$ .

El coeficiente  $T$ , cuyo valor es calculado o bien medido, es igual a la expresión siguiente:

40

$$T = \frac{4Z_{\text{MC}} \cdot Z_{\text{CO}}}{(Z_{\text{MC}} + Z_{\text{CO}})^2}$$

donde  $Z_{\text{MC}}$  es la impedancia acústica del medio de acoplamiento y  $Z_{\text{CO}}$  es la impedancia acústica del material compuesto.

En el caso de una inspección por doble transmisión, la función de atenuación de referencia  $\alpha_n(f)$  es calculada según la expresión:

$$\alpha_n(f) = \frac{1}{2d_n} \cdot 20 \cdot \log \left( \left( \frac{T^2 \cdot |S(f)|}{|S_n(f)|} \right) \right)$$

5 En efecto, debido a la doble transmisión a través de la muestra de referencia  $R_n$ , el coeficiente de transmisión  $T$  y el espesor  $d_n$  de la citada muestra de referencia deben ser tenidos en cuenta dos veces.

La función de atenuación de referencia  $\alpha_n(f)$  es igualmente calculable según otros métodos, por ejemplo comparando un espectro frecuencial del eco de cara y un espectro frecuencial del eco de fondo, y se entiende que el cálculo de la citada función de atenuación no está limitado a los métodos descritos. De manera más general, la función de atenuación de referencia  $\alpha_n(f)$  es calculada según la expresión:

10

$$\alpha_n(f) = \frac{1}{a \cdot d_n} \cdot 20 \cdot \log \left( \frac{A |S(f)|}{|S_n(f)|} \right),$$

donde  $a$  y  $A$  son factores reales que dependen del modo de inspección puesto en práctica para medir los espectros frecuenciales  $S(f)$  y  $S_n(f)$  ( $a = 1$  y  $A = T$  para una inspección por transmisión,  $a = 2$  y  $A = T^2$  para una inspección por doble transmisión).

15 La función de atenuación de referencia  $\alpha_n(f)$  es ventajosa debido a que la misma es independiente del espesor  $d_n$  de la muestra de referencia real  $R_n$  y permite calcular, para cada nivel de porosidad  $P_n$  considerado, funciones de transferencia  $F_n^m$  de muestras  $R_n^m$  para espesores  $e_m$  diferentes, especialmente de  $d_n$ .

La función de transferencia  $F_n^m(f)$  para el nivel de porosidad  $P_n$  y para el espesor  $e_m$  es determinada calculando para cada frecuencia considerada:

$$F_n^m(f) = \exp \left( - \frac{\alpha_n(f) \cdot e_m}{20} \right).$$

20 La función de transferencia  $F_n^m(f)$  es igualmente calculable directamente a partir de los espectros frecuenciales  $S(f)$  y  $S_n(f)$  y el cálculo o no de las citadas funciones de atenuación de referencia depende del modo de puesta en práctica elegido. La función de transferencia  $F_n^m(f)$  es determinada por ejemplo directamente según la expresión general siguiente:

$$F_n^m(f) = \exp \left( \frac{e_m}{a d_n} \right) \cdot \frac{|S_n(f)|}{A |S(f)|},$$

25 Si el espesor de la pieza 2 es conocido antes de determinar las funciones de transferencia  $F_n^m$ , las citadas funciones de transferencia son determinadas para un espesor  $e_m$  próximo al espesor de la pieza 2. Llegado el caso, las funciones de transferencia  $F_n^m$  son establecidas para un número  $M$  de espesores  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ .

30 Funciones de atenuación de referencia obtenidas para  $N = 3$  niveles de porosidad  $P_1$  a  $P_3$  están representadas en la figura 6a. Funciones de transferencia obtenidas para  $M = 3$  valores de espesores  $e_1$  a  $e_3$  están representadas en la figura 6b para un nivel de porosidad  $P_n$ .

Debido a la utilización de muestras de referencia reales  $R_n$  fabricadas en un material compuesto del mismo tipo que el de la pieza 2, se tiene en cuenta la dependencia frecuencial de la atenuación del material compuesto. Además, las funciones de transferencia son calculadas para varios espesores diferentes a partir de un número restringido de muestras de referencia real  $R_n$ .

35 Hay que observar que las funciones de atenuación de referencia y/o las funciones de transferencia no dependen del o de los transductores ultrasónicos utilizados en la etapa 61 sino solamente de las características de las muestras de

referencia reales  $R_n$ . Las funciones de atenuación de referencia y/o las funciones de transferencia son memorizadas para ser reutilizadas para evaluar la porosidad en material compuesto del mismo tipo, independientemente del transductor utilizado.

5 Es igualmente importante observar que las funciones de atenuación de referencia y/o las funciones de transferencia tales como vistas anteriormente caracterizan la atenuación intrínseca del material compuesto considerado y por tanto son independientes de las pérdidas en las interfaces. La compensación de las pérdidas en las interfaces es efectuada generalmente durante la etapa 61 por calibración; en el caso contrario esta compensación es efectuada por ejemplo de manera conocida por pos-tratamiento de la medición de la etapa 61.

