

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 569 415**

21 Número de solicitud: 201630212

51 Int. Cl.:

**G01N 29/04** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**25.02.2016**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**10.05.2016**

Fecha de la concesión:

**19.01.2017**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**26.01.2017**

73 Titular/es:

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA  
(100.0%)**

**Ctro. Apoyo a la Innovación, la Investigación y la  
Transferencia de Tecnología, CTT, Edif. 6G,  
Camino de Vera s/n  
46022 Valencia (Valencia) ES**

72 Inventor/es:

**CARRIÓN GARCÍA, Alicia;  
GENOVÉS GÓMEZ, Vicente;  
GOSÁLBEZ CASTILLO, Jorge;  
MIRALLES RICÓS, Ramón y  
PAYA BERNABEU, Jorge Juan**

74 Agente/Representante:

**MALDONADO JORDAN, Julia**

54 Título: **Método de ensayo del estado de materiales**

57 Resumen:

Método de ensayo del estado de materiales, que comprende las etapas de inyectar una señal de ultrasonidos de entrada  $x_{inp}(n)$  con una frecuencia  $f$  dada en una muestra de material que va a someterse a ensayo, siendo  $f$  inferior o igual a la frecuencia característica del material sometido a ensayo; recibir una señal de salida  $x(n)$  tras su paso a través de la muestra de material; seleccionar un valor para un retardo entre muestras consecutivas  $L$ ; seleccionar un valor para una dimensión embebida  $E$ ; reconstruir un espacio de fases de la señal  $x(n)$ ; calcular una matriz de representaciones recurrentes; calcular el grado de determinismo; y determinar la presencia de daños en el material para un valor de DET inferior a 1.

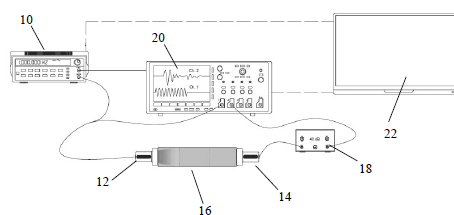


FIG. 1

ES 2 569 415 B1

**DESCRIPCIÓN**

MÉTODO DE ENSAYO DEL ESTADO DE MATERIALES

Campo de la invención

La presente invención se refiere al campo del análisis  
5 del estado de materiales, y más concretamente a un método  
de ensayo no invasivo para determinar el estado de un  
material.

Antecedentes de la invención

10 En el campo de la ingeniería, un material es una  
sustancia o mezcla de sustancias con alguna propiedad útil  
(mecánica, eléctrica, óptica, térmica, etc.) cuya función  
es servir de medio para el diseño de estructuras más  
complejas que atienden a necesidades requeridas. Las  
15 propiedades mecánicas son las que se aprovechan para un  
diseño resistente de estructuras o productos que pueden  
pertenecer a campos muy diversos en la ingeniería, como por  
ejemplo, civil, naval, aeronáutica, automoción, ..., que  
son sectores de gran impacto económico internacional. Dado  
20 el importante papel que desempeñan los materiales  
utilizados en muchos de los campos mencionados  
anteriormente, es de suma importancia su control y  
monitorización a lo largo de su vida útil para garantizar  
su integridad en el desempeño de sus funciones ya que, a lo  
25 largo de su uso prolongado, dichos materiales se verán  
expuestos a diferentes casos de degradación y/o deterioro  
que mermen sus propiedades físicas, químicas y/o mecánicas.

El daño producido en materiales puede ser de origen y  
efecto muy diverso dependiendo de la exposición y clase de  
30 material. En las aplicaciones típicas de ingeniería se  
pueden encontrar numerosos ejemplos de elementos expuestos  
a ataques cuyo control es esencial para el estado de los  
materiales que componen los productos finales. En metales y

aleaciones se dan casos de fatiga mecánica en ejes de trenes o de vehículos de gran tonelaje; fatiga térmica, en reactores de aviones o motores de automóviles, y/o ataques químicos, corrosión u oxidación. En el caso de materiales  
5 pétreos como cerámicas, hormigón, elementos a base de arcillas..., éstos se ven expuestos a ciclos de hielo/deshielo, ataques químicos o sobrecargas de uso cuando forman elementos como puentes, pórticos de edificación, presas, etc.

10 Con el fin de obtener información acerca de las propiedades de los materiales, en la actualidad existe una amplia gama de ensayos que aportan información sobre su estado, clasificándose en dos grandes grupos principalmente: ensayos destructivos (ED) y ensayos no  
15 destructivos (END).

En el campo de los ensayos destructivos el material resulta inservible después del ensayo y por tanto están poco indicados (y en muchas ocasiones son inviables) para la obtención de datos de elementos en uso en el momento de  
20 las comprobaciones.

Los ensayos no destructivos presentan evidentes ventajas, ya que es posible someter a ensayo los materiales reiteradamente sin dañarlos y sin alterar sus propiedades, obteniendo parámetros de caracterización que están  
25 directamente relacionados con sus capacidades mecánicas. De este modo, es posible inspeccionar elementos de dimensiones y naturalezas variadas de forma no invasiva. En el campo de los ensayos no destructivos hay múltiples técnicas y métodos que ofrecen una gama muy amplia de parámetros de  
30 gran interés a la hora de caracterizar propiedades de diferentes materiales. Estos parámetros pueden obtenerse por medio de ensayos de distinta naturaleza, como son la espectroscopía vibracional, impedancia acústica o

eléctrica, ensayos por ultrasonidos, etc.

Por ejemplo, el documento US2008022773 da a conocer un método para determinar las características de un material que consiste en aplicar al material una primera señal  
5 acústica que conlleva una amplitud; determinar su velocidad de propagación; aplicar una segunda señal acústica con una amplitud diferente a la de la primera señal; determinar la segunda velocidad; determinar una diferencia entre las velocidades y las amplitudes para generar un parámetro de  
10 diferencia que determine el estado del material. La velocidad se determina midiendo el tiempo de vuelo de la señal empleada.

El documento US2008006091 describe un método para la caracterización de materiales que emplea una herramienta de  
15 simulación que predice la respuesta del objeto dependiendo de la propiedad estimada a partir de la forma de una onda correspondiente con la dispersión de los ultrasonidos. La herramienta de simulación se emplea para facilitar la configuración para la realización de un ensayo de  
20 inspección posterior.

El documento US5404754 expone un método para determinar la presencia de daños en un material debidos al ataque de hidrógeno y las propiedades mecánicas surgidas de tales daños. Para ello se emplean como parámetros la  
25 velocidad, el análisis espectral y el promediado espacial del ruido de dispersión.

