

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 799 885**

51 Int. Cl.:

**G01V 1/48**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **27.05.2011 PCT/EP2011/058743**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.12.2011 WO11147970**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **27.05.2011 E 11721784 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020 EP 2577359**

54 Título: **Procedimiento y sistema para determinar la rigidez de una capa geológica**

30 Prioridad:

**28.05.2010 EP 10425184**

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

**22.12.2020**

73 Titular/es:

**THUR S.R.L. (100.0%)  
Piazza Cittadella 13  
37122 Verona, IT**

72 Inventor/es:

**MULARGIA, FRANCESCO;  
CASTELLARO, SILVIA;  
PASTOR, MARIAPIA y  
VINCO, GIANLUCA**

74 Agente/Representante:

**ISERN JARA, Jorge**

**ES 2 799 885 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y sistema para determinar la rigidez de una capa geológica

5 La presente invención se refiere a un procedimiento y a un sistema para determinar la rigidez de una capa geológica subyacente a otra capa geológica, que es preferiblemente una capa superficial delimitada en la parte superior por una superficie libre. En particular, la invención se refiere a un procedimiento y sistema para determinar la rigidez de una capa de superficie geológica subyacente más rígida.

10 La medición de las propiedades elásticas, y en particular la rigidez,  $\mu$ , de las capas geológicas sobre las que se encuentran los cimientos de construcción y, generalmente, las estructuras de construcción o en las que están sumergidas, puede tener diversas aplicaciones, entre las cuales la evaluación de la estabilidad del subsuelo y, por lo tanto, el riesgo de colapso o deformación permanente de una estructura de construcción a largo plazo y/o en el caso de un evento sísmico.

15 La clasificación de los subsuelos de los cimientos de acuerdo con los estándares NEHRP (Estados Unidos), Eurocódigo 8 (Europa) y NTC2008 (Italia) para diseñar estructuras resistentes a los sismos se basa principalmente en la velocidad de las ondas de cizallamiento de una capa homogénea equivalente a los primeros treinta metros de profundidad,  $V_{s30}$ . Las velocidades de las ondas de cizallamiento,  $V_s$ , en realidad está directamente relacionado con la rigidez del material que forma la capa geológica a través de la ecuación

$$\mu = \rho V_s^2, \quad (1)$$

donde  $\rho$  es la densidad de la capa.

25 Una aplicación de la medición de la velocidad de las ondas elásticas en el subsuelo es la evaluación de la eficiencia de las intervenciones para consolidar el subsuelo debajo de los cimientos existentes, con el objetivo de mejorar los parámetros elásticos, como el módulo de Young y el módulo de rigidez.

30 Las técnicas indirectas, basadas en mediciones de superficie, es decir, sin insertar elementos detectores en el subsuelo ni extraer muestras del subsuelo y medir sus propiedades en un laboratorio, a menudo se utilizan para medir la velocidad de las ondas elásticas. Típicamente, las técnicas indirectas son de tipo sísmico, es decir, se basan en el análisis de las ondas sísmicas producidas por una fuente artificial.

35 Los enfoques convencionales para medir la velocidad de las ondas de cizallamiento sísmicas requieren un número relativamente alto de sensores, con el consiguiente aumento de los costos y los espacios necesarios para el despliegue, así como dificultades prácticas para su uso en entornos urbanos.

40 Además, el uso del procedimiento convencional de prospección sísmica y, es decir, generar, mediante un aparato adecuado, ondas internas longitudinales P y transversales S y registrar su refracción por las capas geológicas, con la consiguiente identificación y medición de las propiedades elásticas de estas últimas, es ineficiente. De hecho, la ley física que rige la refracción en una interfaz entre dos capas es la ley de Snell

$$\text{sen } i / \text{sen } r = V_1 / V_2, \quad (2)$$

45 de acuerdo con el cual la relación entre el seno del ángulo de incidencia  $i$  y el seno del ángulo de refracción  $r$  es igual a la relación entre la velocidad en la primera y en la segunda capa. Si la fuente y los elementos detectores se colocan en la superficie y la velocidad de la capa subyacente es mayor, es decir  $V_1 < V_2$ , al alcanzar el ángulo crítico de incidencia de acuerdo con el cual  $\text{sen } r = 90^\circ$ , la onda refractada viaja paralela a la interfaz entre las dos capas y puede volver a refractarse en la capa superficial, lo que permite medir las velocidades y los grosores de ambas capas. Sin embargo, como suele ocurrir en el caso de las capas de subbase, si  $V_1 > V_2$ , la onda interna no se refracta paralelamente a la interfaz y no se debe refractar nuevamente en la capa superficial. Por lo tanto, es imposible medir, detectando las ondas internas refractadas, la velocidad y el grosor de la capa subyacente, que permanece invisible y se conoce como una "capa fantasma".

55 Recientemente se han desarrollado procedimientos para explorar el subsuelo basados en el estudio de la dispersión de ondas superficiales elásticas. Estos permiten usar un número menor de sensores mientras se mantiene la misma precisión. En general, la profundidad de exploración de las ondas superficiales es directamente proporcional a la longitud de onda: véase, por ejemplo, CB Park y otros en "Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)" publicado en Geophysics, vol. 64, págs. 800-808. 1999, quienes divulgan una técnica multicanal de análisis de ondas superficiales para determinar el perfil de velocidad de las ondas de cizallamiento. US 2004/226380 se refiere a un dispositivo y un procedimiento para medir la rigidez de las capas de base y subrasante de suelo por medio de un par de penetrómetros de cono separados paralelos. Los penetrómetros se presionan en el suelo, uno de ellos está provisto de transmisores piezoeléctricos, desde los cuales las ondas de cizallamiento y primarias son activadas por medios generadores de ondas. Las ondas se propagan a través del suelo hacia un par de receptores ubicados a la misma profundidad de los transmisores. Los dos ejes de los penetrómetros se colocan uno cerca del otro,

específicamente, a una distancia fija de unos 20 cm. El documento WO 2004/019063 se refiere a un procedimiento para estimar los límites de la capa de meteorización cerca de la superficie y de la capa de meteorización secundaria y las velocidades sísmicas en el mismo mediante el uso de ondas sísmicas que emanan de una broca de perforación de trabajo en un hoyo en una técnica conocida como "sísmica durante la perforación" o SWD. El documento US 6 094 401 divulga un sistema de perfil sísmico vertical inverso (VSP) que utiliza una herramienta MWD (medición durante la perforación) como fuente sísmica de fondo de hoyo capaz de generar un barrido de frecuencias. Se utiliza un modulador controlable por frecuencia para proporcionar una gran fuerza a la broca de perforación que está en contacto con la formación al generar ondas de compresión axial (P-). Dado que la broca puede estar en contacto con las paredes laterales del hoyo, se dice que la fuerza generada por el modulador también puede proporcionar ondas de cizallamiento transversales medibles (S-). El documento WO 2008/154640 divulga un procedimiento para obtener datos sísmicos mejorados y reflectividades invertidas optimizadas mediante el uso de datos de control de hoyos para mejorar la calidad del procesamiento sísmico y la inversión de amplitud.