10 En la etapa 64 del procedimiento de evaluación 6 de acuerdo con la invención, se calculan valores de atenuación de referencia de ondas ultrasónicas del transductor 100 por las muestras de referencia  $R_n^m$ , utilizando la función de onda  $F_0$  característica del transductor 100 y las funciones de transferencia  $F_n^m$  ( $1 \leq m \leq M$ ,  $1 \leq n \leq N$ ) características de las muestras de referencia.

15 Para simular la atenuación de ondas ultrasónicas del transductor 100 por la muestra de referencia  $R_n^m$  de espesor  $e_m$  y de nivel de porosidad  $P_n$ , la función de onda  $F_0$  asociada al transductor 100 es filtrada por la función de transferencia  $F_n^m$ .

El filtrado es calculado de manera conocida, en el ámbito temporal o el ámbito frecuencial. En el caso de un filtrado calculado en el ámbito frecuencial, se calcula el producto de la función de transferencia por la función de onda  $F_n^m(f) \cdot F_0(f)$  para cada frecuencia  $f$  considerada en el intervalo  $[f_{\text{MÍN}}, f_{\text{MÁX}}]$ .

20 Un ejemplo que ilustra el cálculo del filtrado en el ámbito frecuencial está representado en la figura 7a. El resultado del cálculo del filtrado está igualmente representado en el ámbito temporal en la figura 7b, con la referencia  $(F_0 * F_n^m)(t)$ .

25 Se calcula un valor de atenuación de referencia para cada muestra de referencia  $R_n^m$  ( $1 \leq m \leq M$ ,  $1 \leq n \leq N$ ), por ejemplo calculando la relación de las potencias de la función de onda  $F_0$  antes y después del filtrado, siendo calculadas las citadas potencias por integración de los espectros frecuenciales  $F_0(f)$  y  $F_n^m(f) \cdot F_0(f)$ . El valor de atenuación de referencia es estimado en otro modo de cálculo en el ámbito temporal calculando una relación de los valores de los extremos de la función de onda  $F_0(t)$  antes y después del filtrado.

30 Los valores de atenuación de referencia son atenuaciones absolutas, o atenuaciones de referencia relativas, es decir definidas con respecto a una muestra de referencia representativa de un material compuesto sano. La figura 8a y la figura 8b son representaciones de valores de atenuación de referencia correspondientes a atenuaciones absolutas por una parte y a atenuaciones relativas por otra.

35 En un modo particular de puesta en práctica, se calculan valores de atenuación de referencia para niveles de porosidad intermedios, por interpolación o extrapolación de los valores de atenuación de referencia de las muestras de referencia  $R_n^m$ . En particular se ha verificado que una interpolación lineal es conservadora por que el nivel de abatimiento mecánico para un nivel de porosidad interpolado linealmente es siempre superior al nivel de abatimiento mecánico real del material correspondiente.

En el caso en que el espesor de la pieza 2 no sea conocido en la etapa 63, se han calculado preferentemente funciones de transferencia  $F_n^m$  para un conjunto de espesores  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ . Ventajosamente se determinan valores de atenuación de referencia para el espesor de la citada pieza, por interpolación o extrapolación para las muestras de referencia  $R_n^m$  de espesores  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ .

40 El espesor efectivo de la pieza es determinado por ejemplo midiendo un retardo del eco de fondo con respecto al eco de cara. La velocidad de fase de la onda ultrasónica en la pieza 2 de material compuesto y el retardo medido permiten estimar el espesor de la citada pieza. Si la velocidad de fase no es conocida, la misma es estimada por ejemplo en función de las atenuaciones de los ecos medidos con respecto a una muestra de referencia representativa de un material compuesto sano, utilizando relaciones conocidas como las relaciones de Kramers-Krönig.



Los valores de atenuación de referencia así calculados y los parámetros correspondientes, es decir los niveles de porosidad y espesores correspondientes, forman un conjunto de datos de referencia cuyos formatos de representación son variables y no están limitados a los formatos descritos.

5 En la etapa 65 del procedimiento de evaluación 6, se estima el nivel de porosidad de la pieza de material compuesto 2 comparando el valor de atenuación obtenido con el transductor 100 en la citada pieza, medido en la etapa 61, con los valores de atenuación de referencia establecidos en la etapa 64.

10 El nivel de porosidad de la pieza 2 es estimado por comparación del valor de atenuación por la pieza 2 y valores de atenuación de referencia establecidos para los espesores próximos al espesor de la citada pieza. Por ejemplo, el nivel de porosidad estimado es igual al nivel de porosidad para el cual se ha establecido el valor de atenuación de referencia más próximo al valor de atenuación de la pieza 2, eventualmente el más próximo por valores superiores.

La invención concierne igualmente al dispositivo 1 de control no destructivo del nivel de porosidad de la pieza 2 de material compuesto, adaptado para poner en práctica el procedimiento de acuerdo con la invención.