Sin embargo, los métodos de ensayo de materiales conocidos hasta la fecha presentan al menos uno o varios de los siguientes inconvenientes: requieren una etapa previa  
30 de calibración del instrumento empleado en el ensayo lo cual repercute en un mayor tiempo requerido y por tanto un mayor coste; requieren conocer el estado inicial del material lo cual no siempre está disponible en aplicaciones

prácticas de ingeniería; se requieren conocimientos avanzados por parte del técnico que realiza el ensayo para poder interpretar los resultados, etc.

Por tanto, dada la gran importancia del control de las  
5 propiedades de los materiales utilizados en las diferentes aplicaciones en ingeniería, sigue siendo deseable proporcionar métodos alternativos de ensayo del estado de materiales que resuelvan alguno o varios de los inconvenientes anteriormente mencionados. En concreto,  
10 sería deseable disponer de métodos que permitan obtener un diagnóstico rápido, estable y fiable para valorar los posibles cambios e intervenciones en estructuras de importancia crítica (motores, puentes, edificios, vías de ferrocarril, elementos de aviación, etc.) que han sido  
15 objeto del deterioro por el paso del tiempo y por agentes externos.

#### Sumario de la invención

Para solucionar los inconvenientes de la técnica  
20 anterior, la presente invención da a conocer un método de ensayo del estado de materiales, que comprende las etapas de:

- a) inyectar una señal de ultrasonidos de entrada  $x_{inp}(n)$  con una frecuencia  $f$  dada en una muestra de  
25 material que va a someterse a ensayo, siendo  $f$  inferior o igual a la frecuencia característica del material sometido a ensayo;
- b) recibir una señal de salida  $x(n)$  tras su paso a través de la muestra de material;
- 30 c) seleccionar un valor para un retardo entre muestras consecutivas  $L$ ;
- d) seleccionar un valor para una dimensión embebida  $E$ ;
- e) reconstruir un espacio de fases de la señal  $x(n)$

según la ecuación 1:

$$\vec{X}_n = [x(n), x(n+L), \dots, x(n+(E-1)L)]^T, \quad (1)$$

$$n = 1, \dots, N - (E-1) \cdot L$$

5 donde N es el número total de puntos de la señal  $x(n)$ , L es el retardo entre muestras consecutivas determinado en la etapa c), E es la dimensión embebida determinada en la etapa d) y T es el vector transpuesto;

f) calcular una matriz de representaciones recurrentes según la ecuación 2:

$$R_{n_1, n_2} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{X}_{n_1} - \vec{X}_{n_2}\|), \quad n_1, n_2 = 1, \dots, N_s \quad (2)$$

10 donde  $N_s$  es el número de estados considerados en  $\vec{X}_n$ ,  $\varepsilon$  es la distancia umbral,  $\|\cdot\|$  es la distancia Euclídea y  $\Theta(\cdot)$  es la función de Heaviside;

15 g) calcular el grado de determinismo según la ecuación 3:

$$DET = \frac{\sum_{j=j_{min}}^{N_s} j \cdot P(j)}{\sum_{j=1}^{N_s} j \cdot P(j)} \quad (3)$$

20 donde  $P(j)$  es el número de líneas diagonales de longitud  $j$ ,  $j_{min}$  es el número mínimo de puntos que constituyen una línea diagonal, y el grado de determinismo DET es un valor comprendido entre 0 y 1, donde 1 indica una homogeneidad completa del material y un valor próximo a 0 indica heterogeneidad del material relacionada con la presencia de daños; y

25 h) determinar la presencia de daños en el material para un valor de DET inferior a 1.

Breve descripción de las figuras

La presente invención se entenderá mejor con referencia a las siguientes figuras que ilustran realizaciones preferidas de la invención, proporcionadas a modo de ejemplo, y que no deben interpretarse como limitativas de la invención de ninguna manera.

La figura 1 es un esquema del equipamiento empleado para llevar a cabo un ensayo no destructivo según una realización preferida de la presente invención.

La figura 2 representa los valores del grado de determinismo obtenidos en función de la frecuencia empleada, en un ejemplo de aplicación específico para el estudio de muestras de aluminio.

Las figuras 3A y 3B representan los valores determinados para L y para E en función de la frecuencia empleada, en un ejemplo de aplicación específico para el estudio de muestras de hormigón.

Las figuras 4A y 4B representan los valores del grado de determinismo obtenidos en función de la frecuencia empleada, en un ejemplo de aplicación específico para el estudio de muestras de hormigón.

Descripción detallada de las realizaciones preferidas

Tal como se mencionó anteriormente en el presente documento, y como se detallará a continuación, el método de ensayo de materiales según la realización preferida de la presente invención comprende las etapas generales de:

- a) inyectar una señal de ultrasonidos de entrada  $x_{inp}(n)$  en una muestra de material que va a someterse a ensayo;
- b) recibir una señal de salida  $x(n)$  tras su paso a través de la muestra;
- c) seleccionar un valor para un retardo entre muestras

consecutivas L;

d) seleccionar un valor para una dimensión embebida E;

e) reconstruir un espacio de fases de la señal  $x(n)$ ;

f) calcular una matriz de representaciones  
5 recurrentes;

g) calcular el grado de determinismo DET; y

h) determinar la presencia de daños en el material  
para un valor de DET inferior a 1.

En la figura 1 se muestra un esquema del equipamiento  
10 empleado para llevar a cabo el método de ensayo  
anteriormente descrito según una realización preferida de  
la presente invención. Evidentemente, los instrumentos y  
las propiedades de los mismos podrán variar en función de  
la aplicación específica y son los empleados habitualmente  
15 en las técnicas de inspección por ultrasonidos.

Tal como se observa en esta figura 1, se emplea un  
generador de funciones programable (10) (Agilent 33120A),  
que genera la señal de excitación  $x_{inp}(n)$ , en este caso una  
señal sinusoidal de amplitud y frecuencia de trabajo  
20 variables en función del material sometido a ensayo. Se  
utiliza un transductor transmisor (12) y un transductor  
receptor (14) (K1SC, General Electric), que permiten el  
acoplamiento de la señal de ultrasonidos al material que  
está sometiéndose a ensayo (16) en las etapas de  
25 transmisión y recepción. El preamplificador (18) (40 dB,  
Panametrics 5600B) es un dispositivo que permite aumentar  
la amplitud de la señal recibida antes de su análisis. El  
osciloscopio (20) (Tektronix DPO3014) permite la  
adquisición y representación de la señal recibida con una  
30 frecuencia de muestreo por ejemplo igual a 50 MHz. El  
experto en la técnica entenderá que en lugar del  
osciloscopio (20) puede emplearse cualquier tarjeta de  
adquisición, ya que la función de representación que



proporciona el osciloscopio (20) no es imprescindible para la realización del método de la invención. Finalmente, se utiliza un ordenador (22) que permite controlar de forma remota el generador de funciones así como almacenar los  
5 datos adquiridos por el osciloscopio para su posterior procesado.

