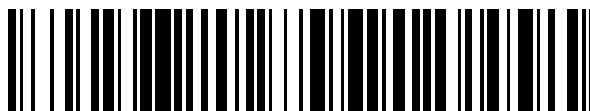


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 639 841**

51 Int. Cl.:

**B06B 3/00** (2006.01)

**G10K 11/24** (2006.01)

**G01N 29/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.09.2006 PCT/GB2006/003415**

87 Fecha y número de publicación internacional: **10.05.2007 WO07051959**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.09.2006 E 06779427 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.08.2017 EP 1954413**

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:

**30.10.2017**

73 Titular/es:

**PERMASENSE LIMITED (100.0%)  
Accurist House, 44 Baker Street, Marylebone  
London, W1U 7AL, GB**

72 Inventor/es:

**CAWLEY, PETER y  
CEGLA, FREDERICK, BERT**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 639 841 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. Normalmente, se coloca un transductor ultrasónico en contacto directo con el objeto bajo ensayo. Las señales ultrasónicas transmitidas son recibidas 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, las altas temperaturas).

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

30 Una alternativa atractiva sería usar una guía de ondas acústica fabricada a partir 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 normalmente 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, los múltiples modos y la atenuación. Adicionalmente, tanto los transductores como la muestra de ensayo deben acoplarse eficazmente a la guía de ondas para evitar grandes y prohibitivas pérdidas de energía.

35 Un problema principal que ha de superarse 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 que se disperse un poco de la energía de la señal transmitida, así, por ejemplo, una señal generada a una frecuencia central de 2 MHz tendrá normalmente 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, en gran medida, no dispersiva, es decir, que su velocidad sea casi constante a la frecuencia, y esté dominada por un único modo.

45 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 obtener una buena precisión para el calibrado del grosor por ultrasonidos es necesario generalmente que funcione por encima de 1 MHz. Sin embargo, con productos frecuencia-dimensión más altos pueden propagarse modos de orden más altos, 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 guías 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 eficazmente como una fuente puntual, desde la que la energía se extiende esféricamente, lo que significa que vuelve poca energía a la guía de ondas receptora, incluso desde un fuerte reflector, tal como la superficie del fondo de la estructura.

60 El documento US-A-5.962.790 (por ejemplo, véanse las Referencias 1, 2 y 3 y también la Referencia 4) divulga 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 vuelven bastante inflexibles según aumenta su diámetro, limitando las geometrías en las que pueden desplegarse. Adicionalmente, la diafonía de los cables individuales puede complicar el análisis de la señal y hay dificultades prácticas asociadas con, o bien fijar cada cable individual a la estructura de ensayo, o bien finalizar la agrupación con una placa que no introduzca problemas de dispersión. En

términos de suscitación de modos, pueden suscitarse en un único cable, o bien modos extensionales, o bien un modo torsional. Un modo torsional se suscita 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) divulga una guía de ondas de lámina bobinada, tal 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  
10 señal, de modo que, si se desenvolviera, sería muy larga en una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la señal. Sin embargo, cuando el diámetro de la bobina aumenta, 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  
20 ese tipo, que también es inflexible. Esta es una mejora con respecto a las propuestas previas de uso de barras roscadas no uniformes como guías de ondas (véanse las Referencias 7 y 8).

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 con una sección terminal en ángulo. Una superficie de la sección en ángulo  
25 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 está diseñada 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 vital importancia para las mediciones de tiempos en las inspecciones no destructivas de una muestra.

30 La obra CELGA F.B. *ET AL: "Material Property measurement using the quasi-Scholte mode-A waveguide sensor"*, JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, AIP/ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, MELVILLE, Nueva York, EE.UU., vol. 117, n.º 3, marzo de 2005 (2005-03), páginas 1098-1107, ISSN: 0001-4966 desvela las técnicas para su uso en la industria alimenticia y en otras industrias, mediciones reológicas y la determinación del tamaño de las partículas en suspensiones y emulsiones, de gran importancia para el control del proceso y calidad. Los métodos de ensayo por ultrasonidos basados en células existen, pero habitualmente son molestos. Una alternativa atractiva podría ser insertar una simple "tira reactiva" de medición en el fluido. Este trabajo presenta un estudio inicial de la factibilidad de utilizar mediciones de la velocidad y atenuación del modo cuasi-Scholte sobre una placa para obtener la velocidad y la atenuación longitudinales de un medio de incorporación. La  
40 atenuación del modo cuasi-Scholte se produce mediante dos mecanismos: la fuga de cizallamiento y la atenuación debidas a la atenuación longitudinal en la masa del material de incorporación. En un ensayo de calibración, la velocidad y viscosidad longitudinal en la masa del glicerol se determinaron de forma experimental. Las mediciones coincidieron con los resultados de los métodos de convención y con los datos de la bibliografía. También se presentan los resultados cuantitativos y una validación independiente de la miel, un fluido muy viscoso. Para los líquidos newtonianos como el glicerol y la miel, la fuga de cizallamiento y la atenuación longitudinal en la masa se relacionan con la viscosidad. Para demostrar la sensibilidad a los mecanismos de atenuación no viscosos, se presentan resultados de mediciones cualitativas sobre los fluidos que principalmente presentan atenuación debido a la dispersión.

50 Existe un problema técnico para proporcionar un aparato práctico para ensayos no destructivos por ultrasonidos capaz de funcionar en entornos hostiles y que aborde los problemas descritos anteriormente.