15 El dispositivo 1 comprende los elementos de un sistema de control no destructivo por ultrasonidos conocido, especialmente medios de cálculo 110 y medios de almacenamiento 111 en los cuales son memorizados los resultados de la inspección ultrasónica de la pieza inspeccionada.

El dispositivo 1 comprende además medios de almacenamiento 111a en los cuales son memorizadas temporalmente funciones de transferencia para al menos el tipo de material compuesto que forma la citada pieza, y ventajosamente para una pluralidad de tipos de materiales compuestos diferentes.

20 El dispositivo 1 comprende en un modo particular de realización medios de almacenamiento 111b en los cuales son memorizadas funciones de ondas para al menos un transductor 100 puesto en práctica, y ventajosamente para una pluralidad de transductores ultrasónicos diferentes.

El dispositivo 1 comprende medios de selección para seleccionar en función del tipo de material compuesto de la pieza 2 inspeccionada y del transductor utilizado para la inspección ultrasónica de la citada pieza:

- 25
- las funciones de transferencia correspondientes al material compuesto de la pieza inspeccionada, en los medios de almacenamiento 111a,
  - la función de onda correspondiente al transductor puesto en práctica para la inspección, en los medios de almacenamiento 111b.

El dispositivo 1 comprende igualmente medios de cálculo 110a de los valores de atenuación de referencia entre la función de onda y los resultados de filtrados de onda por las funciones de transferencia.

30 Ventajosamente, los citados medios de cálculo 110a y los medios de cálculo 110 son los mismos.

35 En un modo particular de realización, el dispositivo comprende medios de determinación del espesor de la citada pieza, y los medios de selección seleccionan en los medios de almacenamiento 111a las funciones de transferencia correspondientes al espesor de la pieza 2. Si las citadas funciones de transferencia no se encuentran en los citados medios de almacenamiento, las mismas son calculadas por los medios de cálculo 110a en función de las funciones de transferencia presentes en los citados medios de almacenamiento.

La obtención de los valores de atenuación de referencia es por tanto poco compleja y poco cara porque los citados valores de atenuación de referencia son calculados a partir de un número restringido de datos experimentales que son reutilizables para otras configuraciones de control.

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento (6) no destructivo de evaluación de un nivel de porosidad de una pieza (2) de material compuesto por medio de al menos un transductor ultrasónico (100), en cuyo citado procedimiento se determina un valor de atenuación por la citada pieza de una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico (100),  
 5 siendo estimado el nivel de porosidad de la citada pieza por una comparación del valor de atenuación por la pieza (2) con valores de atenuación de referencia de una onda ultrasónica del citado al menos un transductor ultrasónico por muestras de referencia  $R_n^m$  de espesor  $e_m$  y representativas de niveles de porosidad  $P_n$  conocidos diferentes del material compuesto de la citada pieza,  $1 \leq n \leq N$ , siendo  $N$  superior o igual a dos, estando caracterizado el procedimiento (6) por que los valores de atenuación de referencia son calculados sobre la base:
- 10 - de una función de onda  $F_0$ , previamente memorizada, representativa de una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico (100), y
- del resultado de cálculos de filtrado de la citada función de onda por funciones de transferencia  $F_n^m$ , previamente memorizadas, representativas de atenuaciones frecuenciales experimentadas por ondas ultrasónicas que atraviesan las muestras de referencia  $R_n^m$ .
- 15 2. Procedimiento (6) de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende una etapa previa en la cual la función de onda  $F_0$  es determinada sin la pieza (2) y sin las muestras de referencia  $R_n^m$ , midiendo una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico (100) en un medio de acoplamiento (3) en condiciones próximas a las que deben ser puestas en práctica para la citada pieza.
3. Procedimiento (6) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 2, en el cual las funciones de transferencia  $F_n^m$   
 20 son establecidas tras la determinación de un espesor de la pieza (2), y el espesor  $e_m$  de cada muestra de referencia  $R_n^m$  es próximo al citado espesor de la pieza.
4. Procedimiento (6) de acuerdo con una de las reivindicaciones 1 a 2, en el cual se calculan valores de atenuación de referencia para cada nivel de porosidad  $P_n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , para  $M$  muestras de referencia  $R_n^m$  de espesores diferentes  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ , siendo  $M$  superior o igual a dos, previamente a la determinación de un espesor de la pieza  
 25 (2), y en cuyo dicho procedimiento se calculan valores de atenuación de referencia para un espesor próximo al espesor de la citada pieza por interpolación o extrapolación de los valores de atenuación de referencia por las muestras de referencia  $R_n^m$  de espesores  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ .
5. Procedimiento (6) de acuerdo con una de las reivindicaciones 3 o 4, en el cual el nivel de porosidad para la pieza  
 30 (2) es estimado comparando el valor de atenuación por la citada pieza con los valores de atenuación de referencia calculados para un espesor próximo al espesor de la citada pieza, y el nivel de porosidad estimado es igual al nivel de porosidad para el cual se ha calculado un valor de atenuación de referencia próximo al valor de atenuación por la pieza (2).
6. Procedimiento (6) de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, que comprende una etapa en la cual la función de transferencia  $F_n^m$  de una muestra de referencia  $R_n^m$  de nivel de porosidad  $P_n$  y de espesor  $e_m$  es  
 35 determinada en el ámbito de las frecuencias calculando para valores de frecuencias  $f$  discretos la expresión:

$$F_n^m(f) = \exp\left(\frac{e_m}{ad_n}\right) \cdot \frac{|S_n(f)|}{A|S(f)|},$$

en la cual  $S_n(f)$  es una medición de un espectro frecuencial de una onda ultrasónica que haya atravesado una muestra de referencia real  $R_n$  de espesor  $d_n$  realizada de material compuesto del mismo tipo que el de la pieza (2) y de nivel de porosidad  $P_n$ ,  $S(f)$  es una medición de un espectro frecuencial de una onda ultrasónica de iguales  
 40 características que no haya atravesado la citada muestra de referencia real  $R_n$ ,  $a$  y  $A$  son factores positivos que dependen del modo de medición de los citados espectros frecuenciales  $S(f)$  y  $S_n(f)$ .

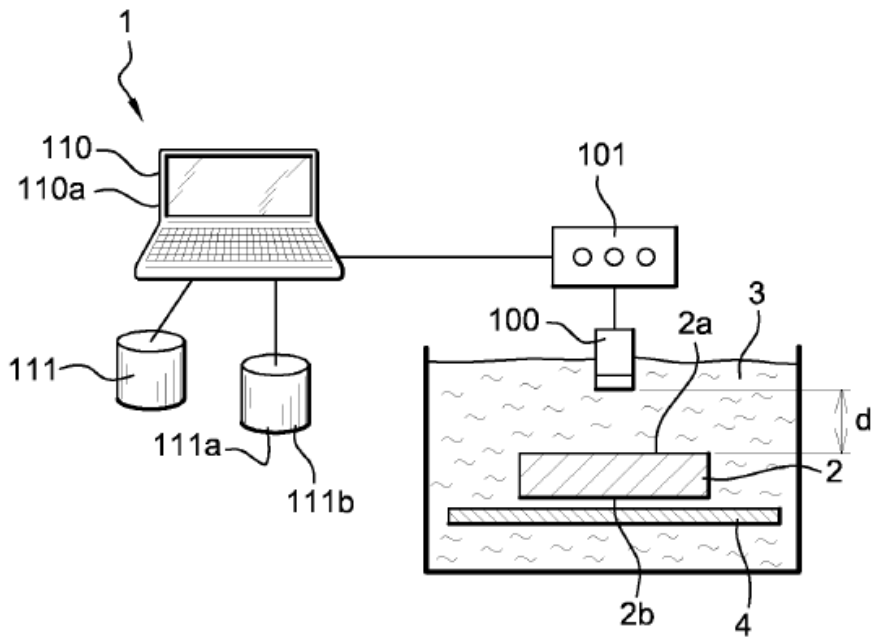
7. Procedimiento (6) de acuerdo con la reivindicación 6, en el cual la función de transferencia  $F_n^m$  de la muestra de referencia  $R_n^m$  de nivel de porosidad  $P_n$  y de espesor  $e_m$  es determinada según la expresión:

$$F_n^m(f) = \exp\left(-\frac{\alpha_n(f) \cdot e_m}{20}\right)$$

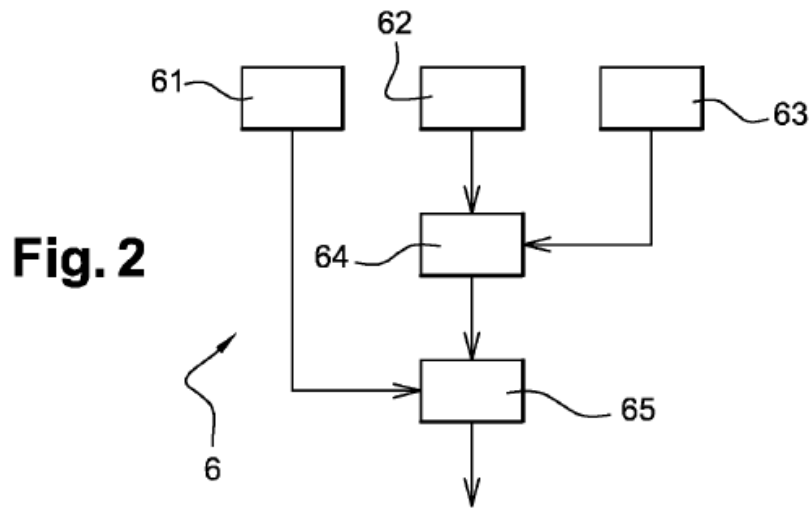
donde  $\alpha_n(f)$  es una función de atenuación de referencia previamente establecida que es determinada según la expresión:

$$\alpha_n(f) = \frac{1}{a \cdot d_n} \cdot 20 \cdot \log\left(\frac{A|S(f)|}{|S_n(f)|}\right),$$