Usando por ejemplo el equipamiento mostrado en la figura 1, se aplican las etapas del método de ensayo según la realización preferida de la presente invención. Así, en  
10 primer lugar, se inyecta una señal de ultrasonidos de entrada  $x_{inp}(n)$  con una frecuencia  $f$  dada en una muestra de material que va a someterse a ensayo. La frecuencia  $f$  es inferior o igual a la frecuencia característica del material sometido a ensayo. Tal como se emplea en el  
15 presente documento, la "frecuencia característica" se refiere al último valor de frecuencia para el que el valor del grado de determinismo DET es igual a 1 para un material dado en buen estado. La frecuencia característica de un material dado puede determinarse fácilmente, por ejemplo a  
20 partir de tablas de referencia previamente preparadas o sometiendo a ensayo una muestra patrón del mismo material que está sometiéndose a ensayo.

A continuación se recibe una señal de salida  $x(n)$  tras su paso a través de la muestra de material que está  
25 sometiéndose a ensayo.

Después se selecciona un valor para un retardo entre muestras consecutivas  $L$ . Según la realización preferida de la invención, este valor de  $L$  corresponde con un primer mínimo local de la información mutua entre la señal  $x(n)$  y  
30 la misma retardada ( $x(n+L)$ ). El experto en la técnica entenderá que también pueden aplicarse otros métodos para determinar el valor de  $L$ , como por ejemplo emplear el primer nulo de la autocorrelación.

Una vez determinado un valor apropiado del retardo entre muestras, se selecciona un valor para una dimensión embebida E. Según la realización preferida de la presente invención, el valor de la dimensión embebida se determina  
 5 empleando el algoritmo de Cao (L. Cao, Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series, Physica D: Non-linear Phenomena, 110(12): 43 - 50, 1997). Este algoritmo consiste en reconstruir el espacio de fases para valores de E sucesivos hasta  
 10 encontrar la dimensión para la cual el número de falsos vecinos más cercanos es inferior al 2%.

A continuación se reconstruye un espacio de fases de la señal  $x(n)$  según la ecuación 1:

$$\vec{X}_n = [x(n), x(n+L), \dots, x(n+(E-1)L)]^T, \quad (1)$$

$$n = 1, \dots, N - (E-1) \cdot L$$

15 donde N es el número total de puntos de la señal  $x(n)$ , L es el retardo entre muestras consecutivas determinado anteriormente, E es la dimensión embebida determinada anteriormente y T es el vector transpuesto.

La siguiente etapa consiste en calcular una matriz de  
 20 representaciones recurrentes según la ecuación 2:

$$R_{n_1, n_2} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{X}_{n_1} - \vec{X}_{n_2}\|), \quad n_1, n_2 = 1, \dots, N_s \quad (2)$$

donde  $N_s$  es el número de estados considerados en  $\vec{X}_n$ ,  $\varepsilon$  es la distancia umbral,  $\|\cdot\|$  es la distancia Euclídea y  $\Theta(\cdot)$  es la función de Heaviside.

25 A partir de esta matriz de representaciones recurrentes, puede calcularse a continuación el grado de determinismo DET según la ecuación 3:

$$DET = \frac{\sum_{j=j_{min}}^{N_s} j \cdot P(j)}{\sum_{j=1}^{N_s} j \cdot P(j)} \quad (3)$$

donde  $P(j)$  es el número de líneas diagonales de longitud  $j$  de la matriz de representaciones recurrentes, y  $j_{min}$  es el número mínimo de puntos que constituyen una línea diagonal.

5 El grado de determinismo  $DET$  es un valor comprendido entre 0 y 1, donde 1 indica una homogeneidad completa del material y un valor próximo a 0 indica heterogeneidad del material relacionada con la presencia de daños.

10 Por último, se determina la presencia de daños en el material si se obtiene un valor de  $DET$  inferior a 1.

El método según esta realización preferida de la presente invención presenta varias ventajas con respecto a la técnica anterior. Por ejemplo, no requiere ninguna etapa previa de calibración del equipamiento empleado como en el caso de técnicas de ensayos no destructivos conocidas en la técnica anterior. El método de la presente invención parte de la hipótesis de que la señal incidente es puramente determinista, sin necesitar ningún otro parámetro relativo a la señal de excitación, dando así como resultado un método de ensayo mucho más sencillo de aplicar.

Tampoco se requiere un conocimiento del estado inicial del material con objeto de comparar los resultados obtenidos con los resultados que se obtuvieron anteriormente con el mismo material en su estado inicial. Como se explicó anteriormente, el grado de determinismo es una medida normalizada en el intervalo  $[0,1]$ , donde 1 indica que el material es perfectamente homogéneo y la aproximación a 0 indica el grado de discontinuidad presente en el material relativa a la frecuencia de inspección seleccionada. No obstante, según la primera realización

preferida de la presente invención, tal como se mencionó anteriormente, sí que conviene conocer la frecuencia característica del material que va a someterse a ensayo. Sin embargo, esta frecuencia es característica del tipo de material y no de la muestra específica que se somete a ensayo. Por tanto, la frecuencia característica puede obtenerse a partir de la bibliografía o a partir de una muestra patrón del mismo tipo de material.

Además, no es necesario que el usuario final tenga conocimientos técnicos avanzados. Una vez implementado el método de ensayo según la realización preferida de la presente invención, los resultados son fáciles de comprender e interpretar incluso por parte de técnicos ajenos al campo del procesado de señales.

Por otro lado, el método según la realización preferida de la invención proporciona versatilidad en cuanto a los materiales que pueden someterse a ensayo, ya que es fácilmente adaptable a un amplio abanico de materiales de naturalezas muy diversas modificando simplemente la frecuencia de la señal introducida. Los materiales formados por conglomerados de tamaño relativamente grande pueden caracterizarse fácilmente a frecuencias relativamente bajas (por ejemplo, la frecuencia característica del hormigón es de 500 KHz), sin embargo, materiales más compactos (por ejemplo, el acero, el aluminio, etc.) requieren aumentar la frecuencia de la señal incidente, sin ningún otro cambio en el método de ensayo.