En el caso de las técnicas de análisis de ondas superficiales, la fuente es un aparato que genera ondas P y ondas S. La interacción entre estos dos tipos de ondas en proximidad a una superficie da lugar, a una distancia dada de la fuente, a ondas superficiales. La energización se activa típicamente por medio de un martillo que golpea, una o varias veces, placas de metal acopladas a la superficie del suelo a explorar. De esta manera, se generan frentes de onda que se propagan a través del suelo subyacente.

Generalmente, la capa superficial que comprende los cimientos de una estructura de construcción, indicada en lo sucesivo también como capa de cimentación, típicamente tiene una rigidez mayor que la rigidez de la capa subyacente, que puede ser de un tipo diferente (por ejemplo, suelo arcilloso, suelo arenoso, etc.).

El solicitante observó que, al investigar las propiedades elásticas de una capa geológica debajo de los cimientos, si la fuente se encuentra en la superficie del suelo a explorar, la energía desarrollada por la fuente permanece atrapada principalmente en la capa superficial que sirve como guía de ondas para las ondas elásticas, debido a la diferencia relativamente alta en la impedancia sísmica entre las dos capas. En realidad, a través de la interfaz entre la capa superficial y la capa subyacente, solo se transmite una fracción  $k$  de la energía incidente, mientras que se refleja la energía restante  $(1-k)$ . Calcular el valor de la energía atrapada en la capa y transmitida en términos de ondas superficiales es generalmente complejo y depende de la geometría específica del problema. En primera aproximación, si la diferencia entre la rigidez, es decir, los productos de densidad por velocidad al cuadrado, de acuerdo con la relación (1), de las dos capas es grande, solo se transmite una pequeña cantidad de energía a la capa subyacente y está disponible para explorar eso. Las ondas transmitidas en la capa subyacente se retransmiten a la superficie, pero su energía se reduce en la interfaz entre las dos capas por un factor adicional del orden de  $k$ . En conclusión, al generar en la superficie las ondas para explorar la capa subyacente y registrarlas en la superficie, la energía de las ondas que regresan a la superficie después de explorar la capa subyacente se reduce, en primera aproximación, en un factor  $k^2$ . Por ejemplo, un valor típico de  $k$  es 0,2, por lo tanto, las ondas que han explorado la capa subyacente regresan a la superficie con energía del orden de 0,04 y su identificación entre las ondas que están atrapadas para la reflexión en la primera capa (cuya energía es mucho más alta, del orden de 0,8) es prácticamente imposible. Por lo tanto, la identificación de las ondas superficiales asociadas a la capa inferior en las huellas sísmicas detectadas y su medición son extremadamente difíciles.

En el análisis de las ondas superficiales, la interacción entre las ondas internas P y S da lugar a las ondas superficiales. Para analizar esas ondas, por lo tanto, tanto las ondas P como las S deben generarse simultáneamente.

El solicitante se ha dado cuenta de que si la fuente activa del generador de ondas primarias se coloca en la capa subyacente cuya rigidez se pretende medir, la energía generada en la capa subyacente está disponible principalmente para caracterizar la capa en sí misma y se transmite a la capa suprayacente únicamente después de haber "explorado" el subyacente.

En particular, en caso de energización en la capa subyacente y en presencia de una interfaz entre dos capas con diferentes propiedades elásticas entre sí (por ejemplo, entre dos capas geológicas con diferente rigidez, como la capa de base y la capa subyacente), la mayor parte de la energía está "atrapada" en la capa subyacente y está representada por ondas de interfaz. Estas ondas, llamadas ondas Stoneley, son completamente similares a las ondas superficiales de Rayleigh y se propagan debajo de la interfaz con la capa suprayacente con un movimiento de oscilación simultáneamente vertical y horizontal. Debido a la continuidad de los desplazamientos a través de la interfaz, las ondas Stoneley se extienden también hacia la capa superior, excitando, por continuidad, los movimientos horizontales y verticales, pero atenuando exponencialmente al alejarse de la interfaz misma. Más específicamente, las ondas cuya frecuencia coincide con uno de los modos de vibración de las ondas de Rayleigh y de las ondas de Love en la capa suprayacente serán las menos atenuadas entre las ondas transmitidas. Este último aparecerá en la superficie con más energía. En cualquier caso, dado que solo una fracción de energía se transmite a la interfaz, para ser detectada en la superficie, debe generarse con suficiente energía para ser registrada. En particular, las ondas detectadas son aquellas que regresan a la superficie después de haber explorado la capa inferior y haber cruzado la interfaz entre la capa inferior y la superior.

El solicitante ha entendido que al colocar la fuente de ondas sísmicas en la capa cuya rigidez se pretende medir, es posible detectar en la superficie las ondas Stoneley, que ocurren en la superficie como los modos de ondas superficiales Rayleigh y Love. En particular, las ondas Stoneley aparecen en la superficie como modos superiores de ondas superficiales de Rayleigh y Love.