Sumario de la invención

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

La presente invención reconoce que existe la necesidad de disponer de señales ultrasónicas con fines no destructivos que han de transmitirse en una forma sustancialmente no dispersiva, de modo que puedan realizarse precisas mediciones de tiempos. La presente invención reconoce también que existe la necesidad de un disponer de  
60 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 que la unidad y mediante la suscitación 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 evite de manera flexible los objetos intermedios.

5 La tira alargada se forma de un material que tiene una velocidad de cizalla  $C_s$  y una longitud de onda de cizalla  $\lambda_B$ , en la que  $\lambda_B = C_s/F$  y  $F$  es la frecuencia correspondiente a  $\lambda_B$ , 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  $\lambda_{corta}$  a  $\lambda_{larga}$ . 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.

10 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  $\lambda_{barra}$ , en la que  $\lambda_{barra} = C_{barra}/F$  y  $F$  es la frecuencia correspondiente a  $\lambda_{barra}$ , 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  $\lambda_{corta}$  a  $\lambda_{larga}$ . Las ondas compresionales pueden adaptarse mejor a algunas situaciones.

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

20 En realizaciones preferidas, dicho ancho es mayor que  $3,5 \lambda_{larga}$ . En realizaciones aún más altamente preferidas, dicho ancho es mayor que  $5 \lambda_{larga}$ . 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.

25 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 eficacia a través de una guía de ondas como se ha descrito anteriormente.

30 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.

35 Aunque es posible la suscitación simultánea de múltiples modos de un tipo adecuado, en realizaciones preferidas, dicho transductor ultrasónico suscita sustancialmente solo un único modo de propagación de onda guiada. En otras realizaciones dicho transductor ultrasónico se apodiza para suscitar sustancialmente solo dicho único modo de propagación de onda guiada, y así inducir dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas. La restricción a un único modo es ventajosa 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.

45 En relación a las distancias de propagación deseadas en el objeto bajo ensayo, en realizaciones preferidas, dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se extienden sustancial y cilíndricamente desde dicho extremo proximal hasta 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. Por lo tanto, la primera propagación pierde menos energía.

50 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:

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

60 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 y la soldadura fuerte, así como otras técnicas de adhesión.

65 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 electromagnética. Dichas disposiciones permiten métodos eficaces alternativos de suscitación de señales ultrasónicas en la guía de ondas.

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.

5 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.

15 Aunque pueden usarse una variedad de metodologías de ensayo por ultrasonidos junto 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.

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

- 25 i) soldadura;
- ii) soldadura fuerte;
- iii) soldadura blanda; y
- iv) adhesión.

30 En otra realización preferida, dicho extremo proximal está sujeto 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 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.

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

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

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

45 Vista desde un segundo aspecto, la presente invención proporciona un método de ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto bajo ensayo, comprendiendo dicho método:

50 el acoplamiento de un extremo proximal de una tira alargada a un objeto bajo ensayo;  
la suscitación de señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas en el interior de dicha tira alargada para que se propaguen a lo largo de dicha tira alargada y para que entren en dicho objeto bajo ensayo.

El método preferido se extiende a cada una de las características expuestas en las reivindicaciones del aparato, y a cada una de las características expuestas anteriormente en relación con el aparato preferido.

55 A continuación se describirán las realizaciones de la invención, solamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

60 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;

65 la Figura 3 ilustra esquemáticamente la calibración del grosor usando un sensor con guía de ondas;

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 conformidad con las presentes técnicas;

5 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 2 MHz;

10 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\*;

15 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;

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;

20 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;

la Figura 12 ilustra la señal desde una guía de ondas soldada a una placa de acero (6 mm de grosor); y

25 las Figuras 13 y 14 ilustran esquemáticamente configuraciones de sujeción para la fijación de una guía de ondas a una muestra bajo ensayo.

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 como una 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 con fines de ensayo, pero el modo S0 es mínimamente dispersivo a bajas frecuencias y 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 determinada, el modo SH0 tiene una longitud de onda más corta que el modo S0. Esto lo hace frecuentemente más sensible en aplicaciones de inspección. Las realizaciones preferidas de la presente técnica usan por lo tanto 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).

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

- Dado que el área de sección transversal es mucho mayor 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.
- 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.
- El patrón de extensión cilíndrico del haz es muy adecuado tanto para la simple calibración del grosor como para el dimensionamiento de grietas en función del tiempo de tránsito de la difracción (TOFD) (véanse la Figura 3 y la Figura 4).
- Es fácil suscitar una onda de cizalla o una onda longitudinal en la tira mediante la fijación de un transductor al extremo de la tira; es posible también suscitar cualquier tipo de onda mediante la fijación de los transductores apropiados a los laterales de la tira si esto es más conveniente.
- Es posible llevar a cabo la soldadura, soldadura blanda, soldadura fuerte o la adhesión de 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 firmemente 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.

La Figura 5 muestra una realización de ejemplo de la invención. La Figura 6 muestra las 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 los sucesivos ecos de la pared posterior conociendo la velocidad del sonido. La muestra puede estar a alta temperatura, por ejemplo  $> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y/o sometida a radiación ionizante en niveles por encima del fondo.

El grosor de la tira debería elegirse, en general, de modo que el producto del grosor y la frecuencia máxima suscitada 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, y así evitar la suscitación 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.