Además, el método de la invención también proporciona una gran versatilidad en cuanto a las posibles aplicaciones, ya que permite detectar cualquier cambio que suponga una variación de impedancia acústica: cambio en las propiedades de un material, clasificación de materiales

(diferentes dosificaciones, aleaciones, etc.), detección de daño (grietas, fisuras, etc.), etc.

Según una realización preferida adicional de la presente invención, el método de ensayo comprende además  
5 repetir las etapas a) a g) anteriormente mencionadas haciendo variar la frecuencia  $f$  a lo largo de un intervalo dado. Según una primera variante de esta realización adicional, los valores de  $L$  y  $E$  determinados en las etapas  
c) y d), respectivamente, para la primera frecuencia  
10 empleada se mantienen fijos a lo largo de todo el ensayo.

Según una segunda variante preferida de esta realización adicional, para cada frecuencia empleada dentro del intervalo de frecuencias se determinan los valores de  $L$  y  $E$  óptimos.

15 Según esta realización preferida adicional, en la que se repite el método de ensayo para un intervalo de frecuencias dado, se obtiene un gráfico que representa la curva de variación del grado de determinismo DET en función de la frecuencia  $f$ , tal como se mostrará a continuación en  
20 ejemplos específicos. Esta curva de variación de DET proporciona información adicional con respecto al estado del material sometido a ensayo. En efecto, el valor de DET a frecuencias bajas será generalmente próximo a 1, mientras que a cierta frecuencia dada empezará a mostrar una  
25 disminución gradual a medida que aumenta dicha frecuencia hasta llegar a valores de DET próximos a 0.

Por tanto, según una realización adicional de la presente invención, el método comprende además la etapa adicional de determinar el tamaño de un daño equivalente en  
30 el material sometido a ensayo a partir de la longitud de onda a la frecuencia a la que se produce la primera disminución del valor de DET, a partir de la siguiente ecuación 4:

$$\lambda = c/f \quad (4)$$

donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido a través del material sometido a ensayo,  $f$  es la frecuencia de la señal  $x(n)$  a la que se produce la primera disminución del valor de DET, y  $\lambda$  es el tamaño del daño equivalente detectado.

Según esta realización de la presente invención no se determina el tipo de daño que presenta el material (grietas, fisuras, poros, cambios de material,...). Sin embargo sí se obtiene un valor  $\lambda$  para un daño equivalente. El "daño equivalente", tal como se emplea en el presente documento, se refiere a un daño hipotético, por ejemplo una grieta hipotética, de un tamaño dado que afecta al material sometido a ensayo del mismo modo que los daños reales (poros, grietas, fisuras, cambios de material, etc.) que pueda presentar realmente este material.

Según otra realización preferida de la presente invención, una vez obtenida dicha curva de grado de determinismo en función de la frecuencia, el método comprende además determinar el tipo de daño presente en el material sometido a ensayo en función de la pendiente de la disminución del valor de DET a lo largo del intervalo de frecuencias empleado. La pendiente de la disminución del valor de DET en función de la frecuencia aporta información con respecto a la cantidad y dispersión de los daños del material. En efecto, una pendiente más pronunciada implica una dispersión de daño reducida (daños de tamaños similares). Por otro lado, si la pendiente es menos pronunciada significa que el tamaño de los daños varía de una manera más amplia (daños de tamaños variables).

Poder estimar el tamaño del daño equivalente, así como el tipo de daños presentes en el material sometido a

ensayo, suponen ventajas adicionales de las realizaciones preferidas de la presente invención con respecto a diversos métodos de la técnica anterior, ya que se proporciona información más detallada sobre el estado del material.

5 A continuación se describen ejemplos específicos de aplicación del método de ensayo descrito anteriormente, con objeto únicamente de ilustrar adicionalmente la presente invención sin limitar su alcance.

#### 10 Ejemplo 1

Se fabricó una probeta de 4x4x16 cm de aluminio sin dañar. Dado que se trata de un material muy compacto, para su correcta caracterización es necesario llevar a cabo un barrido de frecuencia a un intervalo muy amplio. Se  
15 realizaron mediciones con 3 transductores distintos: 2 MHz, 5 MHz y 10 MHz. Se realizan 4 repeticiones por banda de frecuencia. En la gráfica de la figura 2 se muestra la media de cada una de las bandas.

En este caso, al igual que el de los metales, el  
20 material es altamente homogéneo y muy compacto, por lo que no se aprecia ningún descenso del determinismo a ninguna frecuencia. Los picos que aparecen a determinadas frecuencias se deben a la respuesta misma de los transductores, ya que se mide fuera de su banda de acción.  
25 En el caso de 2 MHz se mide de 1,5 a 3,5 MHz (banda centrada en 2 MHz), en el caso de 5 MHz se mide de 3,5 a 7,5 MHz (centrado en 5 MHz) y en el caso de 10 MHz se mide de 7,5 a 11 MHz.

En el caso de que existiera algún daño habría un  
30 descenso del determinismo en alguna frecuencia en función de la cantidad y tamaño del daño.

#### Ejemplo 2

Se fabricaron probetas de hormigón con dos tipos de cemento distintos: uno resistente a un ataque químico (material G) y otro vulnerable al mismo (material W). Empleando el método descrito anteriormente en el presente documento, se sometieron a ensayo cinco probetas de cada tipo antes de sumergirlas en una disolución con agente de ataque químico, lo que permitió caracterizar el estado inicial del material (T0). Tras 28 días de inmersión en la disolución, volvieron a someterse a ensayo cada una de las probetas (T1).

Tal como se mencionó anteriormente en el presente documento, antes de calcular los correspondientes valores del grado de determinismo, se determinaron los valores óptimos de L y E. Las figuras 3A y 3B representan los valores de L y E determinados, respectivamente, en función de la frecuencia. En concreto, en la figura 3A puede observarse que los valores de L disminuyen exponencialmente a medida que aumenta la frecuencia. Esto se debe a que, al aumentar la frecuencia de la señal introducida, disminuye el número de muestras por periodo. Por tanto, el retardo necesario para obtener un mínimo local de la información mutua es menor.

En el caso de la dimensión embebida E (figura 3B), los valores parecen ir aumentando a medida que se aumenta la frecuencia, pero no varían con una tendencia evidente.

Empleando estos valores, se reconstruyeron los correspondientes espacios de fase para calcular los valores del grado de determinismo DET tal como se describió anteriormente en el presente documento.

Las figuras 4A y 4B muestran los valores del grado de determinismo obtenidos en función de la frecuencia para el hormigón resistente y el hormigón vulnerable, respectivamente.