5 En un aspecto, la presente invención se refiere a un procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1 para determinar la rigidez de una capa geológica en términos de velocidad de propagación de las ondas elásticas dentro de un sistema geológico delimitado por una superficie libre y que comprende al menos una primera capa geológica que tiene una primera rigidez y una segunda capa geológica que tiene una segunda rigidez y está dispuesta debajo de la primera capa geológica, estando dichas primera y segunda capa separadas entre sí por una interfaz, el procedimiento comprende las etapas de:

- 10 – posicionar una fuente capaz de generar ondas sísmicas dentro de la segunda capa geológica, cuya rigidez se pretende medir, a una profundidad entre 0,1 m y 2 m desde la interfaz;
- activar dicha fuente de ondas sísmicas;
- 15 – detectar al menos una señal sísmica por medio de al menos un sensor dispuesto junto con la superficie libre, y
- determinar a partir de al menos una señal sísmica una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa y, por lo tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa.

Preferiblemente, en el procedimiento, la etapa de determinar una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa comprende las siguientes etapas:

- 20 – determinar a partir de al menos una señal sísmica la velocidad de propagación de las ondas superficiales causadas por las ondas sísmicas generadas por dicha fuente;
- determinar un mapa de dichas velocidades de propagación de las ondas superficiales en función de la frecuencia de las mismas;
- 25 – identificar, en el mapa de velocidades, una velocidad de propagación cuya frecuencia se correlaciona con una profundidad en el sistema geológico, y
- correlacionar al menos una velocidad de propagación identificada en el mapa de velocidades con una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa y, por lo tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa.

30 El procedimiento comprende la etapa de calcular la rigidez a partir de la velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa.

El valor de rigidez de la primera capa es mayor que el valor de rigidez de la segunda capa.

35 La primera capa geológica está delimitada por la superficie libre y comprende los cimientos de una estructura de construcción.

Preferiblemente, la primera capa tiene un grosor y la fuente se coloca a una profundidad con respecto a la superficie libre mayor que el grosor de la primera capa.

40 Preferiblemente, la fuente de señal sísmica es una fuente impulsiva adecuada para generar ondas internas.

En el procedimiento de acuerdo con la invención, la etapa de detectar al menos una señal sísmica comprende detectar una pluralidad de señales sísmicas y se obtiene por medio de una matriz de sensores que comprende una pluralidad de sensores dispuestos junto con la superficie libre, siendo cada sensor capaz de detectar una señal sísmica de la pluralidad de señales sísmicas. Preferiblemente, las ondas superficiales cuya velocidad de propagación se detecta se detectan a través de una técnica multicanal.

50 Preferiblemente, la etapa de detectar al menos una señal sísmica comprende detectar una señal en función del tiempo durante un período de adquisición y la etapa de determinar un mapa de la velocidad de propagación de las ondas superficiales comprende realizar una transformación de la señal sísmica del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

55 En otro aspecto, la presente invención se refiere a un sistema de acuerdo con la reivindicación 9 para determinar la rigidez de una capa geológica en términos de velocidad de propagación de las ondas elásticas dentro de un sistema geológico delimitado por una superficie libre y que comprende al menos una primera capa geológica que tiene una primera rigidez y una segunda capa geológica que tiene una segunda rigidez y está dispuesta debajo de la primera capa geológica, estando dichas capas separadas entre sí por una interfaz, el sistema comprende una fuente adecuada para generar ondas sísmicas;

60 al menos un sensor de señal sísmica dispuesto junto con la superficie libre, y una unidad electrónica para adquirir señales sísmicas detectadas por el al menos un sensor, en el que dicha fuente se coloca en la segunda capa geológica.

65 Preferiblemente, el al menos un sensor de señal sísmica es una matriz de sensores de señal sísmica que comprende una pluralidad de sensores, la pluralidad que incluye un primer y un último sensor, dispuestos de manera

acoplada con la superficie libre en una separación predeterminada entre sí. Preferiblemente, los sensores se alinean a lo largo de una dirección de alineación y la fuente se coloca a una distancia predeterminada del primer sensor de la matriz lineal de sensores, definida a lo largo de la dirección de alineación.

5 La fuente se coloca en la segunda capa a una profundidad comprendida entre 0,1 m y 2,0 m desde la interfaz con la primera capa.

Preferiblemente, la fuente de ondas sísmicas es energizada por una fuente sísmica tipo pistola de profundidad.

10 La presente invención se divulgará más adelante en más detalle con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran algunas, pero no todas las realizaciones. Los dibujos que ilustran las realizaciones son representaciones esquemáticas.

15 – la Figura 1 representa una vista plana que ilustra una disposición de ejemplo de una serie de sensores capaces de medir las propiedades elásticas del subsuelo debajo y/o cerca de un edificio, de acuerdo con una realización de la invención.

– la Figura 2 representa una primera sección transversal de la Figura 1 a lo largo de la línea AA.

– la Figura 3 representa una segunda sección transversal de la Figura 1 a lo largo de la línea BB. Con el objetivo de mejorar la claridad, la representación del edificio 1 se omite en la Figura.

20 – la Figura 4 muestra esquemáticamente la estructura de una fuente sísmica tipo pistola que puede usarse para la implementación del procedimiento de acuerdo con la presente invención.

– la Figura 5 es un ejemplo de una imagen de la velocidad de fase de las ondas superficiales (Love) en función de la frecuencia en una situación previa a la intervención de consolidar la capa subyacente a los cimientos.

25 – la Figura 6 es un ejemplo de una imagen de la velocidad de fase de las ondas superficiales (Love) en función de la frecuencia en una situación posterior a la intervención de consolidación de la capa subyacente a los cimientos.

30 Con referencia a las Figuras 1 a 3, en una realización preferida, la presente invención se refiere a un procedimiento y a un sistema para medir la rigidez de una capa geológica colocada debajo de los cimientos de edificios y estructuras de construcción en general, que constituyen o están incluidos en una capa superficial delimitada en la parte superior por la superficie libre del suelo e indicada como capa de base. La caracterización de las capas geológicas de acuerdo con el procedimiento y el sistema de acuerdo con la presente realización preferida puede realizarse tanto antes de una intervención de consolidación del terreno como después de la intervención con el objetivo de evaluar la efectividad de la intervención misma.

35 En la primera aproximación, es posible divulgar el subsuelo como un medio estratificado en el que la variación principal de la composición y de las propiedades mecánicas se produce a lo largo de la profundidad, mientras que la variación en las dos direcciones horizontales es insignificante. En este contexto y de acuerdo con una convención no limitativa de la presente invención, las capas se definen a partir de la superficie: la primera capa será la superficie, la segunda será la subyacente y así sucesivamente.