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

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

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-grosor muy grande se modelizarán con extremada precisión mediante esta suposición de ancho infinito. Sin embargo, cuanto más próximas se unan las superficies laterales 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 la propagación de ondas en estructuras de sección transversal arbitraria a través del uso de autosoluciones de elementos finitos (FE). Wilcox *et al.* (véase la Referencia 12), Mukdadi *et al.* (véase la Referencia 13) y Hayashi *et al.* (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 al.* se ha empleado aquí para analizar los modos de propagación en una tira de acero de  $1\text{ mm}$  de grosor y  $30\text{ mm}$  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  $\text{SH}^*$  de esta tira. A diferencia del caso de la placa infinita, el modo  $\text{SH}_0$  de propagación no existe en una tira finita. Esto se debe 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  $\text{SH}^*$  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  $\text{SH}^*$ . Dado que el modo  $\text{SH}^*$  se mueve asintóticamente a la velocidad de cizalla en la masa del 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 un período de tiempo más corto, 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  $\text{SH}^*$ , aunque también es posible el uso de modos similares de naturaleza compresional.

La Figura 8 muestra la sección transversal de una tira de  $15\text{ mm}$  de ancho y la forma de modo del modo  $\text{SH}^*$  a  $2\text{ MHz}$ . 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 esta manera, 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 apodizado que imita la forma de modo del modo, puede conseguirse una suscitación 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 banda ancha, la forma de modo del modo no debería cambiar significativamente sobre el ancho de banda de frecuencia del pulso de suscitación. 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, existen 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). Actualmente, para el modo SH\* existe 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 con un grosor el doble que el de otra, la placa tendrá lugar a la mitad de frecuencia. 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 suscitación y propagación exitosas 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 grosor y 30 mm de ancho y una tira de 1 mm de grosor y 15 mm de ancho. La frecuencia de corte del modo en la tira de 15 mm de ancho tiene lugar al doble de 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 vuelven insignificantes a frecuencias más altas.

Las frecuencias útiles para la inspección varían entre 1 MHz-5 MHz. Sin embargo, se emplea comúnmente una suscitación con pulsos de banda más ancha en supervisión de defectos y grosor. Esto requiere un ancho de banda con la mitad de la frecuencia central por debajo y con 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 insignificantes (~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 está 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 es aproximadamente constante ( $\pm 5\%$ ). Por lo tanto, para una propagación con éxito de la onda (en la forma del modo SH\*) a lo largo de la tira, la frecuencia-ancho debe ser mayor que 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 extenso 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 alta 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, también es importante. El problema de las fuerzas de punto y línea normales sobre un semi-espacio elástico es bien conocido como el problema de Lamb, y fue resuelto por primera vez 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 que cargasen la superficie de manera normal, tangencial y en torsión. Achenbach (véase 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 suscitada en semi-espacio se irradia cilíndricamente desde la fuente al interior de la estructura. La suscitación 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 la supervisión de defectos o para la calibración del grosor, dado que produce unas señales menos complicadas al eliminar las 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 demanda 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, pues reduce la extensión esférica a extensión cilíndrica de la onda desde la fuente. Asimismo, 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 la soldadura, la soldadura fuerte o la soldadura blanda, así como la sujeción por contacto en seco bajo una gran fuerza normal. Una fijación por soldadura o soldadura blanda frecuentemente altera 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 de manera blanda 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 ruido debido a las reverberaciones en la junta. Esto puede enmascarar señales más débiles de las características de la estructura. Inicialmente se pensó que la soldadura, la soldadura fuerte, la soldadura blanda 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). Los inconvenientes con los métodos de unión permanentes son la contaminación de la señal con mucho 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 y 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 cambia para una guía de ondas sujeta o libre. Esto se debe 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 menos 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 con forma de placa y una tubería. En el caso de una estructura con forma de placa, habrá de fijarse sobre la estructura una característica que permita a la guía de ondas sujeta ser apretada 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. Existen otras muchas 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 Acous 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.
- 5 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
- 10 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 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. A*203, 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
- 20 18. Achenbach J. D., "Wave propagation in elastic solids", *North-Holland Publishing Company*, págs. 283-289, 1975.