Tal como puede apreciarse en la figura 4A, los valores del grado de determinismo para el material resistente (G) se mantienen cercanos a 1 para frecuencias bajas para los dos tiempos analizados, antes (GT0) y después (GT1) del  
5 ataque con agente químico. Sin embargo, el grado de determinismo disminuye hasta valores cercanos a 0 a partir de frecuencias superiores a 500 kHz debido a las dimensiones del material, que provocan la ausencia de la señal de entrada al receptor a dicha frecuencia, y en su  
10 lugar, se recibe una señal de naturaleza aleatoria ligada al equipamiento que conforma la configuración empleada (cables, equipos...). Por tanto, esta frecuencia de 500 KHz corresponde a la frecuencia característica para este tipo de hormigón. Por tanto, un intervalo de frecuencia adecuado  
15 para someter a ensayo una muestra de hormigón es de 200 a 550 KHz.

Por otro lado, en la figura 4B correspondiente al material vulnerable puede apreciarse que la serie analizada antes de la inmersión (WT0) mantiene una tendencia igual a  
20 la de las series anteriores (GT0 y GT1) pero, tras el ataque con agente químico, la disminución de los valores del grado de determinismo se produce a frecuencias mucho más bajas (a partir de 250 kHz). Esto indica que se ha detectado un cambio en la modalidad de la señal debido a la  
25 degradación producida por el ataque con agente químico en el material.

Tal como se mencionó anteriormente, el método según la realización preferida de la presente invención permite estimar el tamaño aproximado de un daño equivalente. En  
30 este caso, la velocidad de propagación del sonido en el hormigón es de 4150 m/s y la primera disminución del grado de determinismo se detecta a una frecuencia de 250 KHz. Por tanto, aplicando la ecuación 4 anteriormente mencionada:

$$\lambda = c/f \quad (4)$$

se obtiene  $\lambda = 1,6$  cm.

Además se obtuvo una elevada dispersión con respecto a la media, lo cual indica que se trata de un tipo de daño  
5 global pero heterogéneo entre las distintas probetas analizadas.

Aunque se ha descrito anteriormente la presente invención con referencia a realizaciones preferidas de la misma, debe entenderse que la invención no se limita a  
10 dichas realizaciones y que abarca cualquier modificación y variación de las mismas evidente para el experto en la técnica que se encuentre dentro del alcance de las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Método de ensayo del estado de materiales, que comprende las etapas de:

5 a) inyectar una señal de ultrasonidos de entrada  $x_{inp}(n)$  con una frecuencia  $f$  dada en una muestra de material que va a someterse a ensayo, siendo  $f$  inferior o igual a la frecuencia característica del material sometido a ensayo;

10 b) recibir una señal de salida  $x(n)$  tras su paso a través de la muestra de material;

c) seleccionar un valor para un retardo entre muestras consecutivas  $L$ ;

d) seleccionar un valor para una dimensión embebida  $E$ ;

15 e) reconstruir un espacio de fases de la señal  $x(n)$  según la ecuación 1:

$$\vec{X}_n = [x(n), x(n+L), \dots, x(n+(E-1)L)]^T, \quad (1)$$

$$n = 1, \dots, N - (E-1) \cdot L$$

20 donde  $N$  es el número total de puntos de la señal  $x(n)$ ,  $L$  es el retardo entre muestras consecutivas determinado en la etapa c),  $E$  es la dimensión embebida determinada en la etapa d) y  $T$  es el vector transpuesto;

f) calcular una matriz de representaciones recurrentes según la ecuación 2:

$$R_{n_1, n_2} = \Theta(\varepsilon - \|\vec{X}_{n_1} - \vec{X}_{n_2}\|), \quad n_1, n_2 = 1, \dots, N_s \quad (2)$$

25 donde  $N_s$  es el número de estados considerados en

$\vec{X}_n$ ,  $\varepsilon$  es la distancia umbral,  $\|\cdot\|$  es la distancia Euclídea y  $\Theta(\cdot)$  es la función de Heaviside;

g) calcular el grado de determinismo según la ecuación 3:

$$DET = \frac{\sum_{j=j_{\min}}^{N_s} j \cdot P(j)}{\sum_{j=1}^{N_s} j \cdot P(j)} \quad (3)$$

donde  $P(j)$  es el número de líneas diagonales de longitud  $j$ ,  $j_{\min}$  es el número mínimo de puntos que constituyen una línea diagonal, y el grado de determinismo DET es un valor comprendido entre 0 y 1, donde 1 indica una homogeneidad completa del material y un valor próximo a 0 indica heterogeneidad del material relacionada con la presencia de daños; y

- h) determinar la presencia de daños en el material para un valor de DET inferior a 1.
2. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que el material sometido a ensayo es hormigón y la frecuencia característica del mismo es de 500 KHz, siendo la frecuencia  $f$  de la señal  $x(n)$  inferior o igual a 500 KHz.
  3. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el valor para el retardo entre muestras consecutivas  $L$  corresponde con un primer mínimo local de la información mutua entre la señal  $x(n)$  y la misma retardada.
  4. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el valor de  $E$  se calcula mediante el algoritmo de Cao.
  5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende además repetir las etapas a) a g) haciendo variar la frecuencia  $f$  a lo largo de un intervalo dado, determinándose los valores de  $L$  y  $E$  para cada frecuencia empleada.

6. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado por que comprende además repetir las etapas a) a g) haciendo variar la frecuencia  $f$  a lo largo de un intervalo dado, manteniendo en cada caso los valores de  $L$  y  $E$  determinados para la primera frecuencia empleada.
7. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 y 6, caracterizado por que comprende la etapa adicional de determinar el tamaño de un daño equivalente en el material sometido a ensayo a partir de la longitud de onda a la frecuencia a la que se produce la primera disminución del valor de  $DET$ , a partir de la siguiente ecuación 4:
- $$\lambda = c/f \quad (4)$$
- donde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido a través del material sometido a ensayo,  $f$  es la frecuencia de la señal  $x(n)$  a la que se produce la primera disminución del valor de  $DET$ , y  $\lambda$  es el tamaño del daño equivalente detectado.
8. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, caracterizado por que comprende además determinar el tipo de daño presente en el material sometido a ensayo en función de la pendiente de la disminución del valor de  $DET$  a lo largo del intervalo de frecuencias empleado.
9. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado por que el material sometido a ensayo es hormigón y el intervalo de frecuencias empleado es de 200 a 550 KHz.
10. Método según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado por que el material sometido a ensayo es aluminio y el intervalo de frecuencias empleado es de 2 a 10 MHz.