40 El procedimiento de acuerdo con un aspecto particular de la presente invención es capaz de medir la velocidad de las ondas elásticas en un sistema geológico que comprende al menos una primera capa del subsuelo 6 y una segunda capa geológica 5 subyacente con respecto a la misma. La primera capa es aquella cuya superficie superior es la superficie libre 2. La interfaz entre la capa superior (primera) 6 y la capa inferior (segunda) 5 se indica con el número de referencia 3.

45 En la realización ilustrada en las Figuras 1-3, la primera capa geológica 6 es una capa de base que comprende los cimientos de una estructura de construcción, por ejemplo, un edificio residencial 1.

50 El sistema para medir las ondas elásticas que se propagan en el sistema geológico comprende una fuente 4 (mostrada en la Figura 3) capaz de generar ondas internas elásticas y una matriz de sensores 8 que comprende una pluralidad de sensores 8a, 8b, ..., 8j, cada uno de los cuales es capaz de detectar ondas superficiales elásticas que se propagan a lo largo de la superficie libre 2 del suelo. Preferiblemente, la matriz de sensores es una matriz lineal en la que los sensores están dispuestos en línea en una separación dada entre un sensor y el siguiente sensor adyacente (Figura 3). En el ejemplo ilustrado en las Figuras 1-3, la matriz de sensores está constituido por diez  
55 sensores con separación constante  $\Delta x$ .

60 Sin embargo, el número de sensores comprendidos en la matriz ilustrada no se considerará limitativo de la presente invención, seleccionándose dicho número en dependencia de las aplicaciones, por ejemplo, en función de la longitud del área a explorar, como se divulga adicionalmente en detalle a continuación. En este contexto, se pretende que una pluralidad de sensores comprenda al menos dos sensores, preferiblemente entre 4 y 12 sensores.

En una realización diferente, la separación entre los sensores puede ser de un valor diferente de un sensor a otro sensor o, en general, no ser constante.

De acuerdo con un aspecto principal de las realizaciones preferidas de la presente invención, el procedimiento es capaz de medir las ondas superficiales producidas por ondas primarias y secundarias generadas por una fuente ubicada dentro de una segunda capa geológica subyacente a una primera capa geológica, estando la fuente posicionada en una profundidad predeterminada mayor que el grosor de la primera capa, por ejemplo, la capa de base. En particular, el procedimiento es capaz de medir, en la superficie, las ondas superficiales producidas por las ondas de interfaz de Stoneley.

Con referencia a las Figuras 1-3 y llamado  $s$  el grosor de la primera capa 6 (Figura 2, a lo largo del eje  $z$ ), la fuente se encuentra a una profundidad  $t > s$ . En una realización preferida, la distancia  $d$  desde la interfaz 3 entre la primera y la segunda capa geológica, es decir,  $d = ts$ , está comprendida entre 0,5 m y 1,5 m.

Preferiblemente, la fuente es una fuente sísmica impulsiva y comprende al menos una carga explosiva con una velocidad inicial comprendida entre 300 y 700 m/s. En una realización preferida, la fuente comprende una carga explosiva con una velocidad inicial de 500 m/s y un tiempo de inserción  $< 1$  ms.

En algunas realizaciones, la fuente 4 se coloca a una profundidad  $t$ , mayor que el grosor  $s$  de la capa de base, dentro de un agujero 9 (indicado en la Figura 3) que se extiende desde la superficie libre a través del sistema geológico. En la Figura 2, la posición de la fuente 4 a lo largo del eje  $z$  (profundidad) se indica con 7.

La fuente es capaz de generar ondas sísmicas de interfaz y de superficie.

En una realización preferida, la activación de la fuente se proporciona por medio de una fuente sísmica tipo pistola de profundidad, ilustrada esquemáticamente en la Figura 4 e indicada en su totalidad con el número de referencia 10. La fuente sísmica tipo pistola ha sido especialmente diseñada para operar a una profundidad mayor que las fuentes sísmicas tipo pistola normales. La fuente sísmica tipo pistola de profundidad comprende un barril 11, de longitud adecuada para alcanzar la profundidad  $t$ , el barril se inserta en el suelo, dentro de la capa geológica inferior (o llega a la capa inferior), en un agujero previamente realizado (por ejemplo, el agujero 9 en la Figura 3). Por ejemplo, la longitud del cañón 11 de la fuente sísmica tipo pistola es de al menos 2 metros de largo, por ejemplo, comprendida entre 2 y 3 metros, para poder colocar y detonar la carga explosiva, es decir, un cartucho, dentro de la capa subyacente. La pistola comprende una placa 12 para colocar sobre la superficie del suelo, una perilla de soporte 13 y una perilla de gatillo 14. El extremo 15 del barril 11 está acoplado a una cámara de explosión extraíble 16, con fondo abierto, en la que se inserta el cartucho del tipo industrial, per se conocido y disponible en el mercado. La explosión del cartucho puede ser realizada por la superficie libre, operando el botón del gatillo 14 que golpea mecánicamente un encendedor (no mostrado en la Figura), generando la explosión del cartucho, por medio de un dispositivo (no mostrado en la figura) que se extiende a lo largo del cañón 11.

Preferiblemente, los sensores de la matriz de sensores 8 son geófonos, es decir, transductores electromecánicos de ondas elásticas.

La señal de cada geófono  $8a, \dots, 8j$  se registra por separado, pero sincrónicamente en los diferentes geófonos. Una relación entre la longitud de onda y el grosor de la capa explorada es válida para las ondas superficiales y para las ondas de capa. Generalmente, los componentes con longitud de onda grande,  $\lambda$ , proporcionan información sobre las capas con mayores profundidades, mientras que los componentes con longitud de onda pequeña  $\lambda$  proporcionan información sobre las capas más cercanas a la superficie. La relación:

$$V = \lambda \cdot f \quad (3)$$

sostiene, donde  $V$  es la velocidad de las ondas y  $f$  la frecuencia de las mismas. Considerando la misma velocidad, los componentes con longitud de onda grande  $\lambda$  son los de baja frecuencia y aquellos con longitud de onda pequeña  $\lambda$  son los de alta frecuencia.

