

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 592 517**

51 Int. Cl.:

B06B 3/00 (2006.01)

G10K 11/24 (2006.01)

G01N 29/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.09.2006 E 10181639 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.08.2016 EP 2266714**

54 Título: **Ensayos no destructivos por ultrasonidos**

30 Prioridad:

04.11.2005 GB 0522572

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

30.11.2016

73 Titular/es:

**IMPERIAL INNOVATIONS LIMITED (100.0%)
52 Princes Gate, Exhibition Road
London SW7 2PG, GB**

72 Inventor/es:

**CAWLEY, PETER y
CEGLA, FEDERICK BERT**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 592 517 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

Ensayos no destructivos por ultrasonidos

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un aparato y método para ensayos no destructivos por ultrasonidos.

Descripción de la técnica anterior

10

Es conocido el uso de señales ultrasónicas en el ensayo no destructivo de materiales. Las mediciones de grosor pueden llevarse a cabo mediante el envío de señales ultrasónicas al interior del material de ensayo y la medición de su tiempo de tránsito a través de la muestra. La supervisión de defectos puede realizarse mediante el envío de señales ultrasónicas al interior del material de ensayo y observando su reflexión desde la estructura de un defecto. Típicamente, se coloca un transductor ultrasónico en contacto directo con el objeto bajo ensayo. Las señales ultrasónicas transmitidas se reciben entonces por el transductor de transmisión que también actúa como transductor de recepción, o puede emplearse un segundo transductor de recepción. Dichos procedimientos son directos en entornos no hostiles, pero deben superar obstáculos técnicos significativos para hacer funcionar dichos transductores en entornos hostiles (por ejemplo alta temperatura).

20

El desarrollo de transductores ultrasónicos y sus componentes auxiliares con capacidad para soportar altas temperaturas durante períodos extendidos de tiempo es exigente. La mayor parte de los materiales del transductor son afectados adversamente por las altas temperaturas y, adicionalmente, se requieren amplificadores de amortiguación flexibles para convertir las señales para su transmisión a lo largo de cables coaxiales, que por sí mismos deben soportar el entorno. Deben proporcionarse también conectores y fuentes de alimentación adecuados.

25

Una alternativa atractiva sería usar una guía de ondas acústica fabricada de un material capaz de soportar el entorno hostil para transmitir la señal ultrasónica al interior del objeto de ensayo desde un transductor y componentes auxiliares localizados en una zona no hostil. El extremo de la guía de ondas debería fijarse directamente a la zona de interés de la muestra de ensayo. El uso de una guía de ondas intermedia, sin embargo, no es una tarea trivial. La inspección por ultrasonidos emplea típicamente formas de onda de pulsos de alta frecuencia (>1 MHz), que no se transmiten fácilmente con alta fidelidad a lo largo de una guía de ondas larga, debido a la dispersión, múltiples modos y atenuación. Adicionalmente, tanto los transductores como la muestra de ensayo deben acoplarse eficientemente a la guía de ondas para evitar altas pérdidas de energía prohibitivas.

35

Un problema principal a superar es la dispersión y la presencia de múltiples modos. La Figura 1 de los dibujos adjuntos muestra las curvas de dispersión para una guía de ondas de barra cilíndrica. Es inevitable alguna extensión en la energía de la señal transmitida, así por ejemplo una señal generada a una frecuencia central de 2 MHz tendrá típicamente energía entre 1 MHz y 3 MHz. De ahí, dado que la identificación precisa y los tiempos de las señales ultrasónicas procedentes de la muestra de ensayo son primordiales para los procedimientos de ensayo no destructivos descritos anteriormente, es altamente deseable transmitir una señal que sea ampliamente no dispersiva, es decir su velocidad sea casi constante con la frecuencia, y esté dominada por un único modo.

40

La dispersión en una guía de ondas y los posibles modos son en gran medida una función del producto de la frecuencia de la señal y la dimensión más pequeña de la guía de ondas. Adicionalmente, para tener una buena precisión para el calibrado del grosor por ultrasonidos es necesario generalmente funcionar por encima de 1 MHz. Sin embargo, con productos frecuencia-dimensión más altos pueden propagarse modos de orden más alto y por ello es necesario limitar la dimensión más pequeña de la guía de ondas. En consecuencia, es conocido en la técnica el uso de guía de ondas de barra delgada. Dichos dispositivos no carecen sin embargo de sus propias dificultades, dado que es difícil transferir suficiente energía al interior de una barra delgada para producir una señal fuerte. También, cuando se une una guía de ondas delgada a una estructura mayor hay una fuerte reflexión superficial y entra relativamente poca energía en la estructura. Adicionalmente, una guía de ondas de barra delgada acoplada a la superficie de una estructura actúa efectivamente como una fuente puntual, desde la que la energía se extiende esféricamente, significando que poca energía vuelve a la guía de ondas receptora, incluso desde un fuerte reflector, tal como la superficie del fondo de la estructura.

55

El documento US-A-5.962.790 (por ejemplo véanse las Referencias 1, 2 y 3 y también la Referencia 4) desvela un sistema que usa un cable delgado para minimizar la dispersión y superar algunos de los problemas de un único cable delgado mediante el empleo de una agrupación de cables delgados. Cada cable funciona con un producto frecuencia-diámetro adecuadamente bajo, aunque puede transmitirse significativamente más energía a través de los múltiples cables paralelos en esta agrupación que a través de un único cable. En cualquier caso, las agrupaciones de cables son relativamente caras de producir y se convierten en bastante inflexibles según se incrementa su diámetro, limitando las geometrías en las que pueden desplegarse. Adicionalmente, la interferencia cruzada de los cables individuales puede complicar el análisis de la señal y hay dificultades prácticas asociadas con o bien fijar cada cable individual a una estructura de ensayo, o bien finalizar la agrupación con una placa que no introduzca problemas de dispersión. En términos de modo de excitación, pueden excitarse en un único cable o bien modos

60

65

extensionales o bien un modo torsional. Un modo torsional se excita normalmente mediante un transductor en contacto con el lateral del cable, o mediante una bobina electromagnética envolvente. Dichas técnicas no son prácticas para una agrupación de cables, en donde de modo realista solo pueden usarse modos extensionales.

5 El documento US-A-6.400.648 (Referencia 5) desvela una guía de ondas de lámina bobinada como una alternativa a una agrupación de barras. El grosor de la lámina se dispone para que sea mucho más pequeño que la longitud de onda más pequeña de la señal propagada, satisfaciendo el bajo producto frecuencia-dimensión para una transmisión no dispersiva. La lámina se bobina alrededor de un eje paralelo a la dirección de propagación de la señal, de modo que, si se desarrollara, sería muy larga en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la señal. Sin embargo cuando el diámetro de la bobina se incrementa, la guía de ondas se convierte en rígida y amortiguadora debido a que puede tener lugar un frotamiento entre las capas. Como una agrupación de cables, una lámina bobinada está mejor adaptada a las ondas extensionales que a las torsionales.

15 El documento US-A-5.828.274 (Referencia 6) desvela una guía de ondas ultrasónica ahusada con una capa externa de revestimiento atenuador. El revestimiento elimina los efectos de los límites de la guía de ondas mediante la amortiguación y limitación de las reflexiones superficiales. Esto tiene el efecto de eliminar casi todos los ecos remanentes, sin embargo los efectos de la dispersión no se eliminan totalmente y la señal se retarda ligeramente, se distorsiona ligeramente y se atenúa fuertemente. La última desventaja limita la longitud de una guía de ondas de ese tipo, lo que también es bastante inflexible. Esta es una mejora sobre las propuestas previas de uso de barras roscadas no uniformes como guía de ondas (véanse las Referencias 7 y 8).

25 El documento US-A-6.047.602 desvela una guía de ondas ultrasónica para medición de caudal de fluido que es una barra de sección transversal rectangular y sección extrema en ángulo. Una superficie de la sección en ángulo refleja la energía que se desplaza a lo largo de la barra hacia un haz dirigido estrecho para entrar en el fluido de ensayo. La guía de ondas se diseña para maximizar la transferencia de energía a través de un conducto. Este dispositivo tiene desventajas significativas en el campo de la medición del grosor o supervisión de defectos, siendo inflexible y no siendo optimizada la propagación de la onda para una forma de señal limpia sin distorsión, que es de la mayor importancia para las mediciones de tiempos en inspecciones no destructivas de una muestra.

30 Cegla et ál., *Material property measurement using the quasi-Scholte mode-A waveguide sensor*, J. Acoust. Soc. Am. 117(3), Pt. 1, marzo de 2005, páginas 1098-1107, desvela un método de ensayo de un líquido por ultrasonidos.

El presente es un problema técnico para proporcionar un aparato práctico para ensayos no destructivos por ultrasonidos capaz de funcionar en entornos hostiles y que acometa los problemas descritos anteriormente.