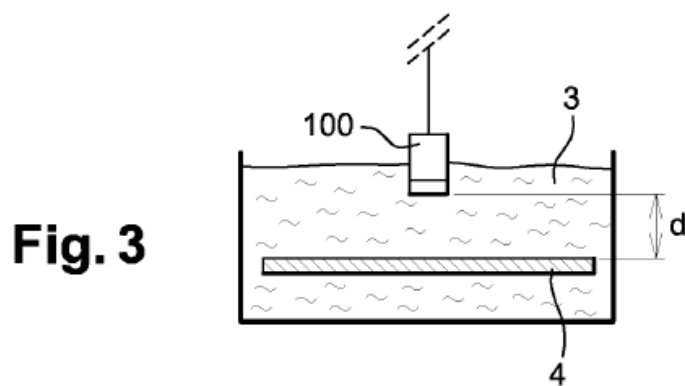
- 5 8. Procedimiento (6) de acuerdo con una de las reivindicaciones precedentes, en el cual el nivel de porosidad de la pieza (2) es estimado por comparación del valor de atenuación por la citada pieza con valores de atenuación de referencia para niveles de porosidad intermedios, que son calculados por interpolación o extrapolación de los valores de atenuación de referencia obtenidos para las muestras de referencia  $R_n^m$ .
- 10 9. Dispositivo (1) de control no destructivo por ultrasonidos de un nivel de porosidad de una pieza (2) de material compuesto por medio de al menos un transductor ultrasónico (100), por comparación de un valor de atenuación por la citada pieza de una onda ultrasónica emitida por el al menos un transductor ultrasónico (100) con valores de atenuación de referencia de ondas ultrasónicas del citado al menos un transductor ultrasónico por muestras de referencia  $R_n^m$  de espesor  $e_m$  y representativas de niveles de porosidad  $P_n$  conocidos diferentes del material compuesto de la citada pieza (2),  $1 \leq n \leq N$ , siendo  $N$  superior o igual a dos, cuyo citado dispositivo comprende
- 15 medios de cálculo (110) del valor de atenuación por la pieza (2), estando caracterizado el dispositivo (1) por que el mismo comprende
- medios de almacenamiento (111a) en los cuales son memorizadas funciones de transferencia  $F_n^m$  representativas de las atenuaciones frecuenciales introducidas por las muestras de referencia  $R_n^m$ ,
  - medios de almacenamiento (111b) en los cuales es memorizada una función de onda  $F_0$  representativa de las ondas ultrasónicas emitidas por el al menos un transductor ultrasónico (100),
  - medios de cálculo (110a) de los valores de atenuación de referencia sobre la base de la citada al menos una función de onda  $F_0$  y del resultado de cálculos de filtrados de la citada función de onda por las funciones de transferencia.
- 20 10. Dispositivo (1) de acuerdo con la reivindicación 9, en el cual en los medios de almacenamiento (111a) son memorizadas funciones de transferencia para muestras de referencia representativas de una pluralidad de tipos de materiales compuestos diferentes, y cuyo dicho dispositivo comprende medios de selección para seleccionar en los citados medios de almacenamiento las funciones de transferencia  $F_n^m$  de las muestras de referencia  $R_n^m$  representativas del material compuesto del mismo tipo que el de la pieza (2).
- 25 11. Dispositivo (1) de acuerdo con la reivindicación 10, que comprende medios de determinación de un espesor de la pieza (2), y en el cual en los medios de almacenamiento (111a) son memorizadas funciones de transferencia para  $M$  muestras de referencia  $R_n^m$  de espesores diferentes  $e_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ , siendo  $M$  superior o igual a dos, y en el cual los medios de selección seleccionan las funciones de transferencia  $F_n^m$  de muestras de referencia de espesor sensiblemente próximo al espesor de la citada pieza para estimar el nivel de porosidad de la citada pieza.
- 30