Preferiblemente, cada sensor  $8a, 8b, \dots, 8j$  es un geófono con una frecuencia comprendida entre 4 y 10 Hz. En una realización, los geófonos  $8a, \dots, 8j$  de la matriz 8 son geófonos de movimiento horizontal, adecuados para detectar la velocidad de las ondas superficiales con polarización horizontal transversal, es decir, ondas de amor. En una realización adicional, los geófonos son geófonos de movimiento vertical, adecuados para detectar la velocidad de las ondas de Rayleigh.

En la realización ilustrada en las figuras y con referencia particular a la Figura 3, el procedimiento de medición comprende la generación de un disparo "fuera" de la línea de sensores, es decir, la fuente está dispuesta a una distancia predeterminada  $D$ , definida a lo largo de la dirección de disposición de los sensores (eje  $x$ ), desde el sensor más cercano, es decir, el primer sensor  $8a$ , de la matriz. Preferiblemente, con el objetivo de reducir o minimizar los efectos del campo cercano,  $D$  no es menor que 5 m, con mayor preferencia está comprendido entre 6 y 20 m.

Preferiblemente, la matriz de sensores es lineal a lo largo de una dirección de alineación (eje  $x$ ) y la fuente está dispuesta en la extensión de la alineación de los sensores. Sin embargo, en algunas realizaciones de la presente

invención, la fuente no está dispuesta alineada con la matriz de sensores, sino que está ligeramente desplazada con respecto a la posición de alineación en el plano (y, z), indicada con el número de referencia 7 en la Figura 2.

5 En una realización adicional (no mostrada en las Figuras), la matriz de sensores se desarrolla de acuerdo con una geometría bidimensional, como por ejemplo de acuerdo con una disposición en forma de X, T o L. La separación mínima entre los sensores está en relación con la longitud de onda mínima detectable, por lo tanto, con la profundidad mínima detectable. Preferiblemente, la separación mínima está comprendida entre 0,5 y 2 m.

10 En una realización, los sensores de la matriz de sensores están igualmente espaciados entre sí, con una separación  $\Delta x$  entre 0,5 y 2 m.

15 La distancia entre el primer y el último sensor de la matriz, denominada longitud de detección e indicada con L, representa la longitud de la cobertura de detección del sistema y está en relación con la longitud de onda máxima, por lo tanto, con la profundidad máxima detectable.

20 La etapa de registrar las ondas superficiales se lleva a cabo de acuerdo con la técnica de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). De acuerdo con esta técnica, el registro de las ondas superficiales generadas por la fuente sísmica por la pluralidad de receptores ocurre simultáneamente. Los sensores típicamente se acoplan al suelo por medio de barras mientras se usan trípodes en pisos/cimientos. Con referencia a la Figura 3, los sensores 8a, 8b, ..., 8j, sincronizados en la adquisición, están conectados, a través de una línea de conexión 17, a una línea de adquisición de datos 18, preferiblemente un sismógrafo digital multicanal con un número de canales al menos igual a la cantidad de sensores, que pueden ser un sismógrafo comercial (por ejemplo, Rosina producido por Micromed spa). La unidad de adquisición de datos puede comprender o, a su vez, estar conectada con una unidad central de procesamiento 19, por ejemplo, una computadora personal (PC). La adquisición de trazas sísmicas ocurre a partir de la superación de un umbral preestablecido ("disparador", que coincide con el instante de energización del subsuelo) y dura unos segundos después de dicho evento. En una realización, la unidad de adquisición de datos guarda los datos con respecto a un breve período que precede a la superación del umbral ("preactivador"), dicho período que dura unos pocos segundos o unas pocas fracciones de segundo que precede al instante cuando se supera el umbral.

30 Durante el período de adquisición de datos por la unidad de adquisición de datos, cada sensor registra los rastros sísmicos en función del tiempo, obteniendo así una pluralidad de señales de amplitud/tiempo, siendo detectada cada señal por el sensor respectivo de la matriz de sensores.

35 Los espectros de velocidad de fase de las ondas superficiales y las curvas de dispersión experimentales respectivas se obtienen a través de una transformación del dominio de amplitud/tiempo al dominio de frecuencia/número de onda ( $f_k$ ) o al dominio de lentitud/frecuencia ( $pf$ ), o al dominio de velocidad/frecuencia ( $V_f$ ), de acuerdo con los procedimientos de procesamiento conocidos en la técnica de campo MASW. Dicha técnica es generalmente eficiente para aislar las ondas superficiales de las ondas internas (P y S), constituyendo la primera porción principal de la traza sísmica en presencia de una energización suficientemente lejana, por ejemplo, de una fuente ubicada suficientemente lejos de la matriz de sensores. Una curva de dispersión se calcula buscando los valores máximos de potencia espectral en el espacio  $f_k$  o  $pf$ , para formar una imagen 2D de la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh y/o Love en función de la frecuencia, que a su vez vinculado a la profundidad.

45 En particular y de acuerdo con una realización, después de registrar los rastros sísmicos, la etapa de determinar la velocidad de las ondas superficiales comprende los siguientes pasos:

- 1) se hipotetiza un valor de velocidad de prueba ( $V_i$ ),
- 2) las trazas a los diferentes geófonos, es decir, registradas por los diferentes geófonos, se traducen en el tiempo en una cantidad ( $\Delta t$ ), que se determina por la relación entre la distancia de cada geófono desde la fuente y la velocidad hipotética  $V_i$ ,
- 3) se suman las trazas así traducidas en el tiempo, para calcular la función de correlación de todas las trazas,
- 4) se lleva a cabo una transformación de la señal correlacionada en el dominio de la frecuencia. Los espectros máximos indicarán la frecuencia de las fases que han viajado a la velocidad  $V_i$ .

55 Llevar a cabo las etapas 1)-4) para diferentes velocidades de prueba produce una matriz de datos que se representa en un diagrama bidimensional de frecuencia  $V_i$ , generalmente representado en color, donde los colores son proporcionales a los espectros de potencia en la etapa 4). Cuanto mayor sea la densidad espectral de potencia para un par dado de velocidad y frecuencia, mayor será la energía de las ondas.

60 Los valores máximos en las gráficas espectrales indican la velocidad en las diferentes frecuencias de los diferentes modos de propagación de las ondas superficiales, es decir, modos fundamentales o de orden superior, excitados por las ondas Stoneley, que aparecen como ondas superficiales, ondas superficiales de Rayleigh y Love. En otras palabras, las ondas Stoneley aparecen en la superficie como ondas superficiales de tipo Rayleigh y Love.