35 Varios aspectos de la invención se exponen en las reivindicaciones adjuntas.

La presente invención reconoce que hay una necesidad de señales ultrasónicas para finalidades no destructivas a ser transmitidas en una forma sustancialmente no dispersiva, de modo que puedan realizarse precisas mediciones de tiempos. La presente invención reconoce adicionalmente que hay una necesidad de un componente de transmisión de ultrasonidos que sea flexible, de modo que el aparato pueda desplegarse en geometrías complicadas. En consecuencia, mediante la transmisión de señales ultrasónicas a lo largo de una tira alargada con una relación de aspecto de ancho y grosor mayor de la unidad y mediante la excitación de señales que sean sustancialmente no dispersivas, puede realizarse un ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto de ensayo en entornos hostiles para transductores de ultrasonidos tradicionales y en configuraciones que requieren que el componente de transmisión rodee flexiblemente los objetos intermedios.

50 La tira alargada se forma de un material que tiene una velocidad de cizalla C_s y una longitud de onda de cizalla λ_B , en la que $\lambda_B = C_s/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_B , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se forman a partir de componentes de frecuencias diferentes y que tienen longitudes de onda de cizalla que se extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} . Algunos modos de cizalla de las ondas ultrasónicas son ventajosamente no dispersivos y tienen las longitudes de onda más cortas. Longitudes de onda más cortas proporcionan una resolución espacial más fina con finalidades de inspección.

55 De una forma similar dicha tira alargada se forma de un material que tiene una velocidad de barra C_{barra} y una longitud de onda de barra λ_{barra} , en la que $\lambda_{barra} = C_{barra}/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_{barra} , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se forman a partir de componentes de diferentes frecuencias y que tienen longitudes de onda que se extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} . Las ondas compresionales pueden adaptarse mejor a algunas situaciones.

60 Aunque las dimensiones de la tira alargada pueden variar considerablemente, en realizaciones preferidas, el grosor de la tira alargada será menor de 2,5 veces λ_{corta} . En realizaciones particularmente preferidas el grosor de la tira alargada será menor que λ_{corta} . Dichas limitaciones dimensionales ayudan a evitar la excitación de otros modos indeseables de orden más alto.

65

En realizaciones preferidas dicho ancho es mayor de $3,5 \lambda_{\text{larga}}$. En realizaciones aún más altamente preferidas dicho ancho es mayor que $5 \lambda_{\text{larga}}$. Dichas limitaciones dimensionales ayudan a proporcionar que la propagación de la onda ultrasónica sea sustancialmente no dispersiva, tenga baja amplitud en los bordes de la guía de ondas y que la forma del modo sea aproximadamente constante.

5 Aunque pueden usarse diferentes modos ultrasónicos en las realizaciones preferidas, dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones en modo de cizalla de orden más bajo con una polarización perpendicular a la dirección de propagación y paralela a dicho ancho. Dichas señales pueden transmitirse con baja distorsión y alta eficiencia a través de una guía de ondas como se ha descrito anteriormente.

10 En otras realizaciones, dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones en modo de compresión de orden más bajo con polarización paralela a la dirección de propagación. El uso de dichas ondas es beneficioso en aplicaciones en las que se encuentra una alta atenuación de la onda de cizalla en el objeto de ensayo o donde es ventajoso el uso de ondas compresionales en el objeto de ensayo.

15 Aunque es posible la excitación simultánea de múltiples modos de un tipo adecuado, en realizaciones preferidas, dicho transductor ultrasónico excita sustancialmente solo un único modo de onda guiada propagada. En otras realizaciones dicho transductor ultrasónico es recortado para excitar sustancialmente solo dicho único modo de propagación de la onda guiada para inducir dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas. La restricción a un único modo es ventajoso en aplicaciones que requieren información de tiempo precisa, dado que las señales recibidas por separado pueden identificarse más fácilmente como procedentes de características separadas en el objeto de ensayo en lugar de ser el resultado de modos diferentes.

20 En relación a las distancias de propagación deseadas en el objeto bajo ensayo, en realizaciones preferidas, dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se extienden sustancialmente cilíndricamente desde dicho extremo proximal a dicho objeto bajo ensayo. La tasa de decadencia de la amplitud de una onda que se extiende cilíndricamente es proporcional a la inversa de la raíz cuadrada de la distancia desde la fuente, mientras que la amplitud de una onda que se extiende esféricamente es proporcional a la inversa de la distancia desde la fuente. La primera propagación por lo tanto pierde menos energía.

30 Mientras que el transductor podría fijarse a una variedad de posiciones sobre la tira alargada, en las realizaciones preferidas, dicho transductor ultrasónico puede acoplarse ventajosamente a dicho extremo distal. En este contexto dicho transductor ultrasónico se acopla a dicho extremo distal mediante uno de entre:

- 35 (i) una conexión por adhesión;
 (ii) una fijación mecánica y un medio de acoplamiento transmisor ultrasónico; y
 (iii) una fijación mecánica y fuerza variable.

40 Dichos acoplamientos entre el transductor ultrasónico y el extremo distal de la guía de ondas promueven una transferencia de energía eficiente entre los dos. La adhesión incluye la soldadura eléctrica y soldadura con aporte así como otras técnicas de adhesión.

45 El acoplamiento del transductor a la tira alargada puede conseguirse en un cierto número de formas diferentes. En una realización preferida dicho transductor ultrasónico comprende un transductor acoplado a al menos un lado longitudinal de dicha tira alargada. En otra realización preferida dicho transductor ultrasónico comprende una bobina operativa para proporcionar transducción de ultrasonidos electromagnéticamente. Dichas disposiciones permiten métodos eficientes alternativos de excitación de señales ultrasónicas en la guía de ondas.

50 En una realización de la presente invención dicha tira alargada se dobla alrededor de un eje que es sustancialmente paralelo a dicho ancho de dicha tira alargada y sustancialmente perpendicular a la dirección de propagación. Esto permite un enrutado particularmente fácil de las señales ultrasónicas en situaciones de la vida real confinadas.

55 La recepción de la señal ultrasónica puede proporcionarse en una cierta variedad de diferentes maneras. En una realización preferida, dicho aparato comprende un receptor ultrasónico operativo para recibir los ultrasonidos reflejados desde dicho objeto bajo ensayo resultantes de dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas que entran en dicho objeto bajo ensayo. En este contexto, dicho receptor ultrasónico comprende una o más tiras alargadas adicionales, acoplada cada una a dicho objeto bajo ensayo en una posición respectiva para recibir dicho ultrasonido reflejado y que tiene un transductor ultrasónico de recepción para detectar dicho ultrasonido reflejado. En otra realización preferida, dicha tira alargada y dicho transductor ultrasónico también forman dicho receptor ultrasónico.

60 Aunque pueden usarse una variedad de metodologías de ensayo por ultrasonidos en conjunto con la presente técnica, en una realización preferida, dichos ultrasonidos reflejados comprenden al menos unas señales reflejadas y dicho receptor de ultrasonidos mide una diferencia de tiempo entre dichas señales reflejadas. Dicha medición de la diferencia de tiempo da información acerca de la estructura del objeto de ensayo.

65

La presente invención reconoce que mientras que el acoplamiento de dicha tira alargada a dicho objeto bajo ensayo puede conseguirse en muchas formas diferentes, es importante para el rendimiento de dicho aparato y en una realización preferida, dicho extremo proximal se fija a dicho objeto bajo ensayo mediante uno de:

- 5 (i) soldadura eléctrica;
 (ii) soldadura con latón;
 (iii) soldadura con estaño; y
 (iv) adhesión.

10 En otra realización preferida, dicho extremo proximal se sujeta a dicho objeto bajo ensayo. En este contexto, el acoplamiento puede mejorarse mediante un medio de acoplamiento transmisor de ultrasonidos que se disponga entre dicho extremo proximal y dicho objeto bajo ensayo. Adicionalmente, el acoplamiento mejorado puede conseguirse en una realización en la que una mordaza sujeta dicha tira alargada a dicho objeto bajo ensayo con una fuerza ajustable. En realizaciones preferidas dicha mordaza se acopla a dicho objeto bajo ensayo mediante
 15 travesaños soldados a dicho objeto bajo ensayo. Otra forma preferida de mordaza es una que se envuelve alrededor del objeto bajo ensayo, por ejemplo, alrededor de una tubería.

La presente técnica es particularmente útil cuando dicho ensayo no destructivo por ultrasonidos es una medición de grosor o supervisión de grietas.

20 Las presentes técnicas están particularmente bien adaptadas a situaciones en las que dicho objeto bajo ensayo está:

- (i) a temperatura mayor de 200 °C; y
 25 (ii) sometido a radiación de ionización en niveles por encima del fondo.