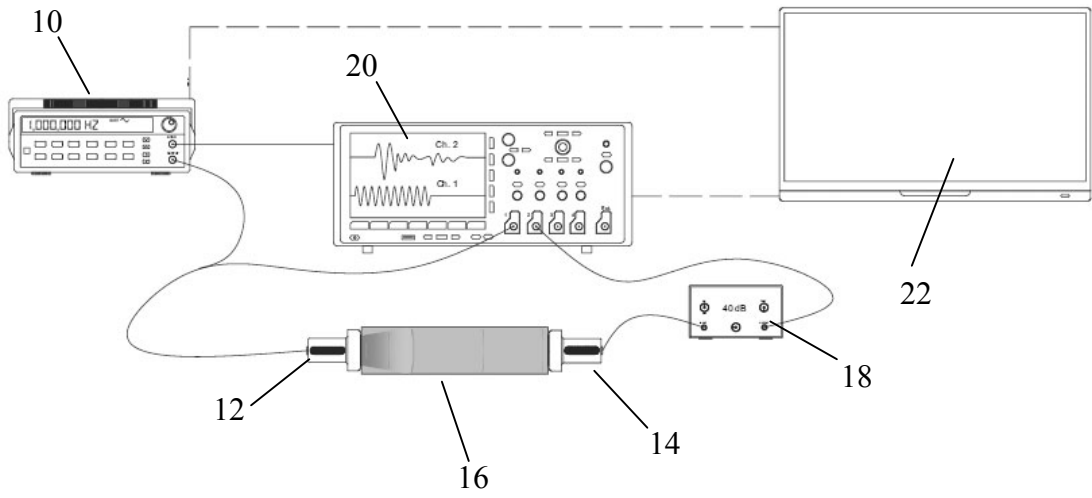


FIG. 1

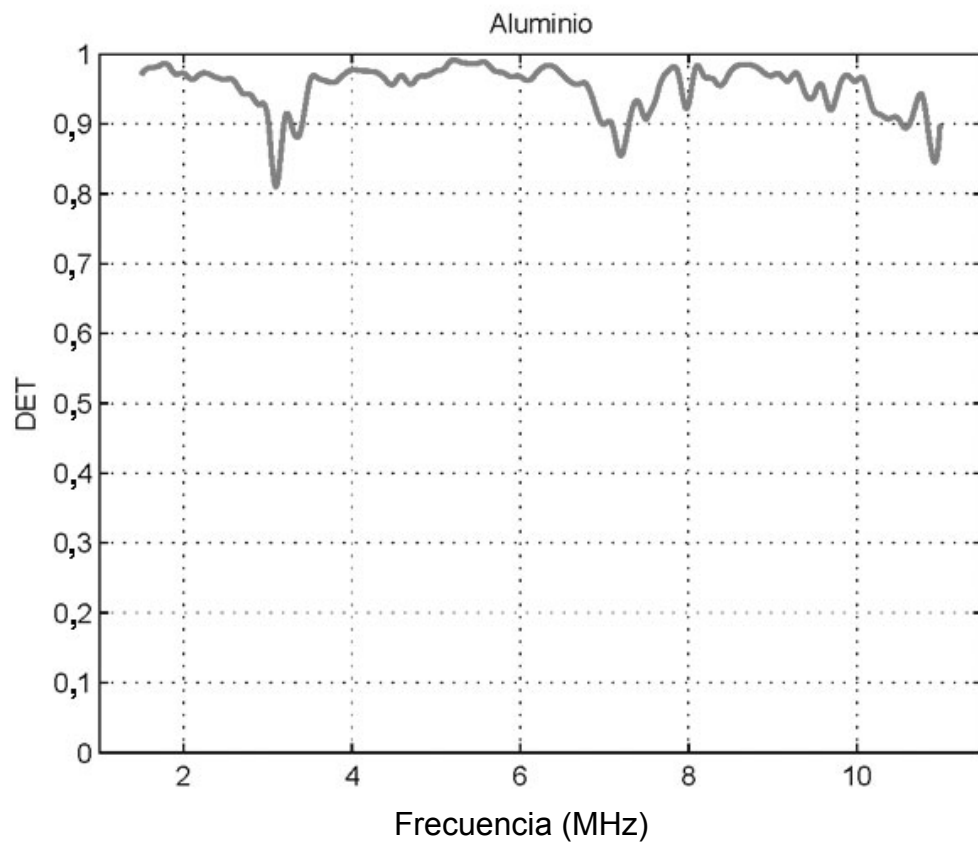


FIG. 2

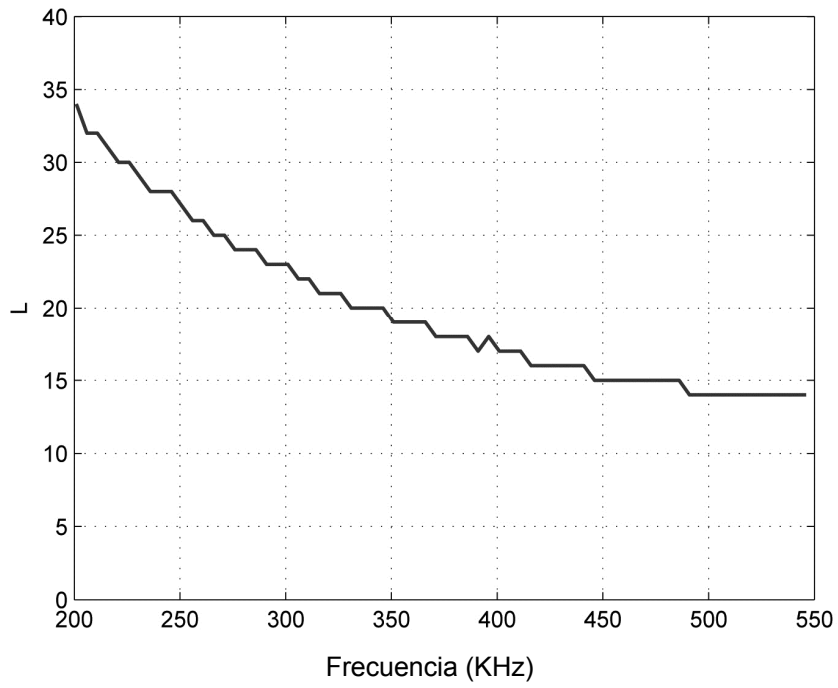


FIG. 3A

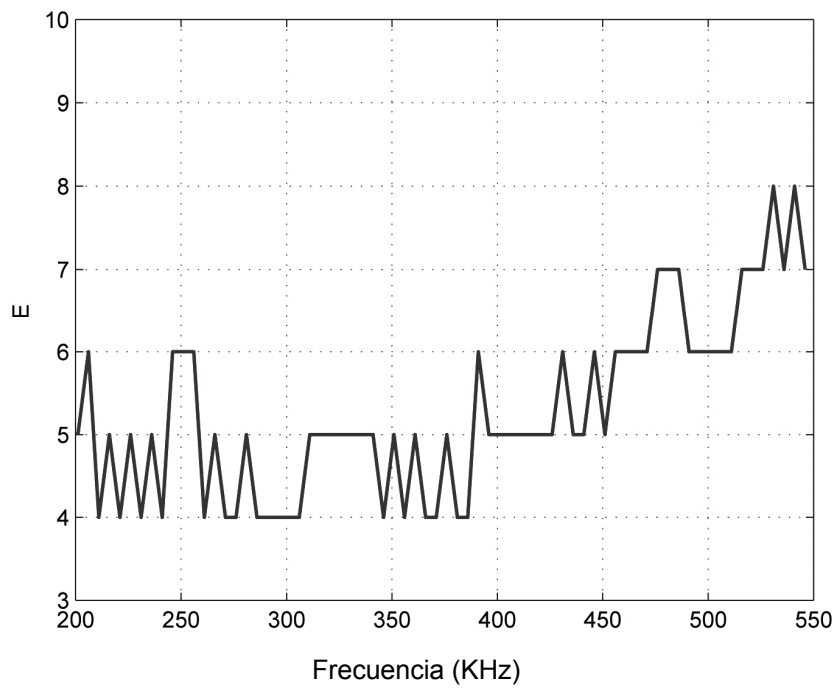


FIG. 3B



ES 2 569 415 B1

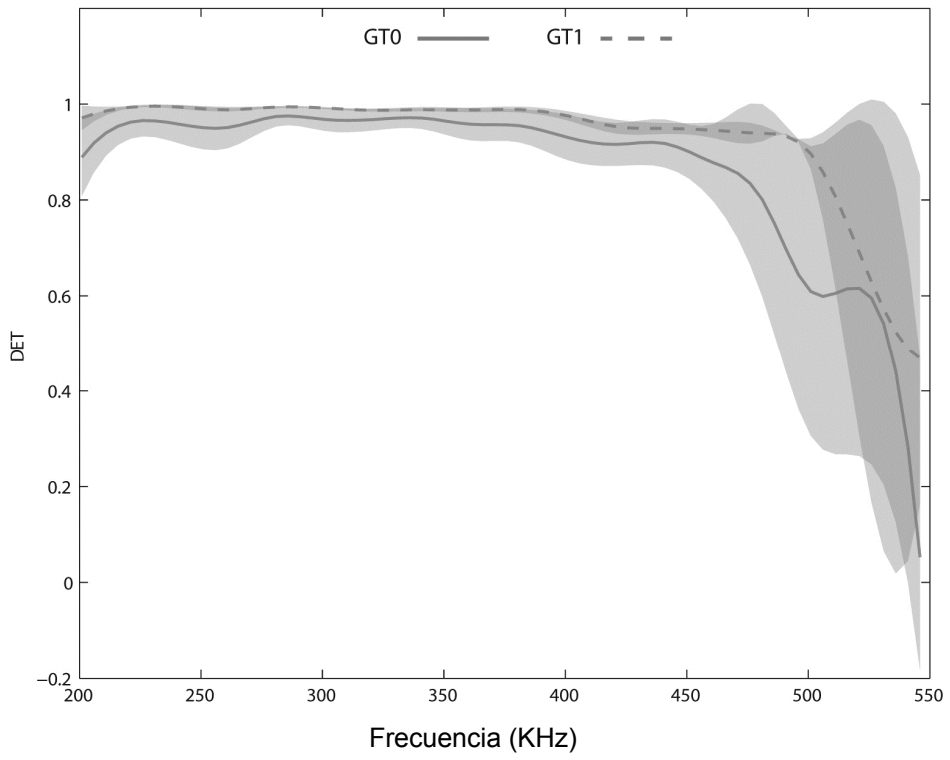


FIG. 4A

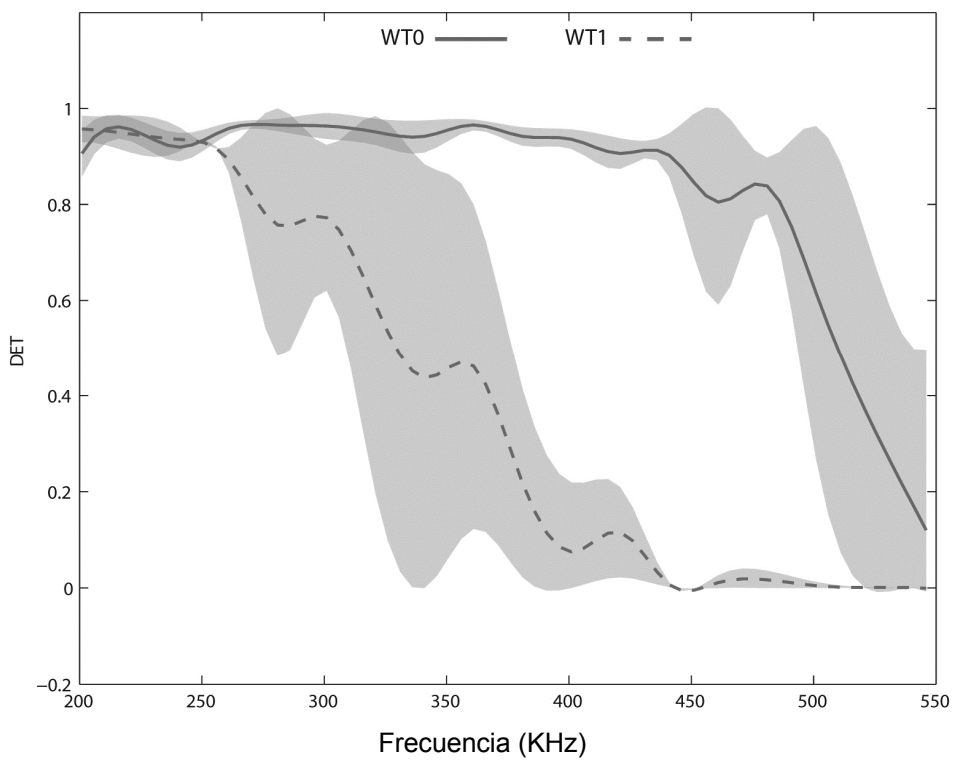


FIG. 4B



②① N.º solicitud: 201630212

②② Fecha de presentación de la solicitud: 25.02.2016

②③ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤① Int. Cl.: **G01N29/04** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	CARRIÓN ALICIA et al. "Measuring predictability in ultrasonic signals: An application to scattering material characterization". ULTRASONICS, 20140602 IPC SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS LTD. GUILDFORD, GB 02.06.2014 VOL: 54 No: 7 Págs: 1904-1911 ISSN 0041-624X Doi: doi:10.1016/j.ultras.2014.05.008.	1-10
A	MIRALLES R et al. "Blind detection of nonlinearities in multiple-echo ultrasonic signals". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 20080301 IEEE, US 01.03.2008 VOL: 54 No: 3 Págs: 637-647 ISSN 0885-3010.	1-10
A	CAO L. "Practical method of for determining the minimun embedding dimensión of a scalar time series". Physica D 110 (1997) 43-50.	4
A	VERGARA L et al. "Processing of ultrasonic grain noise signals for the estimation of depth- and frequency-dependent attenuation". MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, 20030701 IOP, BRISTOL, GB 01.07.2003 VOL: 14 No: 7 Págs: 1018-1024 ISSN 0957-0233 Doi: doi:10.1088/0957-0233/14/7/316.	7-10
A	GENOVÉS V et al. "Optimized ultrasonic attenuation measures for non-homogeneous materials". Ultrasonics Elsevier B.V. Netherlands (Disponible en línea 16 septiembre 2015) VOL: 65 Págs: 345-352 ISSN 0041-624X (print) Doi: doi:10.1016/j.ultras.2015.09.007.	7-10

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
29.04.2016

Examinador  
B. Tejedor Miralles

Página  
1/5

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01N

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, bases de datos de patentes de texto completo, bases de literatura no patente, internet

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 29.04.2016

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-10	<b>SI</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)</b>	Reivindicaciones	<b>SI</b>
	Reivindicaciones 1-10	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión.-**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