**REIVINDICACIONES**

1. Aparato para el ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto bajo ensayo, comprendiendo dicho aparato:
  - 5 una tira alargada de material transmisor de ultrasonidos, teniendo dicha tira alargada un extremo proximal para acoplarse a dicho objeto bajo ensayo y un extremo distal; y un transductor ultrasónico acoplado a dicha tira alargada; en el que dicha tira alargada tiene una sección transversal con un ancho y un grosor que proporcionan una relación de aspecto mayor que la unidad y que coincide con dicho transductor ultrasónico de modo que la suscitación de
    - 10 dicho transductor ultrasónico induce señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas que se propagan a lo largo de dicha tira alargada hasta dicho extremo proximal y que entran en dicho objeto bajo ensayo, y 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 dicho ancho.
- 15 2. Aparato para el ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto bajo ensayo, comprendiendo dicho aparato:
  - una tira alargada de material transmisor de ultrasonidos, teniendo dicha tira alargada un extremo proximal para acoplarse a dicho objeto bajo ensayo y un extremo distal; y un transductor ultrasónico acoplado a dicha tira alargada; en el que
    - 20 dicha tira alargada tiene una sección transversal con un ancho y un grosor que proporcionan una relación de aspecto mayor que la unidad y que coincide con dicho transductor ultrasónico de modo que la suscitación de dicho transductor ultrasónico induce señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas que se propagan a lo largo de dicha tira alargada hasta dicho extremo proximal y que entran en dicho objeto bajo ensayo, y dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones en modo de compresión del
      - 25 orden más bajo con una polarización paralela a la dirección de propagación.
3. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho transductor ultrasónico suscita sustancialmente solo un único modo de propagación de onda guiada.
- 30 4. Aparato según la reivindicación 3, en el que dicho transductor ultrasónico está apodizado para suscitar sustancialmente solo dicho único modo de propagación de onda guiada para inducir dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas.
- 35 5. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas se extienden sustancial y cilíndricamente desde dicho extremo proximal hasta dicho objeto bajo ensayo.
- 40 6. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho transductor ultrasónico está acoplado a dicho extremo distal.
- 45 7. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho transductor ultrasónico comprende un transductor acoplado a al menos un lado longitudinal de dicha tira alargada.
8. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que dicho transductor ultrasónico comprende una bobina operativa para proporcionar transducción de ultrasonidos electromagnética.
- 50 9. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha tira alargada está doblada alrededor de un eje que es sustancialmente paralelo a dicho ancho de dicha tira alargada y sustancialmente perpendicular a la dirección de propagación.
- 55 10. Aparato según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha tira alargada está doblada alrededor de un eje sustancialmente paralelo a la dirección de propagación.
11. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un receptor de ultrasonidos operable para recibir el ultrasonido reflejado desde dicho objeto bajo ensayo que se produce a partir de dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas que entran en dicho objeto bajo ensayo.
- 60 12. Aparato según la reivindicación 11, en el que dicho receptor de ultrasonidos comprende una o más tiras alargadas adicionales, acoplada cada una a dicho objeto bajo ensayo en una respectiva posición para recibir dicho ultrasonido reflejado y que tiene un transductor ultrasónico de recepción para detectar dicho ultrasonido reflejado.
13. Aparato según la reivindicación 11, en el que dicha tira alargada y dicho transductor ultrasónico también forman dicho receptor de ultrasonidos.

14. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones 11 a 13, en el que dicho ultrasonido reflejado comprende al menos una señal reflejada y dicho receptor de ultrasonidos mide una diferencia temporal entre dichas señales reflejadas.

5 15. Aparato según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho extremo proximal está acoplado a una superficie de dicho objeto bajo ensayo, de modo que dicha dirección de propagación no es normal con respecto a dicha superficie, de modo que dichas señales ultrasónicas entran en dicho objeto bajo ensayo a un ángulo que no es normal.

10 16. Un método de ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto bajo ensayo, comprendiendo dicho método:

acoplar un extremo proximal de una tira alargada de material transmisor de ultrasonidos a un objeto bajo ensayo, en el que un transductor ultrasónico está acoplado a la tira alargada;

15 suscitar señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas dentro de dicha tira alargada para que se propaguen a lo largo de dicha tira alargada y para que entren en dicho objeto bajo ensayo, teniendo dicha tira alargada una sección transversal con un ancho y un grosor que proporcionan una relación de aspecto mayor que la unidad y coincide con dicho transductor ultrasónico; en el que  
20 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 paralelas a un ancho de dicha tira alargada.

17. Método de ensayo no destructivo por ultrasonidos de un objeto bajo ensayo, comprendiendo dicho método:

25 acoplar un extremo proximal de una tira alargada de material transmisor de ultrasonidos a un objeto bajo ensayo, en el que un transductor ultrasónico está acoplado a la tira alargada;

suscitar señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas dentro de dicha tira alargada para que se propaguen a lo largo de dicha tira alargada y para que entren en dicho objeto bajo ensayo, teniendo dicha tira alargada una sección transversal con un ancho y un grosor que proporcionan una relación de aspecto mayor que la unidad y coincide con dicho transductor ultrasónico; en el que  
30 dichas señales ultrasónicas sustancialmente no dispersivas comprenden vibraciones en modo de compresión con una polarización paralela a la dirección de propagación.