Se describirán ahora realizaciones de la invención, solamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

30 la Figura 1 ilustra las curvas de dispersión de la velocidad de fase para varios modos ultrasónicos en una barra de acero;
 la Figura 2 ilustra las curvas de dispersión de la velocidad de fase para varios modos ultrasónicos para una placa de acero;
 la Figura 3 ilustra esquemáticamente la calibración del grosor usando un sensor con guía de ondas;
 35 la Figura 4 ilustra esquemáticamente la difracción del tiempo de tránsito usando un sensor de guía de ondas;
 la Figura 5 ilustra esquemáticamente algunas dimensiones de ejemplo de una tira alargada que forma parte de un sensor de acuerdo con las presentes técnicas;
 la Figura 6 ilustra un ejemplo de traza de tiempo recibida usando una tira de 1 por 15 mm de longitudes de 300 mm desde una placa (50 por 50 mm) de 6 mm de grosor usando una señal con una frecuencia central de
 40 2 MHz;
 la Figura 7 muestra curvas de dispersión de la velocidad de fase para modos ultrasónicos dentro de una tira de acero alargada de 1 por 30 mm, destacando el modo horizontal de cizalla de orden más bajo SH*;
 la Figura 8 ilustra esquemáticamente una sección transversal de una tira (1 por 15 mm) y la forma del modo de desplazamiento SH*(X, Y, Z) a 2 MHz;
 45 la Figura 9 ilustra esquemáticamente la evolución de forma del modo de desplazamiento Y SH* con la frecuencia;
 la Figura 10 ilustra esquemáticamente la velocidad de fase para el tipo de modo SH* de cizalla de orden más bajo cuya curva de dispersión se destaca en la Figura 7 cuando se propaga en tiras de sección transversal 1 por 30 mm y 1 por 15 mm respectivamente;
 la Figura 11 ilustra esquemáticamente la forma del modo de desplazamiento SH*(X, Y, Z) (1 por 15 mm de sección transversal) próximo al corte de 0,14 MHz y 0,5 MHz próximo a la curva de la asíntota;
 50 la Figura 12 ilustra la señal desde una guía de ondas soldada a una placa de acero (6 mm de grueso); y
 las Figuras 13 y 14 ilustran esquemáticamente configuraciones de sujeción para la fijación de una guía de ondas a una muestra bajo ensayo.

55 La presente técnica usa una guía de ondas de tira delgada (una tira alargada). Las curvas de dispersión de la velocidad de fase para una placa se muestran en la Figura 2 en función del producto frecuencia-grosor. Por debajo de 1,4 MHz-mm solo se pueden propagar tres modos: S0 (la onda de compresión de orden más bajo con polarización paralela a la propagación), A0 (la onda flexural a bajas frecuencias) y SH0 (el modo de cizalla de orden más bajo con polarización perpendicular a la propagación y paralela al ancho de la tira). Estas ondas son análogas a los modos L(0,1), F(1,1) y T(0,1) en la barra respectivamente. El modo A0 es altamente dispersivo y no es atractivo para finalidades de ensayo pero el modo S0 es mínimamente dispersivo a bajas frecuencias mientras que el modo SH0 es completamente no dispersivo en todas las frecuencias. La Figura 2 muestra que en el intervalo de frecuencias por debajo de 1,4 MHz-mm la velocidad de fase del modo SH0 es mucho más baja que la del modo S0. Dado que la longitud de onda se da por la velocidad de fase dividida por la frecuencia se deduce que a una frecuencia dada el modo SH0 tiene una longitud de onda más corta que el modo S0. Esto lo hace frecuentemente
 60 más sensible en aplicaciones de inspección. Las realizaciones preferidas de la presente técnica usan por lo tanto
 65

modos de cizalla horizontal pero puede haber circunstancias en los que son preferibles los modos compresionales tales como el modo S0 (por ejemplo en aplicaciones en donde la atenuación de la onda de cizalla es mucho más alta que la de la onda extensional de modo que las señales con la onda de cizalla son demasiado débiles para ser usadas).

5 El uso de una guía de ondas de tira tiene las siguientes ventajas sobre un único cable, agrupación y soluciones bobinadas propuestas previamente:

- 10 • Dado que el área de sección transversal es mucho más alta que un único cable, es más fácil obtener señales fuertes; también la reflexión desde la interfaz entre la guía de ondas y la estructura es más pequeña de modo que entra más energía en la estructura de ensayo.
- 15 • Cuando la onda entra en la estructura de ensayo desde la tira tiende a extenderse cilíndricamente. Esto significa que la amplitud de la onda en la estructura disminuye a una tasa proporcional a $1/\sqrt{r}$ debido a la extensión del haz en la que r es la distancia desde el punto de fijación. Esto se compara con una tasa de decaimiento proporcional a $1/r$ para un sistema de cable en donde la extensión del haz es esférica.
- 20 • El patrón de extensión cilíndrico del haz es muy adecuado tanto para simple calibración de grosor como dimensionamiento de grietas basándose en el tiempo de tránsito de la difracción (TOFD) (véase la Figura 3 y la Figura 4).
- 25 • Es fácil excitar una onda de cizalla como una onda longitudinal en la tira mediante la fijación de un transductor al extremo de la tira; es posible también excitar cualquier tipo de onda mediante la fijación de los transductores apropiados a los laterales de la tira si esto es más conveniente.
- 30 • Es posible soldar, soldar por puntos, soldar con aporte, o adherir la guía de ondas a la estructura. Es posible también usar simplemente un medio de acoplamiento de gel ultrasónico viscoso a bajas temperaturas y/o sujetar estrechamente la guía de ondas sobre la estructura (por ejemplo mediante la soldadura de travesaños roscados que dan una fuerza de sujeción ajustable) que trabaja a altas y bajas temperaturas. Dado que la guía de ondas es delgada es relativamente fácil asegurar que toda la superficie del fondo de la guía de ondas se fija a la estructura, mejorando así la transmisión de la señal. Sujetar la guía de ondas a la estructura puede ser ventajoso dado que elimina el inconveniente de distorsiones geométricas indeseables que se introducen inevitablemente mediante técnicas de unión permanente. La transmisión de la señal adecuada puede conseguirse mediante sujeción con mordazas.
- La guía de ondas de tiras es mucho más flexible en una dirección que una agrupación típica de modo que es más fácil acceder a las estructuras alrededor de esquinas.

35 La Figura 5 muestra una realización de ejemplo de la invención. La Figura 6 muestra señales recibidas en la aplicación de calibración del grosor de la Figura 3 en la que puede obtenerse el grosor a partir del tiempo entre las reflexiones de la superficie superior y la superficie inferior o entre ecos de la pared posterior sucesivos conociendo la velocidad del sonido. La muestra puede estar a alta temperatura, por ejemplo $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$, y/o sometida a radiación de ionización en niveles por encima del fondo.

40 El grosor de la tira debería elegirse en general de modo que el producto del grosor y la frecuencia máxima excitada sea menor que $3\text{ MHz}\cdot\text{mm}$ para las ondas de tipo SH y de $1,4\text{ MHz}\cdot\text{mm}$ para ondas de tipo longitudinal para evitar la excitación de modos de orden más alto a través del grosor. Si se usa una onda longitudinal es también frecuentemente deseable usar un producto frecuencia-grosor más bajo para minimizar la dispersión, aunque es posible también compensar la dispersión (véase la Referencia 10). El ancho de la tira es también un parámetro importante.

45 Cuando la tira alargada se forma de un material que tiene una velocidad de cizalla C_s , y una longitud de onda de cizalla λ_B , en la que $\lambda_B = C_s/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_B , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se forman de componentes de diferentes frecuencias y que tienen longitudes de onda de cizalla que se extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} . Es deseable, pero no esencial, que el grosor sea menor de $2,5\lambda_{\text{corta}}$ y particularmente preferido que sea menor de λ_{corta} . De modo similar, se prefiere que el ancho sea mayor que $3,5\lambda_{\text{larga}}$ y particularmente preferido que sea mayor que $5\lambda_{\text{larga}}$.

50 En una forma similar los mismos intervalos preferidos se aplican cuando dicha tira alargada se forma de un material que tiene una velocidad de barra C_{barra} y una longitud de onda de barra λ_{barra} , en la que $\lambda_{\text{barra}} = C_{\text{barra}}/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_{barra} , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se forman de componentes de diferentes frecuencias y que tienen longitudes de onda de barra que se extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} .