65 En la práctica, lo que sucede es que las ondas Stoneley, que viajan en la interfaz entre la capa subyacente y la capa suprayacente, se acoplan con las ondas superficiales de la misma frecuencia, proporcionando energía a la misma.

Son estas ondas superficiales con "mayor energía" las que se registran en la superficie y proporcionan información sobre las ondas Stoneley y, por lo tanto, sobre la capa subyacente.

La variación de la velocidad en función de la frecuencia se llama dispersión.

En una realización, la etapa de determinar una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa comprende los siguientes pasos:

- determinar a partir de al menos una señal sísmica la velocidad de propagación de las ondas superficiales de Rayleigh y Love acopladas a las ondas de interfaz (Stoneley), siendo las ondas superficiales e interfaz causadas por las ondas sísmicas generadas por la fuente;
- determinar un mapa de dichas velocidades de propagación de la superficie y las ondas de interfaz en función de su frecuencia;
- identificar, en el mapa de velocidades, una velocidad de propagación cuya frecuencia se correlaciona con una profundidad en el sistema geológico, y
- correlacionar al menos una velocidad de propagación identificada en el mapa de velocidades con una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa y, por lo tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa.

En una realización, la al menos una señal sísmica comprende detectar una pluralidad de señales sísmicas y se obtiene por medio de una matriz de sensores que comprende una pluralidad de sensores dispuestos junto con la superficie libre, siendo cada sensor capaz de detectar una señal sísmica de la pluralidad de señales sísmicas y la etapa de detectar la pluralidad de señales sísmicas comprende colocar la matriz de sensores en la superficie libre y la etapa de determinar la velocidad de propagación comprende determinar, a partir de la pluralidad de señales sísmicas, la velocidad de propagación de las ondas superficiales de Rayleigh y Love acopladas a las ondas Stoneley de interfaz.

La Figura 5 es una imagen de ejemplo de dispersión experimental, en el dominio de frecuencia de velocidad de fase, obtenida del análisis de las trazas sísmicas medidas en un sistema geológico de dos capas, en el que la capa superior está constituida por los cimientos y tiene un grosor  $s$  de 1,3 m. Las condiciones del experimento a las que se refiere la Figura 5 fueron: una matriz de 10 geófonos de componentes horizontales con una frecuencia vibratoria de 4,5 Hz dispuestos a una distancia constante de 0,9 m entre sí; una fuente activa que comprende una fuente sísmica tipo pistola calibre 8 con cartucho industrial explosivo que desarrolla una presión de aproximadamente 1.700 bares y una velocidad de gas inicial de 500 m/s, en la que el cartucho explotó a una profundidad  $t$  de aproximadamente 2 m y una distancia  $D$  de 15 m desde el primer geófono de la matriz; el muestreo de las señales se realizó a una frecuencia de 1.024 Hz.

En la Figura 5, son visibles dos regiones distintas de alta energía (en la escala de grises, la mayor energía corresponde a una tonalidad más clara), que son sustancialmente atribuibles a dos modos dominantes de propagación de las ondas superficiales, ondas de Love en este caso: una primera la región de baja frecuencia se extendió de aproximadamente 20 a 30 Hz (donde ha y una alta densidad de puntos de energía máxima, representada por círculos blancos) y una segunda región de alta frecuencia que se extendió aproximadamente de 35 a 80 Hz. A partir de los puntos de energía máxima en cada región, se sigue la identificación de curvas de dispersión que indican a qué velocidad de fase se produce el transporte máximo de energía de las ondas de Love en función de la frecuencia y, por lo tanto, de la profundidad explorada. En particular, la primera región es atribuible a un primer modo de las ondas de Love con una velocidad de fase de aproximadamente 150 m/s y la segunda región es atribuible a un segundo modo de Love con una velocidad de fase de aproximadamente 300 m/s.

Después de la detección informada en la Figura 5, se llevó a cabo una intervención para consolidar la capa subyacente a la capa de base superficial. La intervención de consolidación puede ocurrir, por ejemplo, proporcionando una pluralidad de agujeros a través de la capa del suelo a consolidar (es decir, la capa inferior 5) y subsecuentemente inyectando una resina expandida para llenar los agujeros, de acuerdo con técnicas conocidas.

La Figura 6 es la imagen de dispersión obtenida al registrar los rastros sísmicos después de la intervención de consolidación. La Figura 6 muestra la creación de un "canal" en el que viajan las ondas que no están presentes en la Figura 5, a una frecuencia entre 30 y 45 Hz, es decir, un aumento de la rigidez en la capa en la que viajan las ondas en este rango de frecuencia. De hecho, se observa que las transferencias de energía máxima tanto de la primera como de la segunda región se mueven hacia frecuencias y velocidades más altas, con respecto a las regiones de transferencia máxima de energía de la Figura 5. Los puntos de potencia espectral máxima (círculos blancos) para la primera región se extienden ahora aproximadamente de 30 a 45 Hz con una velocidad de fase de aproximadamente 200 m/s, mientras que los puntos de potencia espectral máxima para la segunda región se extienden de aproximadamente 55 a 100 Hz, con una velocidad de fase de aproximadamente 300 m/s. A partir de una comparación de la imagen de la Figura 6 con una imagen de la Figura 5, se concluye que la velocidad de fase para el primer modo de las ondas de Love, asociada con la capa más profunda, se incrementa en aproximadamente un 30%. Tanto la velocidad de las ondas superficiales de Rayleigh como de Love está mu y cerca de la de las ondas de cizallamiento S, por lo tanto, el valor de velocidad medido a través del procedimiento divulgado anteriormente representa, con buena aproximación, el valor de la velocidad de cizalla  $V_s$ .

Se deduce así que la intervención de consolidación ha provocado un aumento de la velocidad de cizalla, en la capa inferior, en aproximadamente un 30 %.