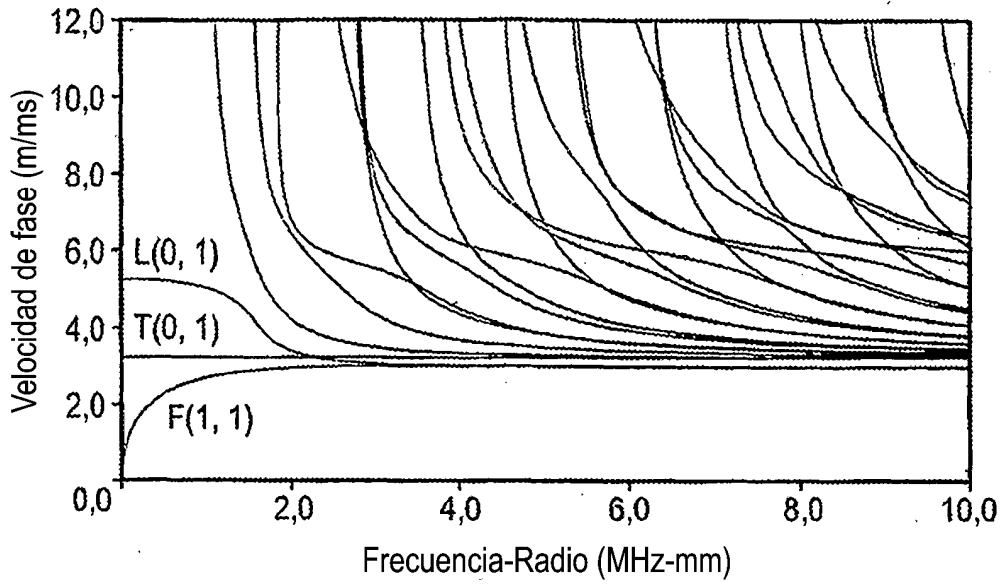


Fig. 1

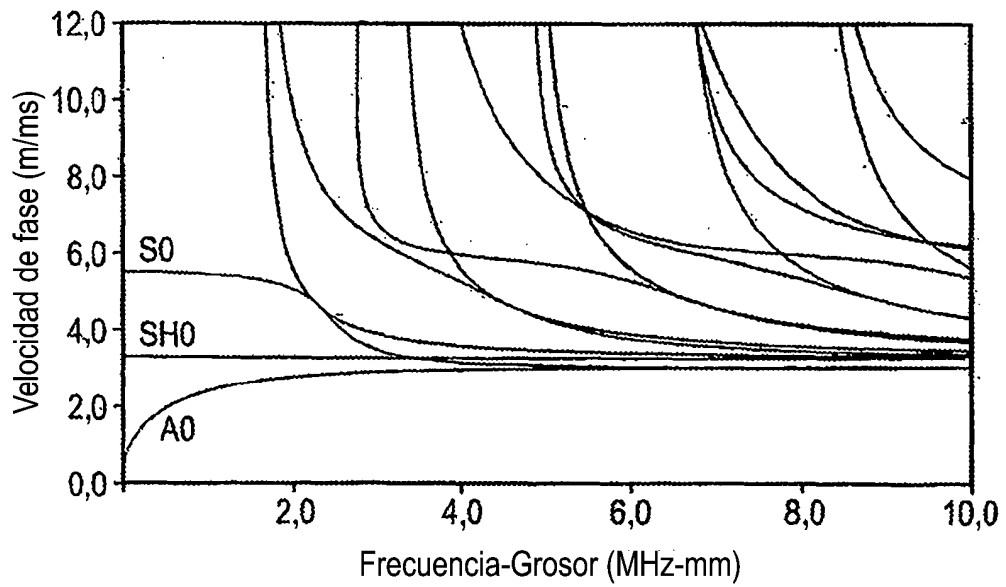


Fig. 2

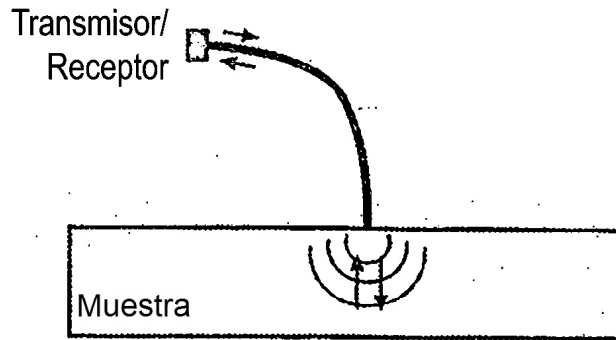


Fig. 3

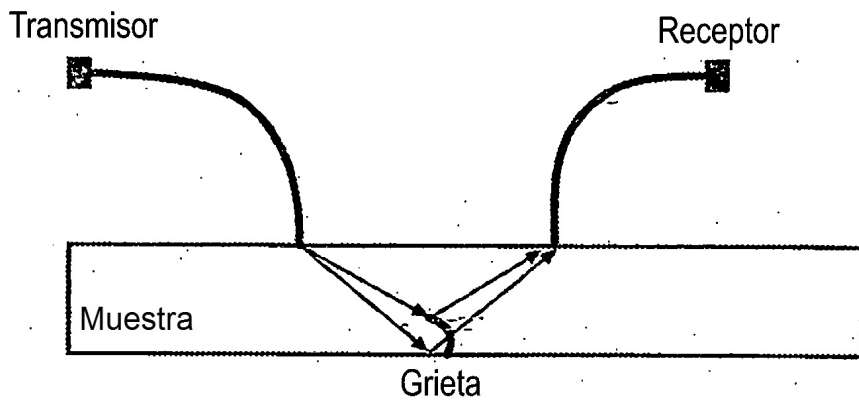