60 Las curvas de dispersión de la Figura 2 modelizan la propagación de onda en una placa de ancho infinito. Las estructuras con una relación ancho a grosor muy grande se modelizarán con extremada precisión mediante esta suposición de ancho infinito. Sin embargo cuanto más próximas se muevan las superficies laterales a unirse para crear una tira de sección transversal rectangular, más se influenciará la propagación de la onda por la presencia de los límites de la tira. Mindlin y Fox (véase la Referencia 11) fueron los primeros en describir los modos de propagación de una barra de sección transversal rectangular. Su solución se compuso de una superposición de varios modos flexurales, longitudinales y de cizalla que se propagan en una placa infinita del ancho y grosor de la

barra respectivamente. Las soluciones para la placa infinita se superpusieron para completar las condiciones de contorno de tensión cero alrededor de todo el perímetro de la sección transversal. Este método les permitió determinar las características de dispersión de la barra a distintas frecuencias y relaciones de aspecto de la barra. Sin embargo no fue posible una solución para todas las frecuencias y relaciones de aspecto. Más recientemente, sin embargo, se ha hecho posible el trazado continuo de curvas de dispersión para propagación de ondas en estructuras de sección transversal arbitraria a través del uso de soluciones de eigen de elementos finitos (FE). Wilcox et ál. (véase la Referencia 12), Mukdadi et ál. (véase la Referencia 13) y Hayashi et ál. (véase la Referencia 14) han informado de métodos de trazado de curvas de dispersión para secciones con forma de L, cabezales de carril y tiras.

El método de Wilcox et ál. se ha empleado aquí para analizar los modos de propagación en una tira de acero de 1 mm de grosor y 30 mm de ancho. La Figura 7 muestra las curvas de dispersión de la velocidad de fase. El modo destacado por la línea más gruesa se ha identificado como el primer modo horizontal de cizalla SH* de esta tira. A diferencia del caso de la placa infinita, el modo SH0 de propagación no existe en una tira finita. Esto es debido a la condición de contorno de tensión cero sobre los lados de la tira, que solo puede satisfacerse mediante el movimiento del cuerpo rígido o el SH* y modos de orden más alto. Como consecuencia no existe un modo de cizalla de propagación no dispersiva en una tira de ancho finito. Sin embargo, cuanto más gruesa sea la tira, menor se hace la frecuencia de corte del modo SH*. Dado que el modo SH* se mueve asintóticamente a la velocidad de cizalla en la masa en el material se convierte en virtualmente no dispersivo a frecuencias más altas. En la presente invención el uso de los modos de tira puros virtualmente no dispersivos de naturaleza compresional o de cizalla se usan para transmitir la energía ultrasónica a lo largo de una guía de ondas o "cable acústico" a un espécimen que ha de ser interrogado. La pureza del modo evita la llegada de varias señales que podrían confundirse por un defecto o característica en la estructura interrogada y la no dispersividad del modo ayuda a concentrar la energía de la onda en una ventana de tiempo más estrecha, lo que incrementa el intervalo de propagación de la señal en la guía de ondas y también determina la resolución espacial con la que puede supervisarse la estructura (véase la Referencia 15). Se elaborará en el presente documento un ejemplo basado en el modo SH* mientras que también es posible el uso de modos similares de naturaleza compresional.

La Figura 8 muestra la sección transversal de una tira de 15 mm de ancho y la forma de modo del modo SH* a 2 MHz. Puede verse que los desplazamientos y , que son desplazamientos paralelos a la dirección del ancho de la tira, dominan la forma del modo de modo SH*. Sin embargo, a diferencia de las formas de modo del modo SH en placas infinitas las formas del modo de los modos SH en una tira de ancho finito cambian con la frecuencia. La Figura 9 muestra la evolución del componente de desplazamiento y dominante del modo SH* en un intervalo de frecuencias. Cuanto mayor es la frecuencia más se concentra el modo en el centro de la tira. De ese modo a altas frecuencias el modo propaga la energía a casi la velocidad de cizalla en la masa a lo largo del centro de la tira con poca energía, y por ello sensibilidad, en los bordes.

Por medio de un transductor recortado, que imita la forma de modo del modo, puede conseguirse una excitación de forma del modo puro. Pueden usarse también transductores de bobina. Los transductores pueden colocarse sobre los extremos o los laterales de la tira. Dado que los pulsos temporales cortos son señales de emisión, la forma de modo del modo no debería cambiar significativamente sobre el ancho de banda de frecuencia del pulso de excitación. A frecuencias más altas (alrededor de la frecuencia central de 2 MHz) este es el caso para el modo SH* de tiras de ancho mayor. Por lo tanto hay dos criterios que controlan el intervalo permitido de relaciones de aspecto de la tira. El primero es que el modo es virtualmente no dispersivo (variaciones de velocidad de menos del 5 %) en el ancho de banda de la frecuencia de interés y el segundo es que existe una forma del modo relativamente constante a través del ancho de banda de frecuencias de interés (menos del 10 % de diferencia en amplitudes normalizadas). Para el modo SH* es ahora la tarea hallar el límite de la relación de aspecto para la que se satisfacen ambos criterios.

Las curvas de dispersión para una placa infinita pueden hacerse independientes de la geometría mediante el trazado de curvas contra el producto frecuencia grosor (FT). Por lo tanto el modo de corte sobre una placa de grosor doble del de otra la placa tendrá lugar a una frecuencia mitad. Dado que la relación ancho/grosor es mayor (> 5) en nuestro caso el sistema puede escalarse aproximadamente mediante dos productos; el producto FT para frecuencia-grosor de la tira y el producto FW para la frecuencia-ancho de la tira. Razonando a lo largo de estas líneas y manteniendo el grosor de la tira constante (FT constante), el ancho de la tira puede ajustarse hasta un caso límite en el que las curvas de dispersión y las formas del modo no cumplen los criterios anteriormente establecidos para una excitación y propagación con éxito de un modo simple. La Figura 10 muestra las curvas de dispersión de velocidad de fase del modo SH* para una tira de 1 mm de grueso y 30 mm de ancho y una tira de 1 mm de grueso y 15 mm de ancho. La frecuencia de corte del modo en la tira de 15 mm de ancho tiene lugar al doble de la frecuencia. La Figura 11 muestra la forma de modo del modo SH* cerca de la frecuencia de corte (punto 1.) y frecuencias próximas al punto en el que la velocidad de fase comienza a ser asintótica (punto 2.) hacia la velocidad en la masa de cizalla de la tira. En el corte el modo presenta grandes desplazamientos en los bordes de la tira. Los desplazamientos en los bordes se hacen despreciables a frecuencias más altas.

Las frecuencias útiles para inspección varían entre 1 MHz-5 MHz. Sin embargo se emplea comúnmente una excitación con pulsos de banda más ancha en supervisión de defectos y grosor. Esto requiere un ancho de banda de

la mitad de la frecuencia central por debajo y de la mitad por encima de la frecuencia central de la señal. Así para un pulso de frecuencia central de 1 MHz la guía de ondas debe presentar una propagación de ondas no dispersiva similar a través del intervalo de 0,5-1,5 MHz. De modo similar para una señal de frecuencia central de 2 MHz ese intervalo se extiende desde 1 MHz-3 MHz. Como puede verse en la Figura 10, la tira de 1 mm de grosor y 15 mm de ancho se convierte en inadecuada para el envío de un pulso de 1 MHz. La velocidad de fase del modo SH* no se ha hecho aún asintótica a la velocidad en la masa de cizalla. El modo es aun relativamente dispersivo en el intervalo de frecuencias 500-800 kHz y su forma del modo (Figura 11(b)) no tiene amplitudes despreciables (~25 %) en los bordes. También puede verse en la Figura 11 (a) y (b) que hasta que el modo comienza a ser asintótico a la velocidad de onda de cizalla su forma del modo no es dominada por el componente en la dirección Y. Sin embargo, la misma tira es adecuada para el envío de una señal a una frecuencia central de 2 MHz. Dentro del ancho de banda de una señal de 2 MHz (1-3 MHz) la dispersión es muy limitada y la forma del modo aproximadamente constante (+/- 5 %). Por lo tanto, para una propagación de la onda con éxito (en la forma del modo SH*) a lo largo de la tira la frecuencia-ancho debe ser mayor de 15 MHz-mm. Expresado en una relación del ancho sobre la longitud de onda de cizalla en la masa del material de la guía de ondas, el ancho debe ser más ancho que 5 longitudes de onda de cizalla en la masa en el componente de frecuencia más baja contenido dentro de la señal.

Ondas compresionales

El mismo procedimiento que anteriormente puede llevarse a cabo para modos de tira de tipo compresional. Su uso podría ser beneficioso en casos en donde se encuentra una atenuación de onda de cizalla alto en la estructura o cuando es ventajoso el uso de ondas compresionales en la estructura.