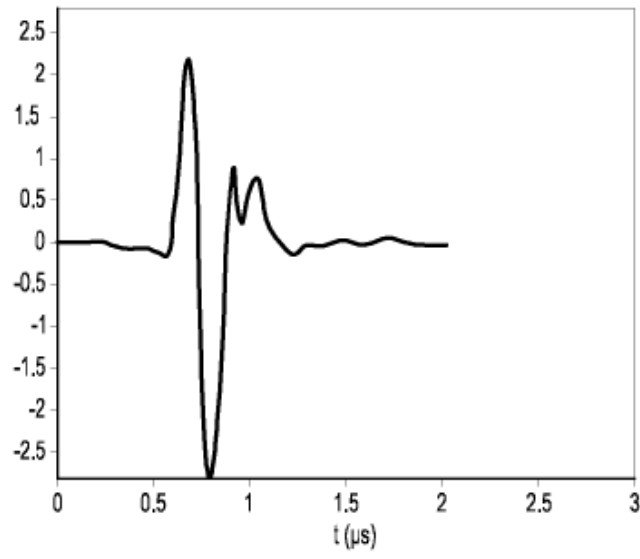
**Fig. 1**



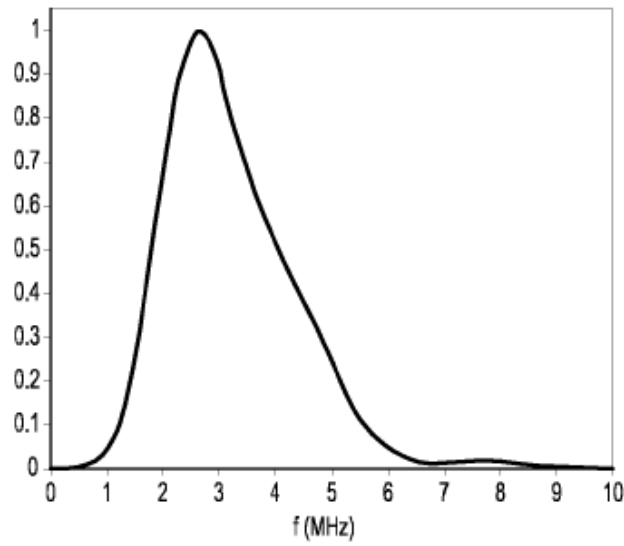
**Fig. 2**



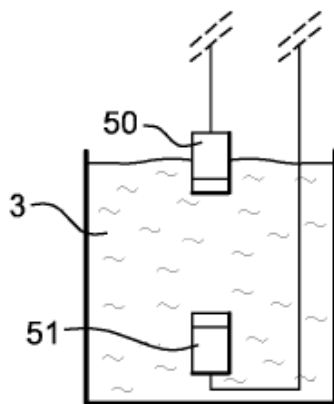
**Fig. 3**



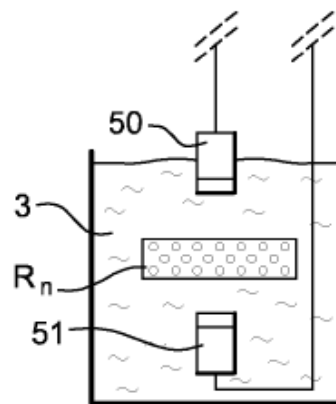