- 5 El llamado proceso de inversión permite obtener una curva de dispersión teórica casi similar a la curva de dispersión experimental, de acuerdo con algoritmos, ya conocidos de por sí, para modelar ondas superficiales en sistemas multicapa. El procedimiento de cálculo permite así obtener el perfil de velocidad de cizalla,  $V_s$ , en función de la profundidad,  $z$ . A partir de la determinación del perfil de velocidad de cizalla  $V_s(z)$  se obtiene la rigidez del terreno y, en particular, la rigidez de la capa subyacente a los cimientos,  $\mu$ , dada por la relación (1).

**REIVINDICACIONES**

1. Procedimiento para determinar la rigidez de una capa geológica en términos de velocidad de propagación de las ondas elásticas dentro de un sistema geológico delimitado por una superficie libre (2) y que comprende al menos una primera capa geológica (6) que tiene una primera rigidez y un grosor (s) y una segunda capa geológica (5) que tiene una segunda rigidez y está dispuesta debajo de la primera capa geológica,
- 5 en el que la primera capa está delimitada por la superficie libre y comprende los cimientos de una estructura de construcción (1) y tiene un primer valor de rigidez y la segunda capa tiene un segundo valor de rigidez, el primer valor de rigidez que es mayor que el segundo valor de rigidez y dichas primera y segunda capa están separadas entre sí por una interfaz (3), el procedimiento comprendiendo las etapas de:
- 10 - posicionar una fuente (4) dentro de la segunda capa geológica (5), cuya rigidez está destinada a ser medida, la fuente que es capaz para generar ondas sísmicas y que se ubica a una profundidad (t), comprendida entre 0,1 m y 2 m desde la interfaz (3);
- 15 - activar dicha fuente de ondas sísmicas;
- detectar al menos una señal sísmica por medio de una matriz de sensores (8) dispuesta acoplada con la superficie libre y posicionada en la superficie libre, en el que la matriz de sensores comprende una pluralidad de sensores (8a,..., 8j), en el que la al menos una señal es una pluralidad de señales sísmicas y cada sensor de la pluralidad es capaz de detectar una señal sísmica de la pluralidad de señales sísmicas;
- 20 - determinar a partir de la al menos una señal sísmica una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa y, por lo tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa, y
- calcular la rigidez a partir de la velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa.
2. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la etapa de determinar una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa comprende las siguientes etapas:
- 25 - determinar a partir de al menos una señal sísmica la velocidad de propagación de las ondas superficiales de Rayleigh y Love acopladas a las ondas de interfaz de Stoneley, las ondas superficiales y en la interfaz que son causadas por las ondas sísmicas generadas por dicha fuente;
- determinar un mapa de dichas velocidades de propagación de las ondas superficiales en función de la frecuencia de estas;
- 30 - identificar, en el mapa de velocidades, una velocidad de propagación cuya frecuencia está correlacionada con una profundidad en el sistema geológico, y
- correlacionar al menos una velocidad de propagación identificada en el mapa de velocidades con una velocidad de cizalla de las ondas elásticas en la segunda capa (5) y, por lo tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa.
- 35 3. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la primera capa geológica está delimitada por la superficie libre y comprende los cimientos de una estructura de construcción (1).
4. Procedimiento de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicha fuente de señal sísmica es una fuente impulsiva adecuada para generar ondas internas.
- 40 5. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 2, en el que la etapa de detectar la pluralidad de señales sísmicas comprende colocar la matriz de sensores en la superficie libre y la etapa de determinar la velocidad de propagación comprende determinar, a partir de la pluralidad de señales sísmicas, la velocidad de propagación de las ondas superficiales Rayleigh y Love acopladas con las ondas Stoneley de interfaz.
- 45 6. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 1, en el que las ondas superficiales cuya velocidad de propagación se detecta se detectan mediante una técnica multicanal.
- 50 7. Procedimiento de acuerdo con las reivindicaciones 2, en el que la etapa de detectar al menos una señal sísmica comprende detectar una señal en función del tiempo durante un período de adquisición y la etapa de determinar un mapa de la velocidad de propagación de las ondas superficiales comprende realizar una transformación de la señal sísmica del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.
- 55 8. Procedimiento de acuerdo con la reivindicación 4, en el que la fuente impulsiva comprende al menos una carga explosiva con una velocidad inicial comprendida entre 300 y 700 m/s.
9. Sistema para determinar la rigidez de una capa geológica en términos de velocidad de propagación de las ondas elásticas dentro de un sistema geológico delimitado por una superficie libre (2) y que comprende al menos una primera capa geológica (6) que tiene una primera rigidez y una segunda capa geológica (5) que tiene una segunda rigidez y que está dispuesta debajo de la primera capa geológica, dichas capas que están separadas entre sí por una interfaz (3), comprendiendo el sistema
- 60 una fuente adecuada para generar ondas sísmicas;
- un matriz de sensores de señal sísmica (8) que comprende una pluralidad de sensores (8a, ..., 8j), la pluralidad que incluye un primer (8a) y un último (8j) sensor, dispuestos acoplados a la superficie libre, la matriz de sensores que se coloca en la superficie libre, y
- 65

- 5 una unidad electrónica (18) para adquirir señales sísmicas detectadas por el al menos un sensor, en el que dicha fuente se coloca en la segunda capa geológica a una profundidad (d) comprendida entre 0,1 m y 2,0 m desde la interfaz (3), la primera capa tiene un valor de rigidez mayor que el valor de rigidez de la segunda capa, y la primera la capa está delimitada por la superficie libre y comprende los cimientos de una estructura de construcción (1).
- 10 10. Sistema de acuerdo con la reivindicación 9, en el que los sensores se alinean a lo largo de una dirección de alineación y la fuente se coloca a una distancia predeterminada (D) del primer sensor de la matriz lineal de sensores, definida a lo largo de la dirección de alineación.
11. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 9 y 10, en el que la fuente de ondas sísmicas es energizada por una fuente sísmica tipo pistola de profundidad (10).