Fijación

La transmisión de la energía a través de la "junta" del "cable acústico" (guía de ondas) a la estructura que se ha de supervisar es también importante. El problema de las fuerzas de punto y línea normales sobre un semi-espacio elástico es bien conocido como problema de Lamb y se resolvió primero por Lamb (véase la Referencia 16). Otros trabajadores han presentado soluciones para problemas similares con diferentes geometrías y polarizaciones de fuente. Miller y Pursey (véase la Referencia 17) consideraron tiras infinitamente largas y discos cargando la superficie normalmente, tangencialmente y en torsión. Achenbach (vea la Referencia 18) presentó una solución para una fuente lineal infinita de cizalla anti-plano sobre un semi-espacio elástico, que es una solución simplificada 2D de un modo SH* en una guía de ondas que entra en una estructura mayor. En este caso la onda de cizalla anti-plano excitada en semi-espacio radia cilíndricamente desde la fuente al interior de la estructura. La excitación de una onda superficial que tiene lugar bajo todas las otras condiciones de carga no ocurre en la carga de cizalla anti-plano. Esto es deseable para supervisión de defectos o calibración del grosor dado que produce unas señales menos complicadas por la eliminación de conversiones de modo. También los patrones de radiación descritos por Miller y Pursey para otras fuentes son más complicados y contienen siempre una onda superficial que reclama una gran fracción de la energía. Una fuente de tira para una guía de ondas compresional es también beneficiosa en comparación con una fuente puntual dado que reduce la extensión esférica a extensión cilíndrica de la onda desde la fuente. También cuanto más gruesa sea la tira, menos energía se convierte en una onda superficial.

El método de unión de la guía de ondas a la estructura es importante. Son posibles métodos como soldadura eléctrica, soldadura con latón o soldadura con estaño así como sujeción por contacto en seco bajo una gran fuerza normal. Una fijación por soldadura eléctrica o soldadura con aporte frecuentemente alteran la geometría de entrada de la guía de ondas dentro de la estructura. Es probable que se produzcan cordones, residuos de metal de relleno y rebabas a lo largo del borde en donde la guía de ondas se une a la estructura. Es difícil eliminar las rebabas o residuos, dado que están muy próximos a la estructura y a la guía de ondas. La gran diferencia en grosor entre la delgada guía de ondas y la estructura también los hace muy difícil de soldar o soldar con aporte la tira sobre la estructura sin dañarla. Los cambios en la geometría introducidos por las técnicas de unión son casi siempre de la magnitud del grosor de la guía de ondas y del orden de una longitud de onda (a las frecuencias dadas) de una onda en el material. Esto provoca reverberaciones de la señal dentro de la junta y degrada la señal que vuelve al transductor. La Figura 12 muestra dicha señal de una guía de ondas soldada a una placa de apoyo de 6 mm. Son identificables una reflexión de entrada y un eco en la pared posterior; sin embargo la señal está cubierta por una gran cantidad de ruidos debido a las reverberaciones en la junta. Esto puede enmascarar señales más débiles o características de la estructura. Inicialmente se pensó que la soldadura eléctrica, la soldadura con latón, la soldadura con estaño o la adhesión de la guía de ondas a la estructura era la mejor solución para fijar la guía de ondas. Indudablemente, es la solución que transmite un montón de energía al interior de la estructura y es una buena opción en el modo de pulso-eco (enviar y recibir sobre el mismo transductor). Inconvenientes con los métodos de unión permanentes son la contaminación de la señal con alto ruido debido a las reverberaciones en la junta. Estos inconvenientes son difíciles de eliminar, por lo tanto en casos en los que es importante la "claridad" de la señal se prefiere un método de mordaza. El método de mordaza trabaja en el modo de tono captura (envío en un transductor recepción en otro). La señal se inyecta dentro de la estructura a través de una guía de ondas y se recoge por una guía de ondas que se coloca justamente al lado de la guía de ondas de envío. La señal en la tira de envío en el modo "pulso eco" difícilmente se cambia para una guía de ondas sujeta o libre. Esto es debido a que la guía de ondas y la subestructura no están en muy buen contacto cuando se sujetan y se presionan juntos. La gran reflexión de entrada, ruidos y la presencia de otros modos (30 dB más bajos que la señal) enmascaran completamente la

señal de baja amplitud desde la estructura. Este problema se supera mediante el trabajo en el modo de tono captura y el uso de otra guía de ondas como colector para la señal que se ha transmitido al interior de la estructura. Los resultados se ven en la Figura 6. La configuración tono captura tiene la ventaja de que solo recoge la energía que se ha transmitido dentro la estructura y por lo tanto reduce la dependencia de la relación de amplitud transmitida a reflejada en la junta de la guía de ondas y estructura.

La Figura 13 y la Figura 14 muestran esbozos de posibles configuraciones de sujeción a una estructura como una placa y una tubería. En el caso de una estructura como una placa, habrá de fijarse sobre la estructura una característica que permita a la guía de ondas sujeta ser apretado sobre la superficie de la estructura. Si es posible pueden soldarse travesaños sobre la placa base y la mordaza de la guía de ondas puede atornillarse sobre estos travesaños. Hay muchas otras variaciones posibles. La Figura 14 muestra una solución completamente extraíble en la que la guía de ondas sujeta con mordazas se fija a la tubería por medio de dos abrazaderas de tubería. Es importante tener una mordaza que solo toque los bordes de la guía de ondas de modo que no influya en la propagación de la onda en el centro de la tira. También un agarre próximo al extremo de la guía de ondas evita abolladuras de la delgada guía de ondas cuando se fuerza sobre la superficie.

Referencias

1. Lynnworth, L.C. "Marginally dispersive ultrasonic waveguides" Patente de Estados Unidos 5.159.838, 1992
2. Lynnworth, L.C. "Ultrasonic path bundle and systems" Patente de Estados Unidos 5.962.790, 1999
3. Lynnworth, L.C., Yi Liu, Umina, J.A. "Extensional bundle waveguide techniques for measuring flow of hot fluids", *IEEE Trans UFFC*, 52, págs. 538-544, 2005.
4. Winston, T.R. y Brunk, J.A. "Method and apparatus for ultrasonic inspection of inaccessible areas", Patente de Estados Unidos 6.230.568, 2001.
5. Heijnsdijk, A.M. y van Klooster, J.M. "Ultrasonic waveguide", Patente de Estados Unidos 6.400.648, 2002.
6. Jen, C.K. y Legoux, J. G. "Clad Ultrasonic Waveguides with reduced trailing echoes", Patente de Estados Unidos 5.828.274, 1998
7. Araki, H. y Matsunaga, Y. "Ultrasonic Flow Meter", Patente de Estados Unidos 4.014.211, 1977
8. Sather, A. "Ultrasonic buffer-rod technique for the high temperature measurement of the elastic moduli of short specimens", *J Acoust Soc Am* 43(6), págs. 1291-1294, 1968
9. Lynnworth, L.C. "Ultrasonic Buffer/Waveguide", Patente de Estados Unidos 6.047.602, 2000
10. Wilcox, P. D., "A Signal Processing Technique to Remove the Effect of Dispersion from Guided Wave Signals", *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelec. and Freq. Cont.* 50(4), págs. 419-427, 2003.
11. Mindlin, R.D. y Fox, E.A. "Vibrations and Waves in Elastic Bars of Rectangular Cross Section", *J App Mech*, págs. 152-158, 1960
12. Wilcox P., Evans M., Diligent O., Lowe M., Cawley P. "Dispersion and excitability of guided acoustic waves in isotropic beams with arbitrary cross section", *Review of Progress in quantitative NDE* 21, D.O. Thompson and D. E. Chimenti, AIP
13. Mukdadi O. M., Desai Y. M., Datta S., Shah A.H., Niklasson A. J. "Elastic guided waves in a layered plate with rectangular cross section", *J Acoust Soc Am* 112, págs. 1766-1779, 2002
14. Hayashi T., Song W., Rose J. L. "Guided wave dispersion curves for a bar with an arbitrary cross-section, a rod and rail example", *Ultrasonics* 41, págs. 175-183, 2003
15. Wilcox P., Lowe M., Cawley P., "The effect of dispersion on long-range inspection using ultrasonic guided waves", *NDT&E international* 34, págs. 1-9, 2001
16. Lamb H., "On the propagation of tremors over the surface of an elastic solid", *Phil. Trans. R. Soc.* A203, págs. 1-42, 1904
17. Miller G.F., Pursey H., "The field and radiation impedance of mechanical radiators on the free surface of a semi-infinite isotropic solid.", *Proc. R. Soc.* 223, págs. 521-541, 1954
18. Achenbach J. D., "Wave propagation in elastic solids", *North-Holland Publishing Company*, págs. 283-289, 1975.