**Fig. 4a**



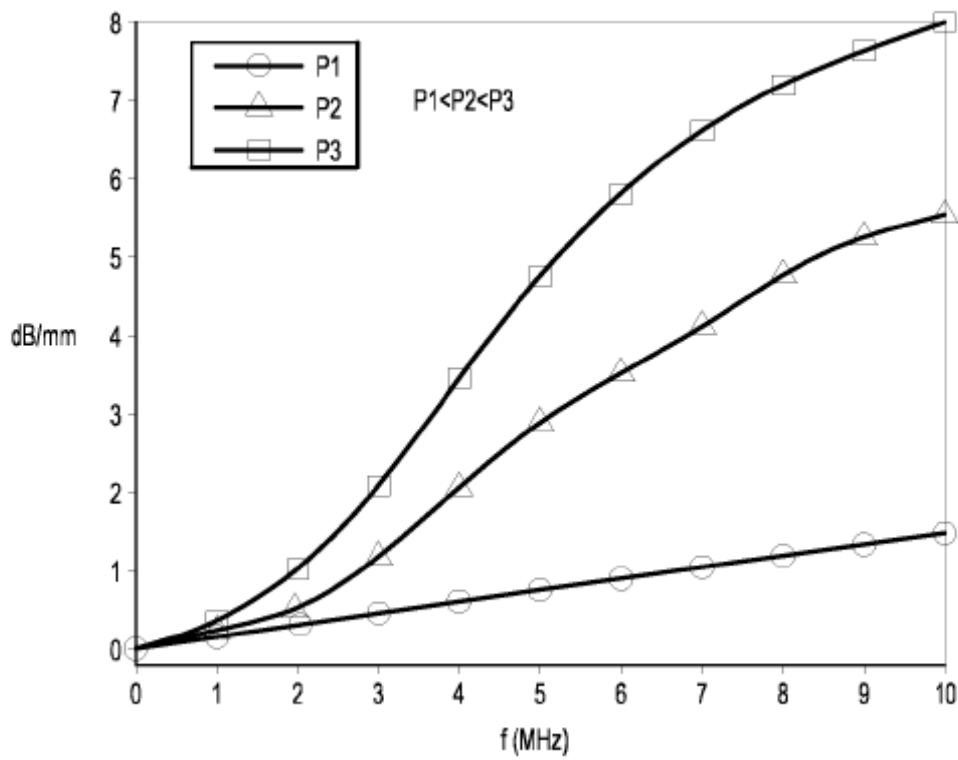
**Fig. 4b**



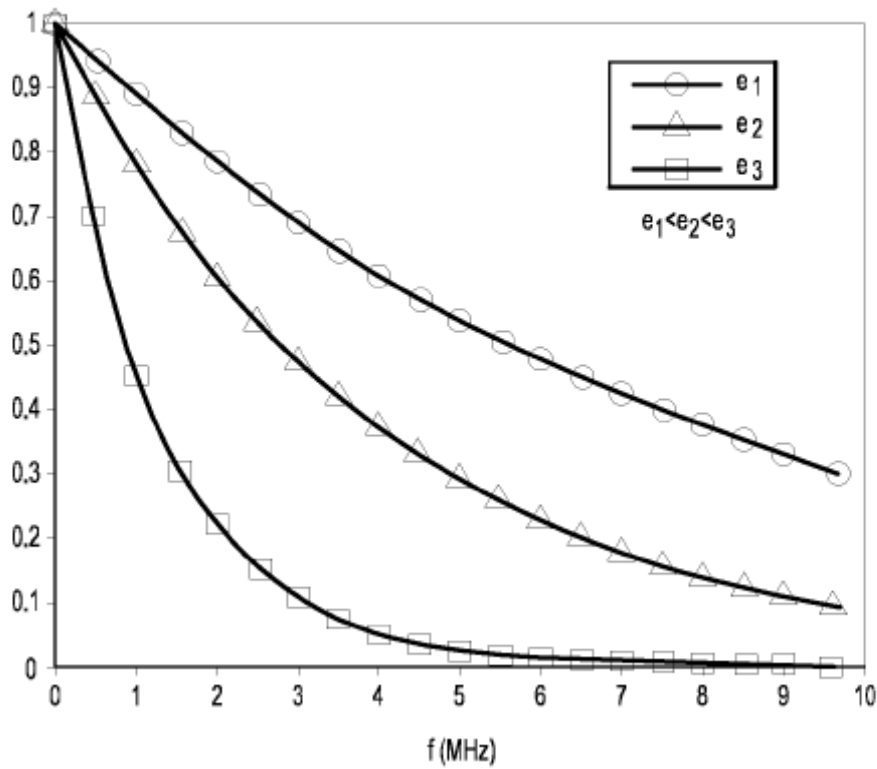
**Fig. 5a**



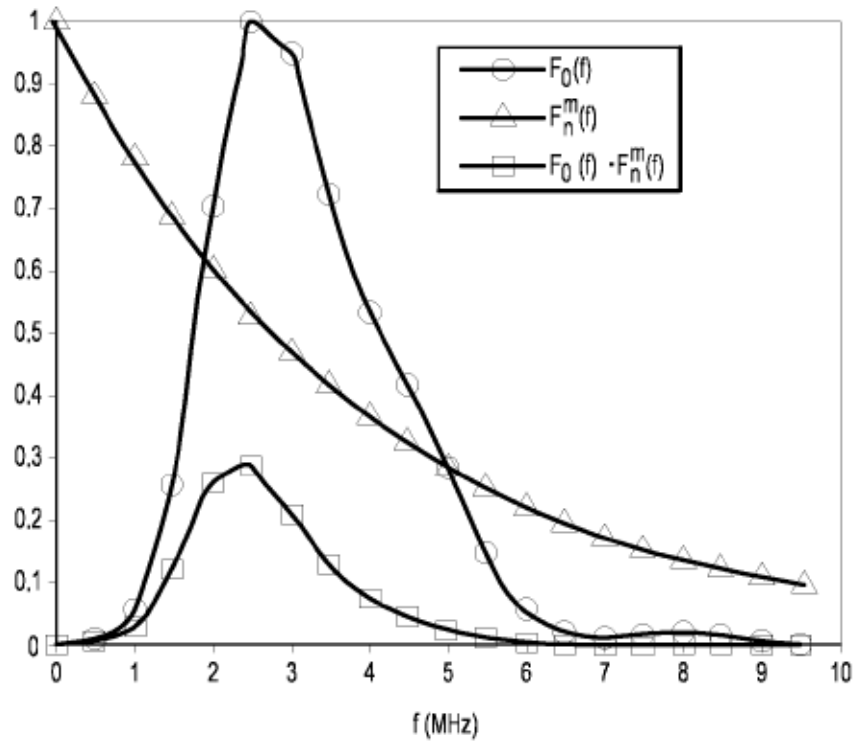