Fig. 4

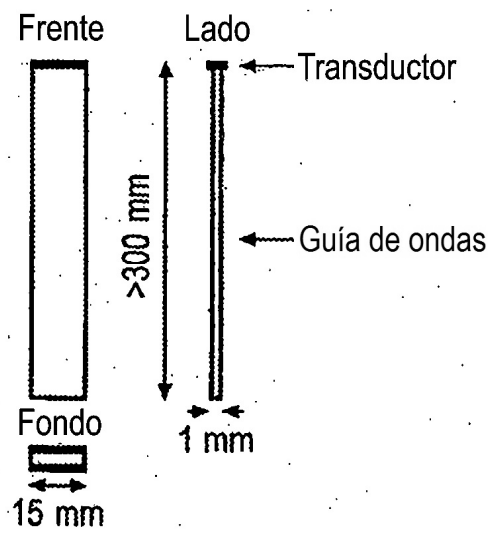


Fig. 5

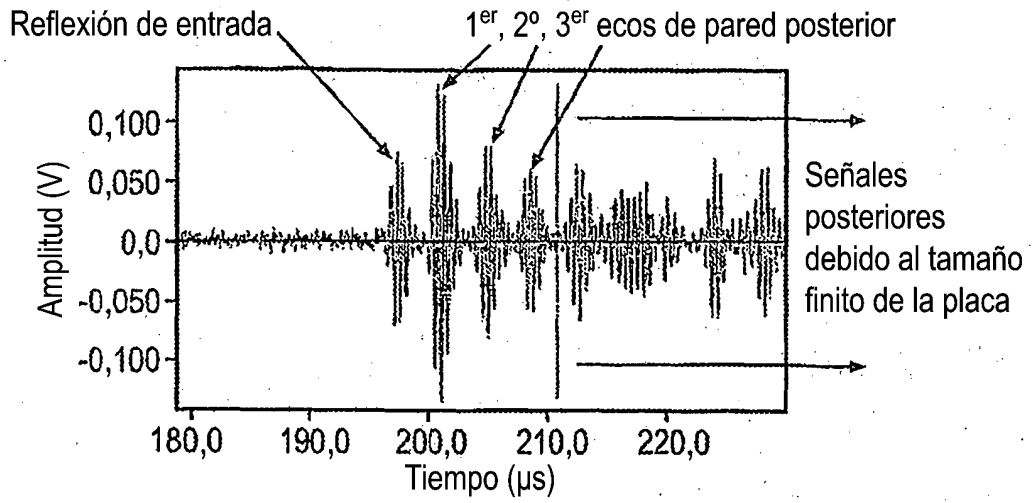


Fig. 6

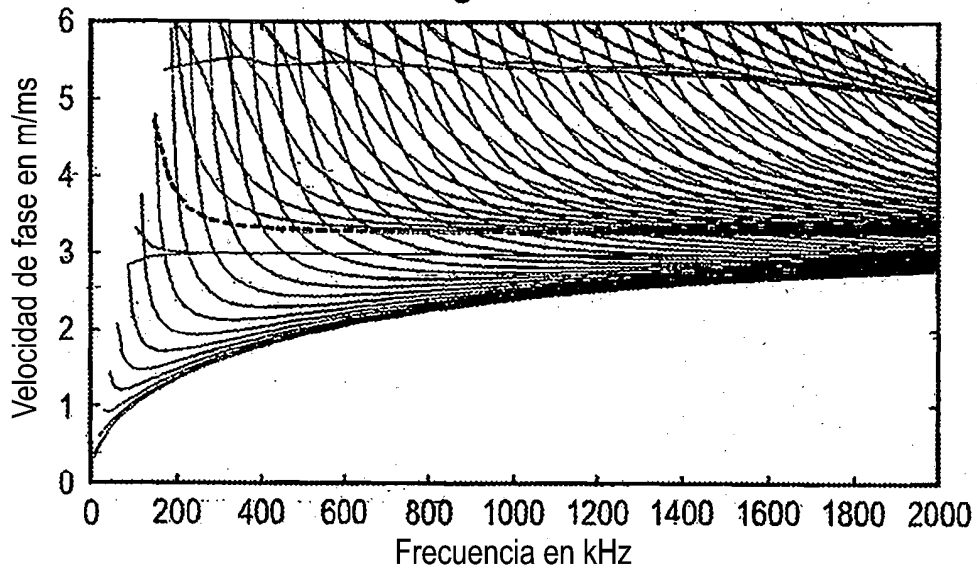


Fig. 7

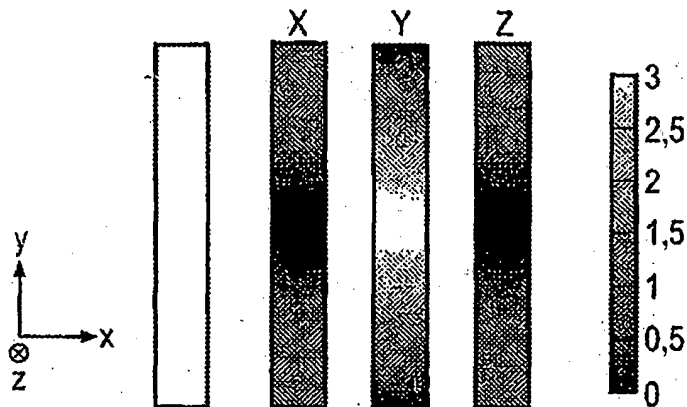