REIVINDICACIONES

1. Un método de ensayo por ultrasonidos de una estructura, comprendiendo el método:
 - 5 acoplar un extremo proximal de una tira alargada a dicha estructura; y excitar señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas en el interior de dicha tira alargada para su propagación a lo largo de dicha tira alargada y para entrar en dicha estructura, en el que dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden uno o más de:
 - 10 vibraciones en modo de cizalla del orden más bajo con una polarización perpendicular a la dirección de propagación y paralelas a una anchura de dicha tira alargada; y vibraciones en modo de compresión del orden más bajo con polarización paralela a la dirección de propagación.
 - 15 2. Un método de la reivindicación 1, en el que dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones en modo de cizalla del orden más bajo con una polarización perpendicular a la dirección de propagación y paralela a un ancho de dicha tira alargada, dicha tira alargada está formada de un material que tiene una velocidad de cizalla C_s y una longitud de onda de cizalla λ_B , en la que $\lambda_B = C_s/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_B , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas excitadas en el interior de dicha tira alargada se forman de componentes de diferentes frecuencias y tienen longitudes de onda de cizalla que se
 - 20 extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} .
 3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2 en el que dicha tira alargada tiene una sección transversal con un grosor menor que $2,5 \lambda_{corta}$.
 - 25 4. Un método de acuerdo con la reivindicación 2 en el que dicha tira alargada tiene una sección transversal con un grosor menor que λ_{corta} .
 5. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2, 3 o 4, en el que dicha tira alargada tiene una sección transversal con una anchura mayor que $3,5 \lambda_{larga}$.
 - 30 6. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2, 3 o 4, en el que dicha tira alargada tiene una sección transversal con una anchura mayor que $5 \lambda_{larga}$.
 7. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 2, 3 o 4, en el que dicha tira alargada tiene una
 - 35 sección transversal con un grosor menor que λ_{larga} .
 8. Un método de acuerdo con la reivindicación 1, en el que dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones el modo de compresión del orden más bajo con polarización paralela a la
 - 40 dirección de propagación, dicha tira alargada está formada de un material que tiene una velocidad de barra C_{barra} y una longitud de onda λ_{barra} , en la que $\lambda_{barra} = C_{barra}/F$ y F es la frecuencia correspondiente a λ_{barra} , y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se forman a partir de componentes de diferentes frecuencias y que tienen longitudes de onda que de barra se extienden desde λ_{corta} a λ_{larga} .
 9. Un método de acuerdo con la reivindicación 8 en el que dicho grosor es menor que $2,5 \lambda_{corta}$.
 - 45 10. Un método de acuerdo con la reivindicación 8 en el que dicho grosor es menor que λ_{corta} .
 11. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicha anchura es mayor que $3,5 \lambda_{larga}$.
 - 50 12. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicho ancho es mayor que $5 \lambda_{larga}$.
 13. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que dicho grosor es menor que
 - 55 λ_{larga} .
 14. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 13, en el que sustancialmente solo se excita un único modo de onda guiada propagada en dicha guía de ondas alargada.
 - 60 15. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, en el que dicho ensayo no destructivo por ultrasonidos es una medición de grosor.
 16. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en el que dicho ensayo no destructivo
 - 65 por ultrasonidos es una supervisión de grietas.

17. Un método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 15, en el que dicho objeto bajo ensayo está:

- 5 (i) a una temperatura mayor de 200 °C; y
 (ii) sometido a radiación de ionización en niveles por encima del fondo.