**Fig. 5b**



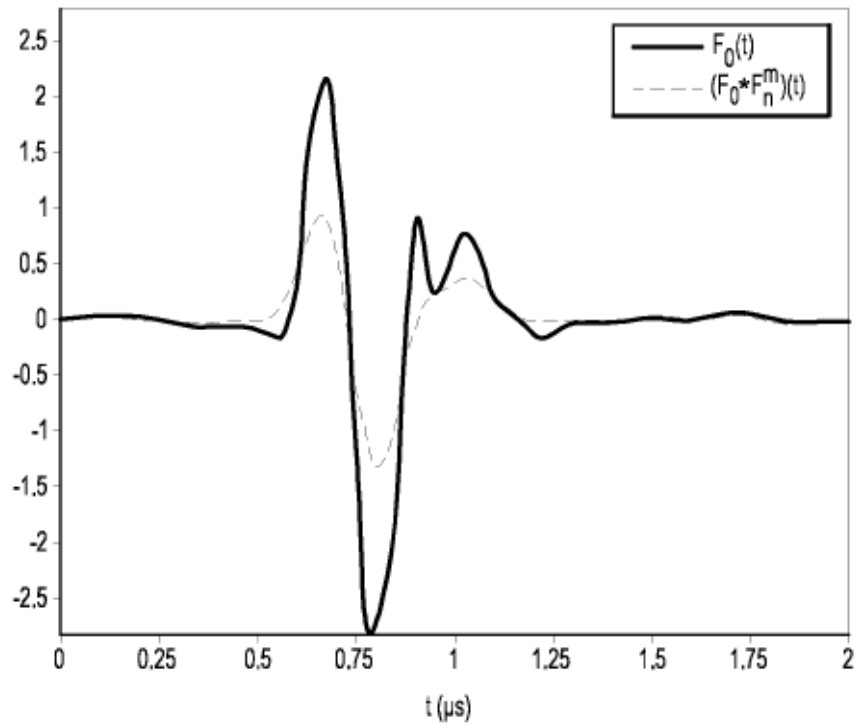
**Fig. 6a**



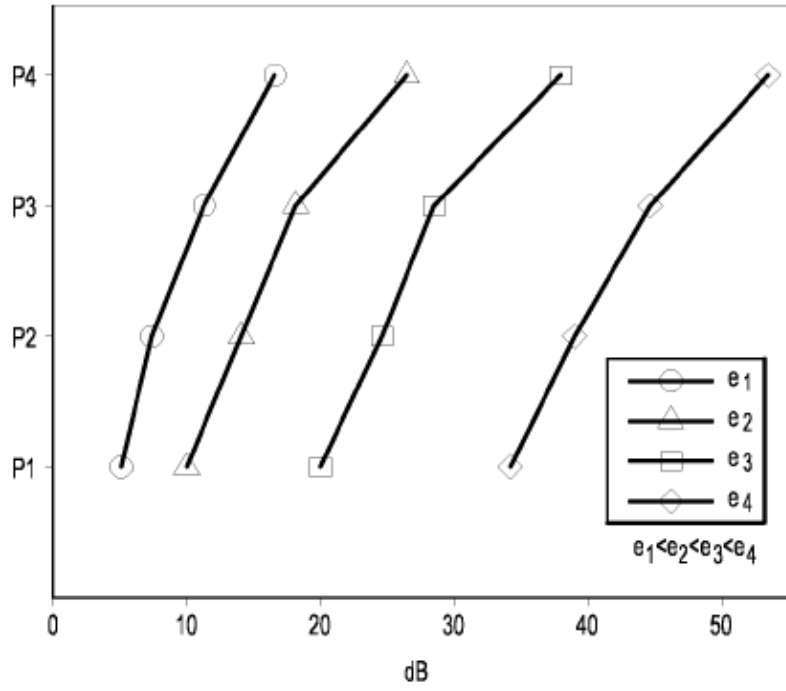
**Fig. 6b**



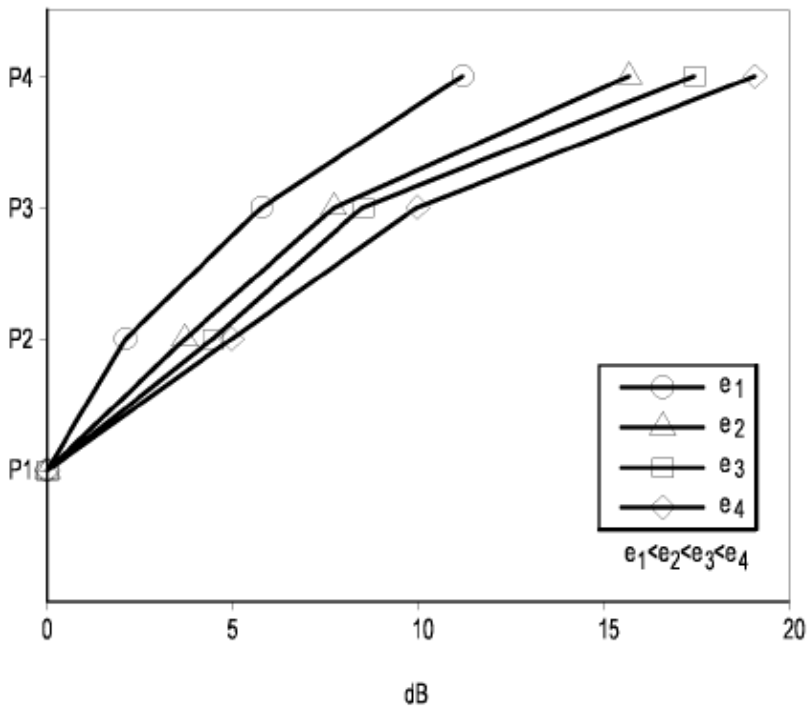
**Fig. 7a**



**Fig. 7b**



**Fig. 8a**



**Fig. 8b**