Fig. 8

Forma del modo del desplazamiento Y a diferentes frecuencias

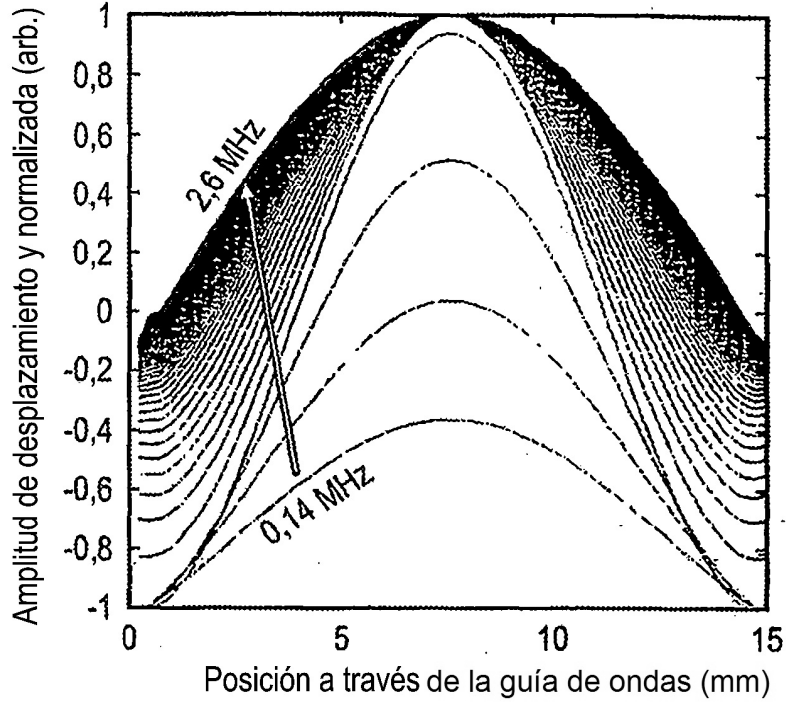


Fig. 9

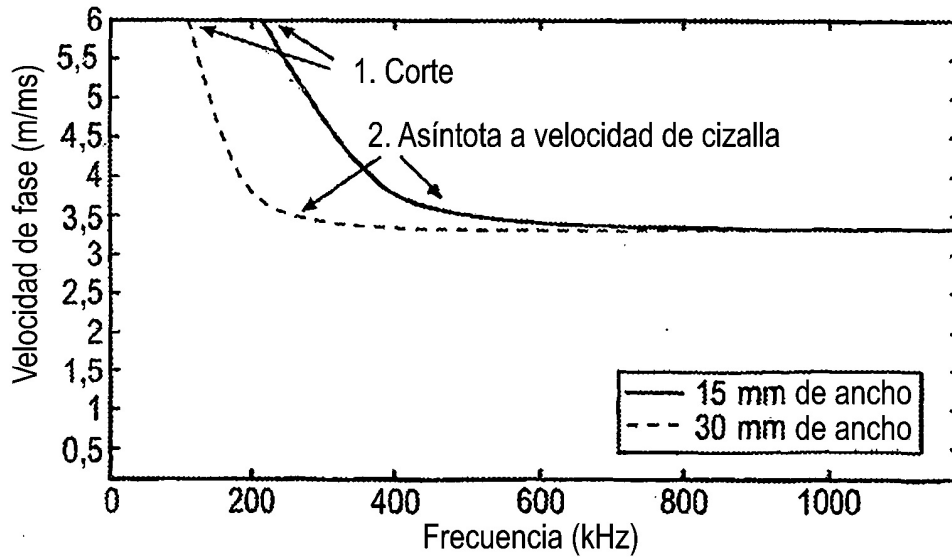


Fig. 10