**1. Documentos considerados.-**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	CARRIÓN ALICIA et al. "Measuring predictability in ultrasonic signals: An application to scattering material characterization".	02.06.2014
D02	MIRALLES R et al. "Blind detection of nonlinearities in multiple-echo ultrasonic signals".	01.03.2008
D03	CAO L. "Practical method of determining the minimum embedding dimension of a scalar time series".	1997
D04	VERGARA L et al. "Processing of ultrasonic grain noise signals for the estimation of depth- and frequency-dependent attenuation".	01.07.2003
D05	GENOVÉS V et al. "Optimized ultrasonic attenuation measures for non-homogeneous materials".	16.09.2015

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

## Reivindicación 1:

El documento D01 se considera como el estado de la técnica más cercano al objeto definido en la primera reivindicación (entre paréntesis las referencias al documento citado).

Dicho documento divulga un método de ensayo del estado de materiales que comprende las etapas de: a) inyectar una señal de ultrasonidos de entrada con una cierta frecuencia, siendo esta inferior o igual a la frecuencia característica del material sometido a ensayo; b) recibir la señal de salida tras su paso por el material; c) seleccionar un valor para un retardo entre muestras consecutivas; d) seleccionar un valor para una dimensión embebida; e) reconstruir un espacio de fases de la señal; f) calcular una matriz de representaciones recurrentes; g) calcular el grado de determinismo; y, h) determinar la presencia de daños en el material para un valor del grado de determinismo DET inferior a 1 (D01: apartados 3-5).

Todas las etapas del método del ensayo del estado de materiales se encuentran divulgadas en el documento D01. No obstante, se diferencia de la primera reivindicación en que la ecuación para la reconstrucción del espacio de fases no utiliza el vector transpuesto. Sin embargo, es conocido del estado de la técnica la utilización de dicho vector en los métodos de reconstrucción del espacio de fases que consideran una dimensión embebida y el tiempo de retardo entre muestras consecutivas; por lo que no se considera que requiera ningún esfuerzo inventivo para un experto en la materia su utilización para el mismo fin. A modo de ejemplo, se cita el documento D02 donde se pone de manifiesto el uso de dicha ecuación para la reconstrucción del espacio de fases. Así, la primera reivindicación no presentaría actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