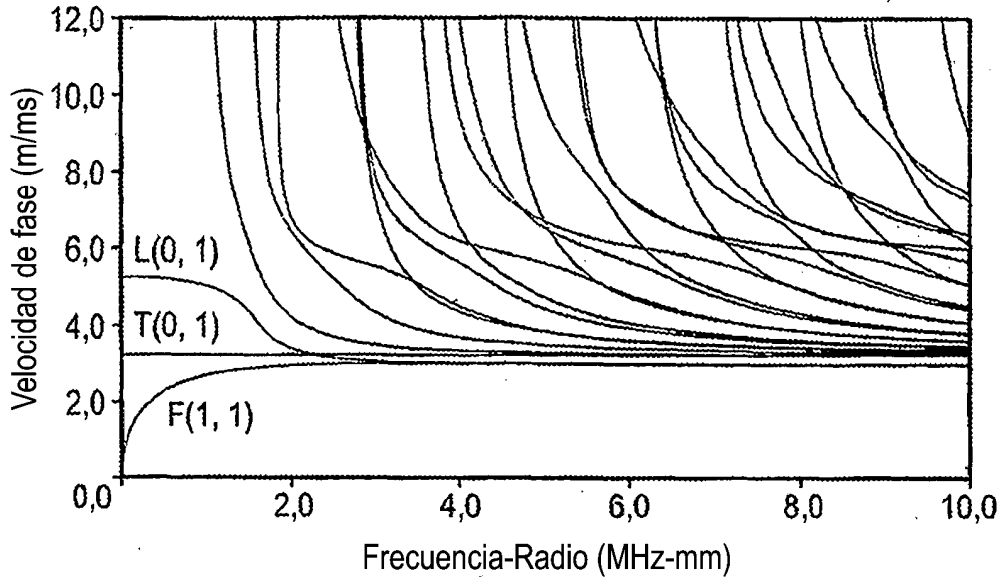


Fig. 1

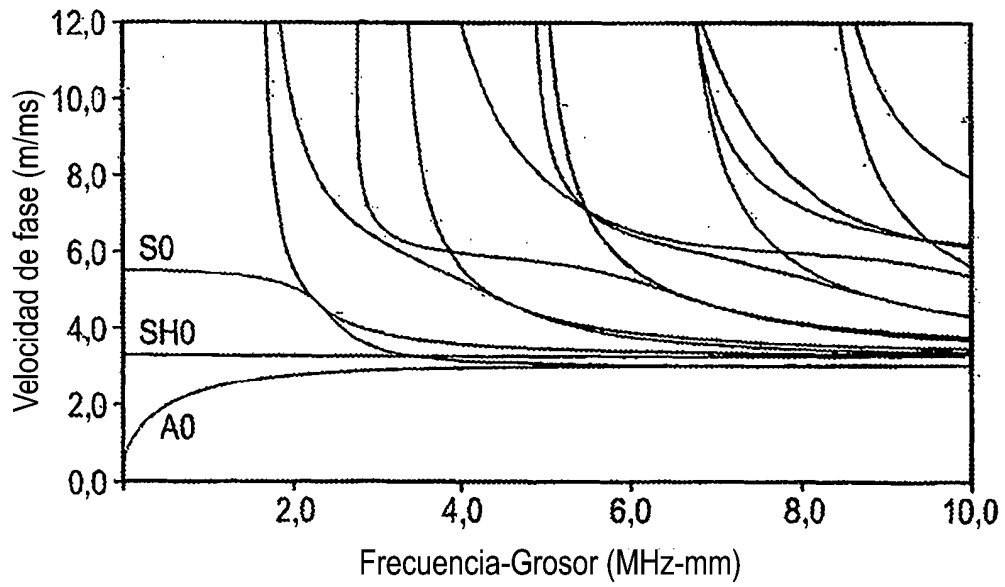


Fig. 2

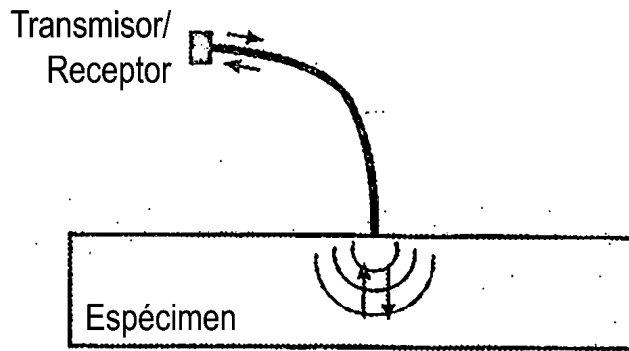


Fig. 3

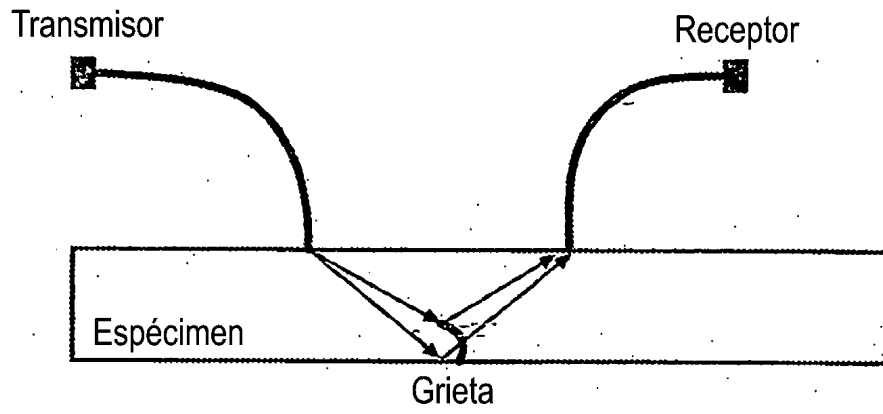


Fig. 4

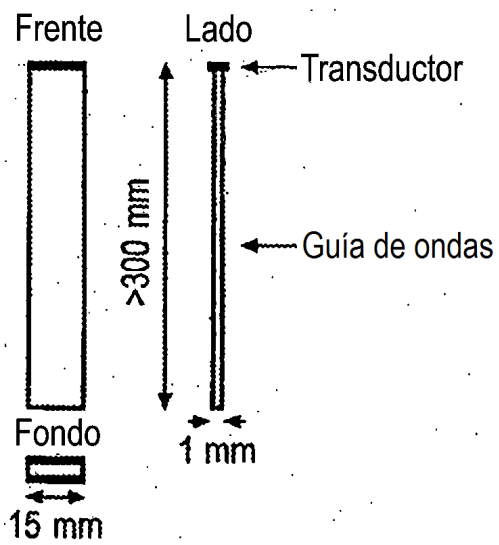


Fig. 5

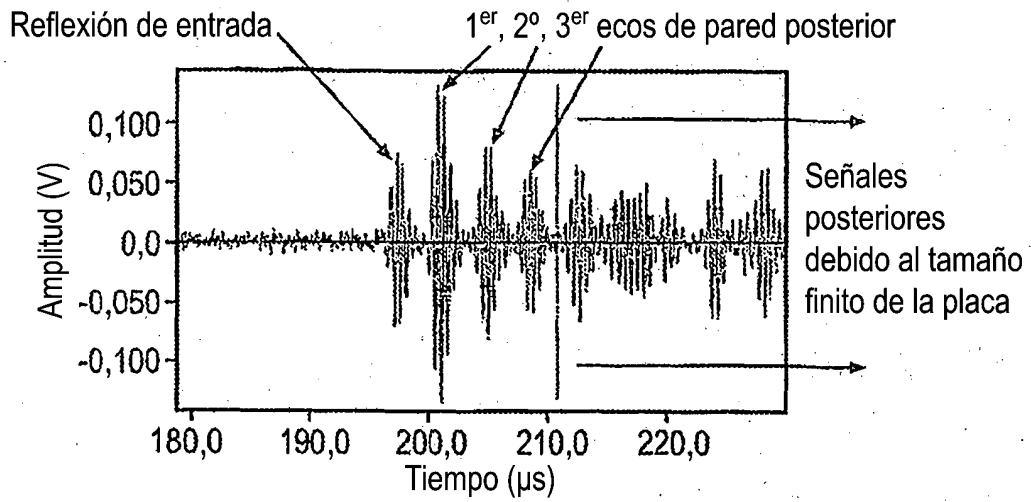


Fig. 6

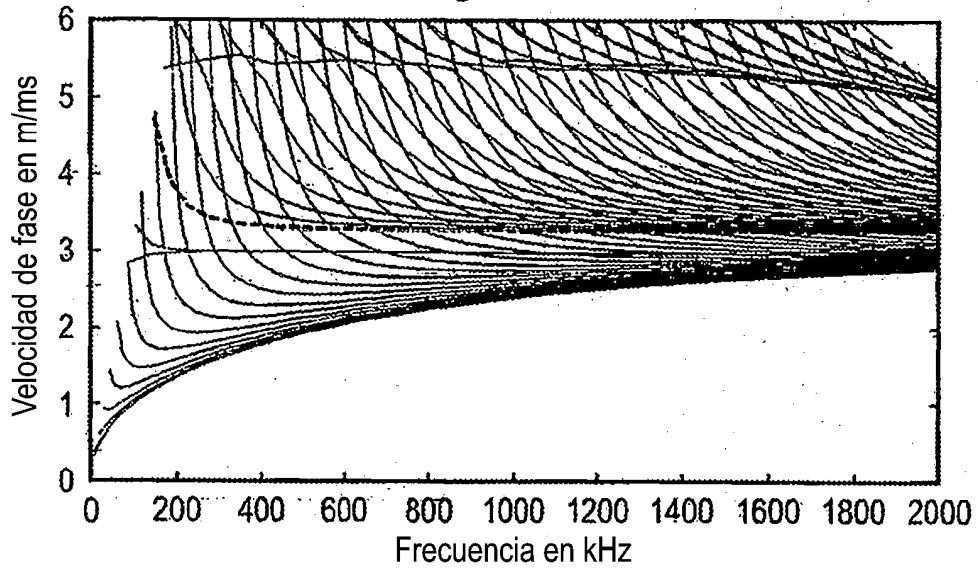


Fig. 7

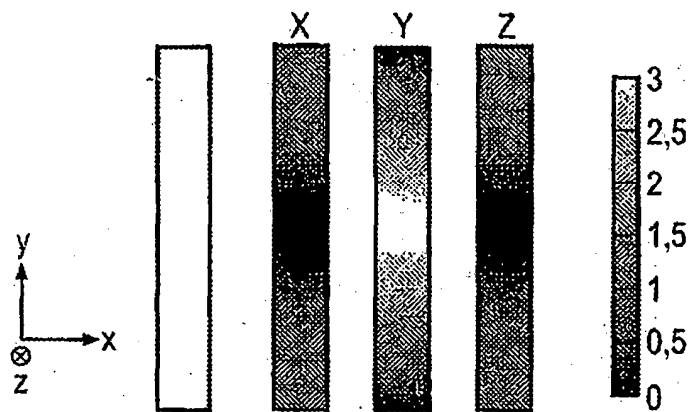