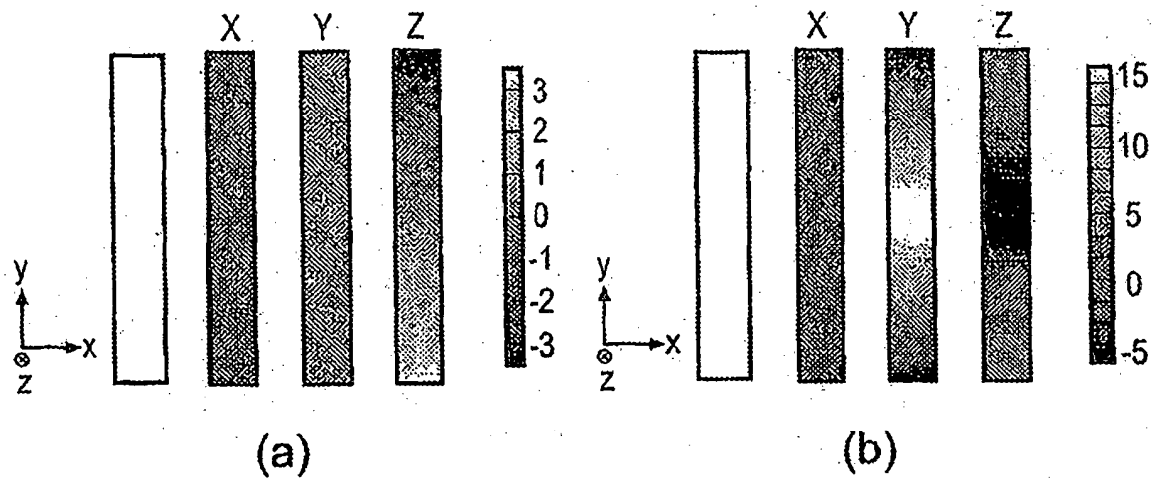


Fig. 11

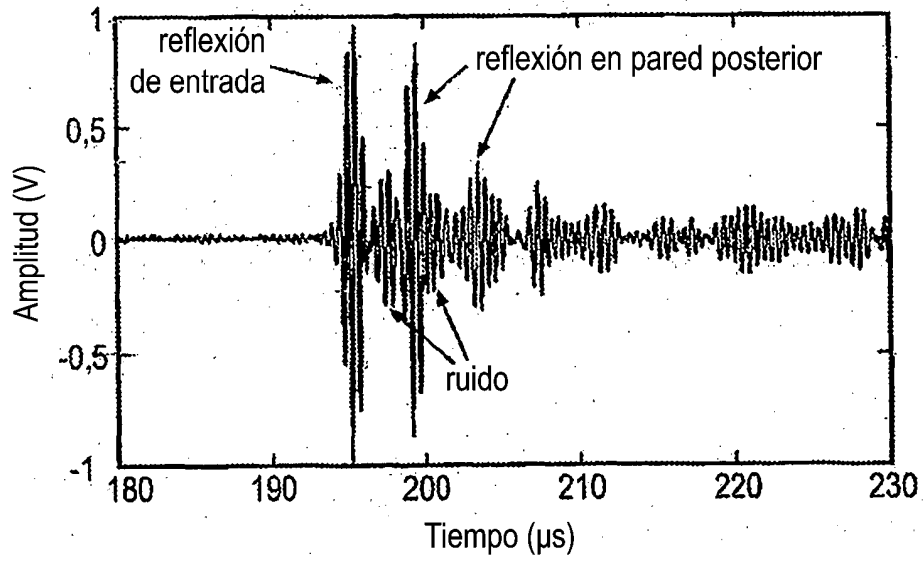


Fig. 12

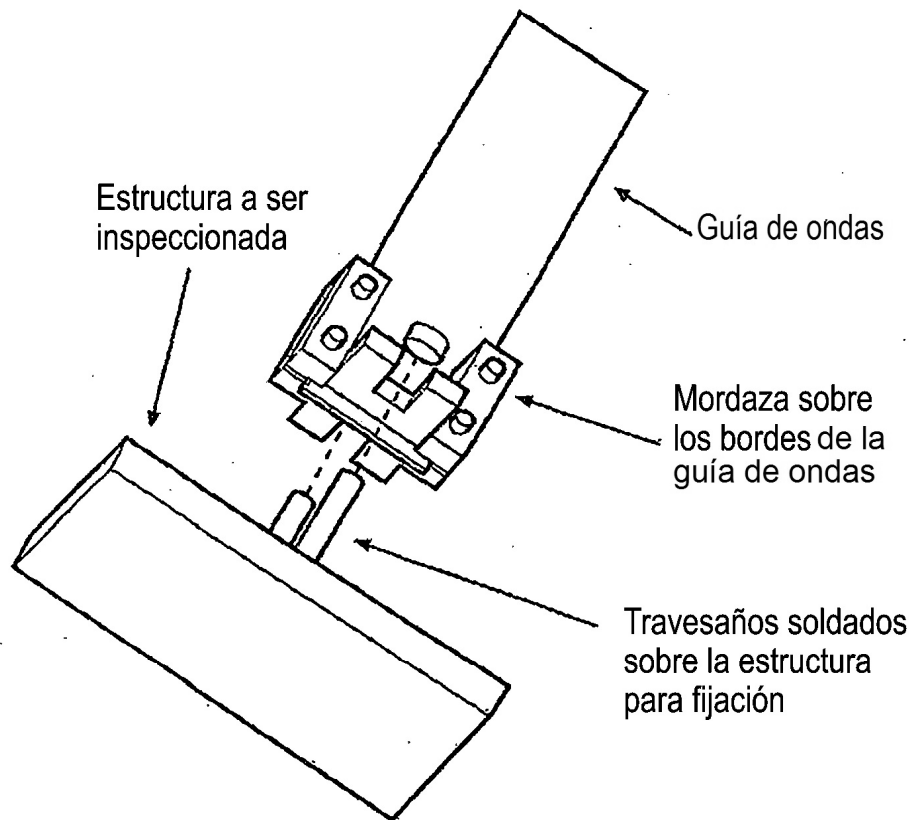


Fig. 13

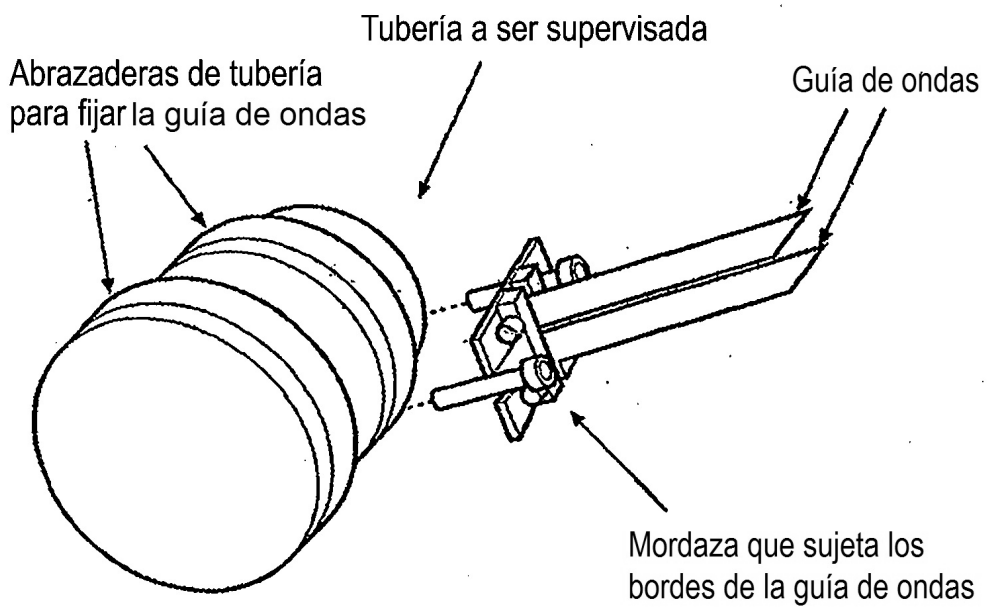


Fig. 14