## Reivindicaciones dependientes 2-10:

La segunda reivindicación hace referencia a la aplicación del método a un cierto material. Dicho material se ensaya así mismo en el documento D01 (D01: apartado 5). El valor empleado de la frecuencia característica se considera una característica propia del material y cuya selección no implica ningún efecto técnico inesperado. Por lo tanto, la segunda reivindicación no presentaría actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

La tercera reivindicación se encuentra divulgada en el documento D01. Se trata de una mera selección de datos propia del método empleado y que un experto en la materia seleccionaría sin la ayuda de la actividad inventiva. Por lo tanto, la segunda reivindicación no presentaría actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

La cuarta reivindicación se encuentra divulgada implícitamente en el documento D01. Se trata de la elección de un cierto algoritmo ampliamente utilizado en el ámbito de este cálculo matemático. Se describe en el documento D03, tal y como se puso de manifiesto en la descripción de la solicitud. Por lo tanto, la dicha reivindicación no presentaría actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

Las reivindicaciones quinta y sexta divulgan etapas propias de cualquier método de ensayo de materiales para obtener una curva variando las distintas variables que intervienen, con objeto de obtener más información sobre el material bajo ensayo y cuya realización no supone ningún esfuerzo inventivo para un experto en la materia. Así dichas reivindicaciones no presentarían actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

Las reivindicaciones séptima y octava representan una consecuencias de someter un material a una señal ultrasónica, dado que es conocido que cuando dicha señal atraviesa un material se va a producir una atenuación de la misma. Además, dicha atenuación está relacionada no solo con los defectos que pueda haber en el interior del material, sino también con la frecuencia de la señal. Así, la representación matemática de dicho efecto se considera una mera elección entre las distintas posibilidades que hay para poder obtener dicha información sin el ejercicio de la actividad inventiva. A modo de ejemplo se citan los documentos D04 y D05 en los que se trata la misma situación. Por lo tanto, dichas reivindicaciones no presentarían actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.

Las reivindicaciones novena y décima establecen ciertos intervalos de ensayo dependiendo del material utilizado que se consideran una posibilidad evidente que un experto en la materia seleccionaría según las circunstancias. Por lo tanto, dichas reivindicaciones no presentarían actividad inventiva según el artículo 8.1 de la ley de patentes 11/1986.