Fig. 8

Forma del modo del desplazamiento Y a diferentes frecuencias

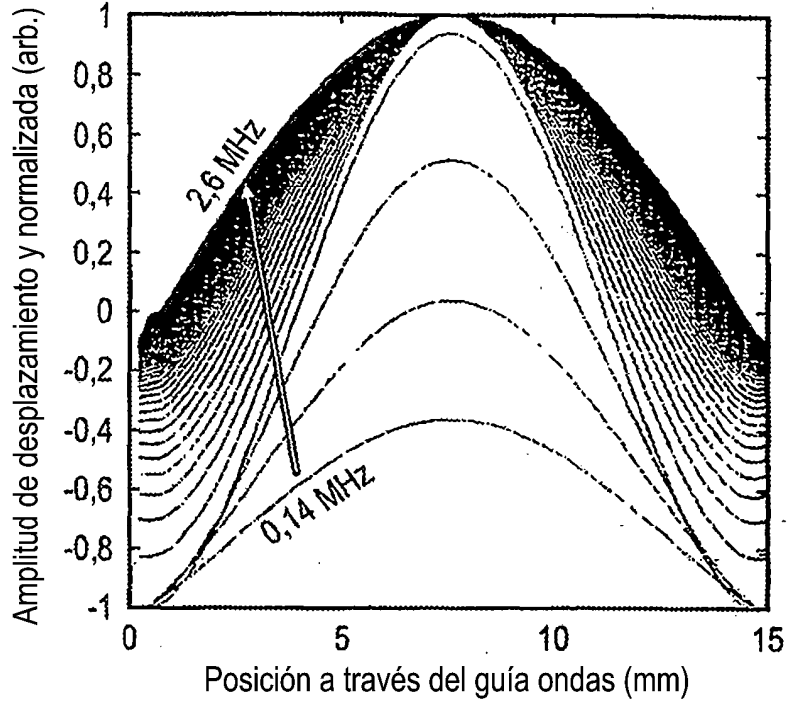


Fig. 9

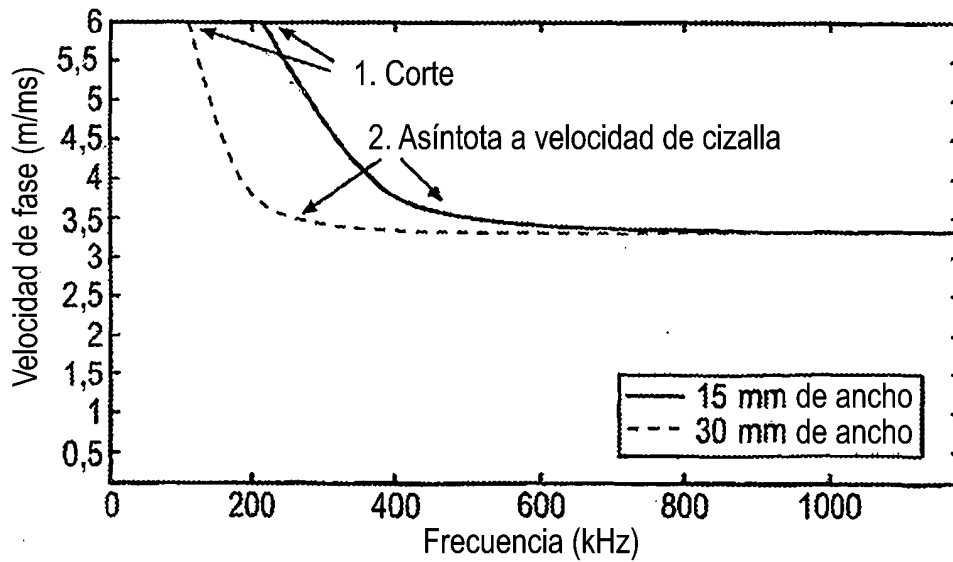


Fig. 10

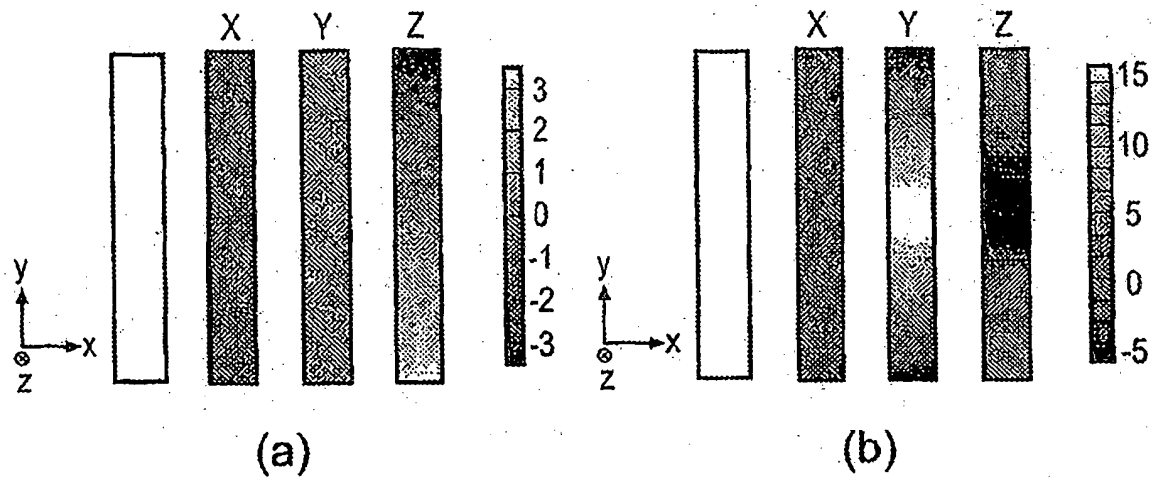


Fig. 11

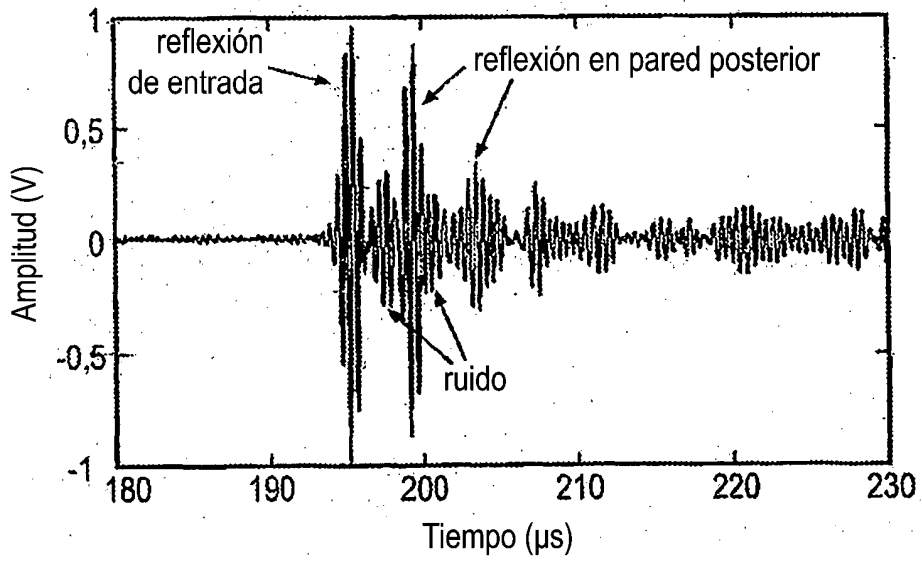


Fig. 12

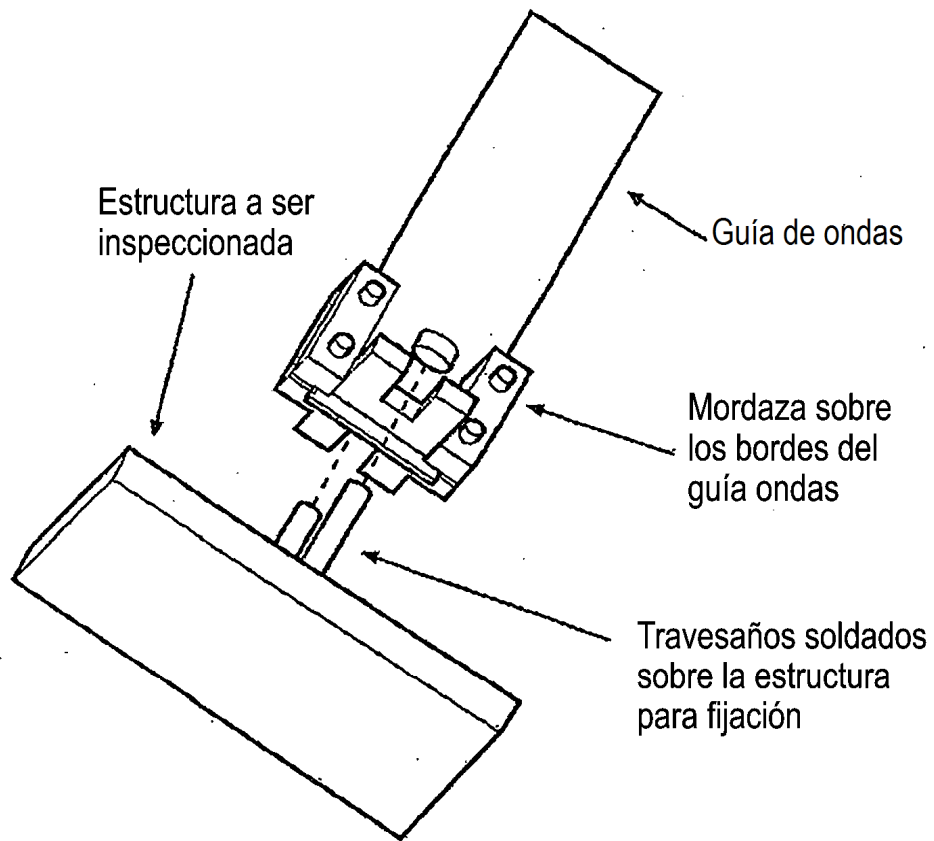


Fig. 13

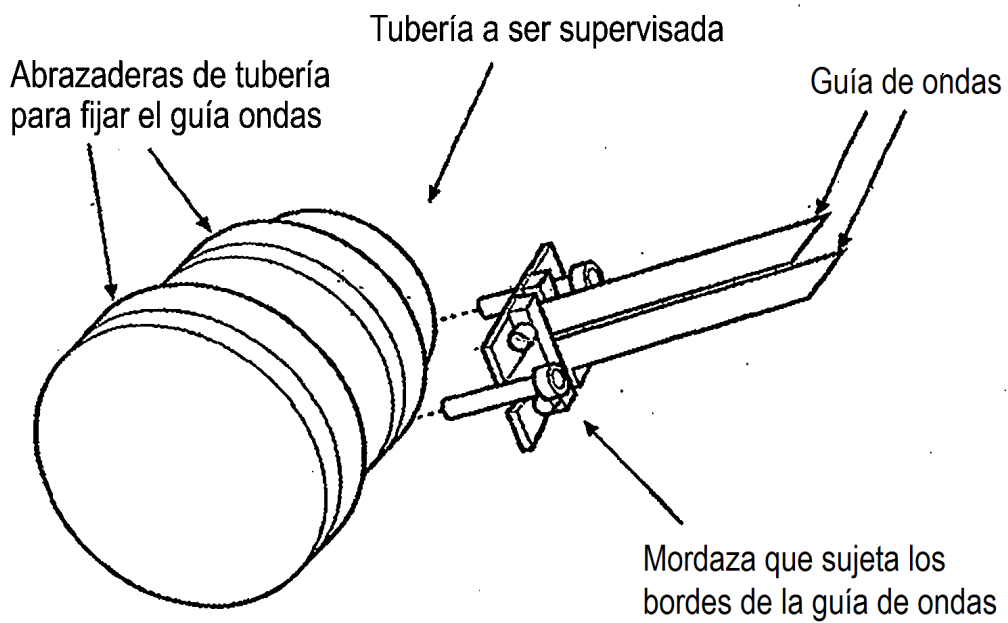


Fig. 14