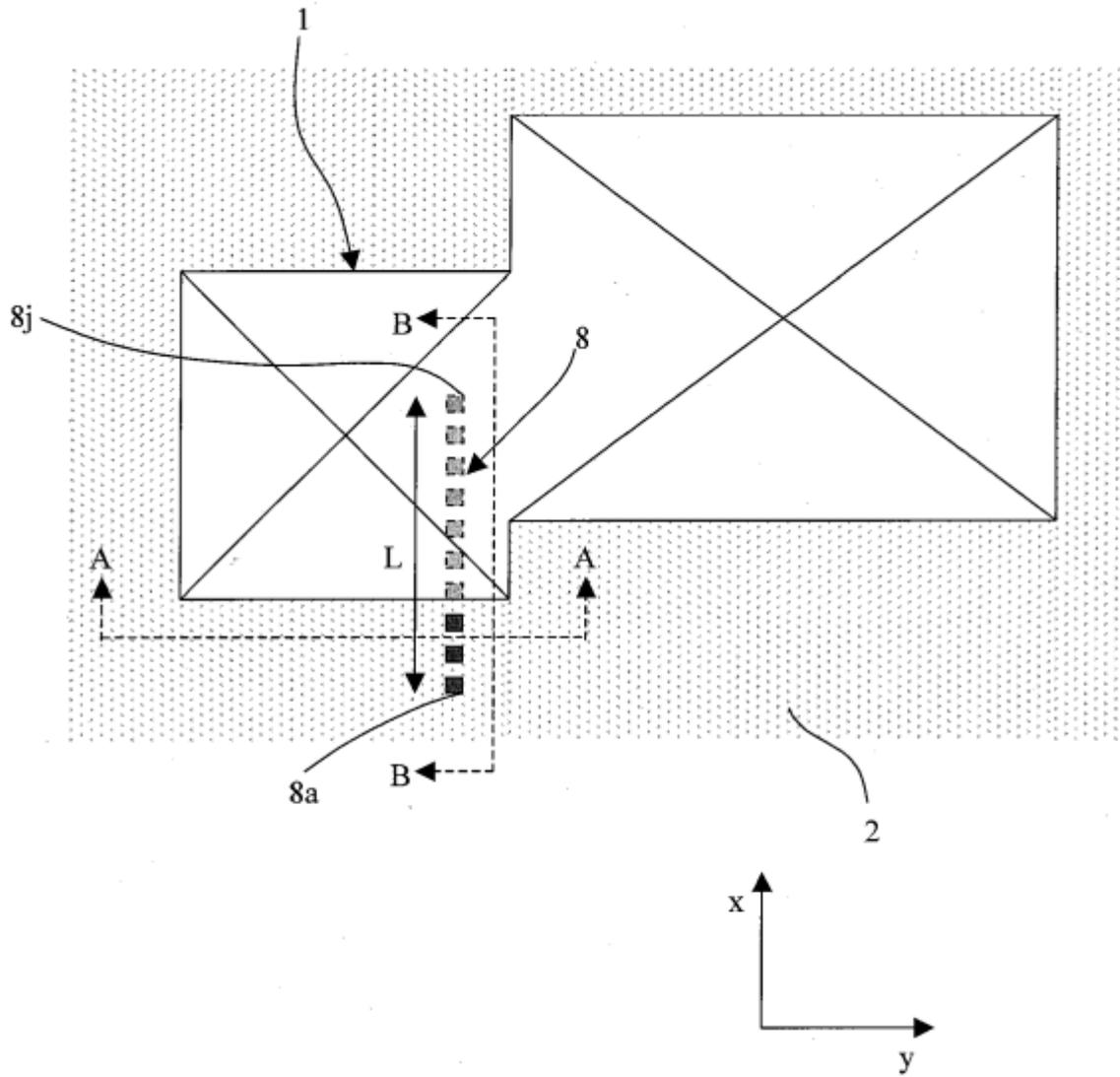


FIGURA 1

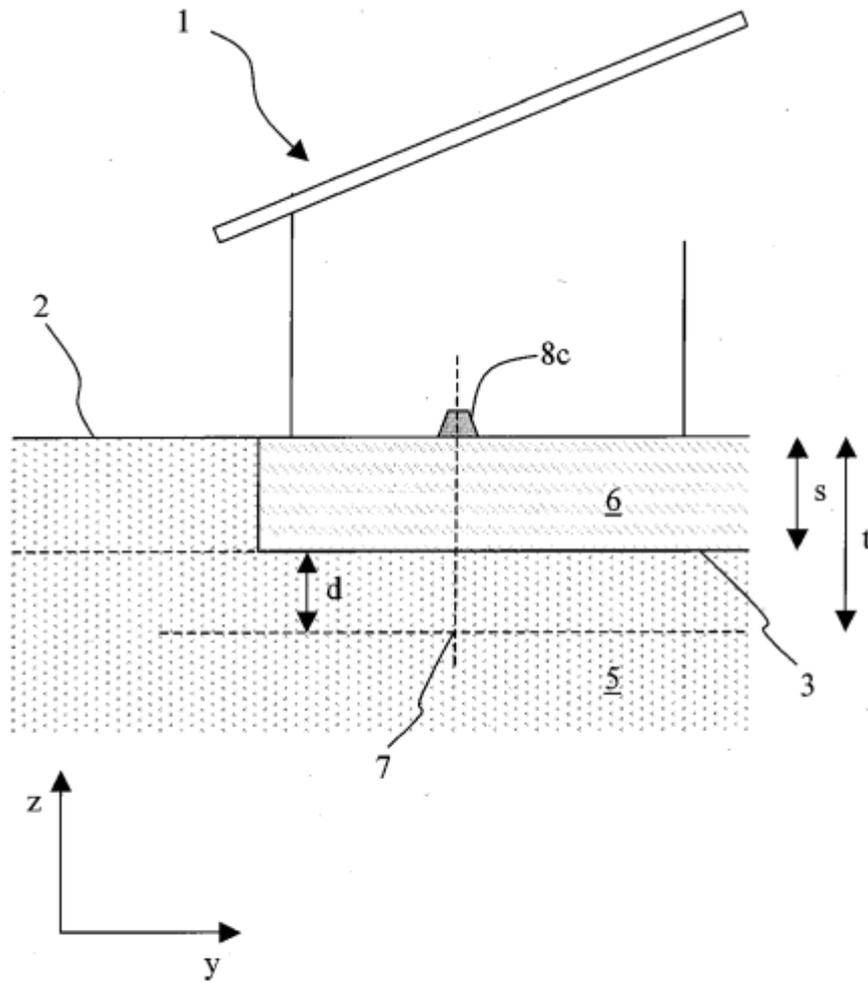


FIGURA 2

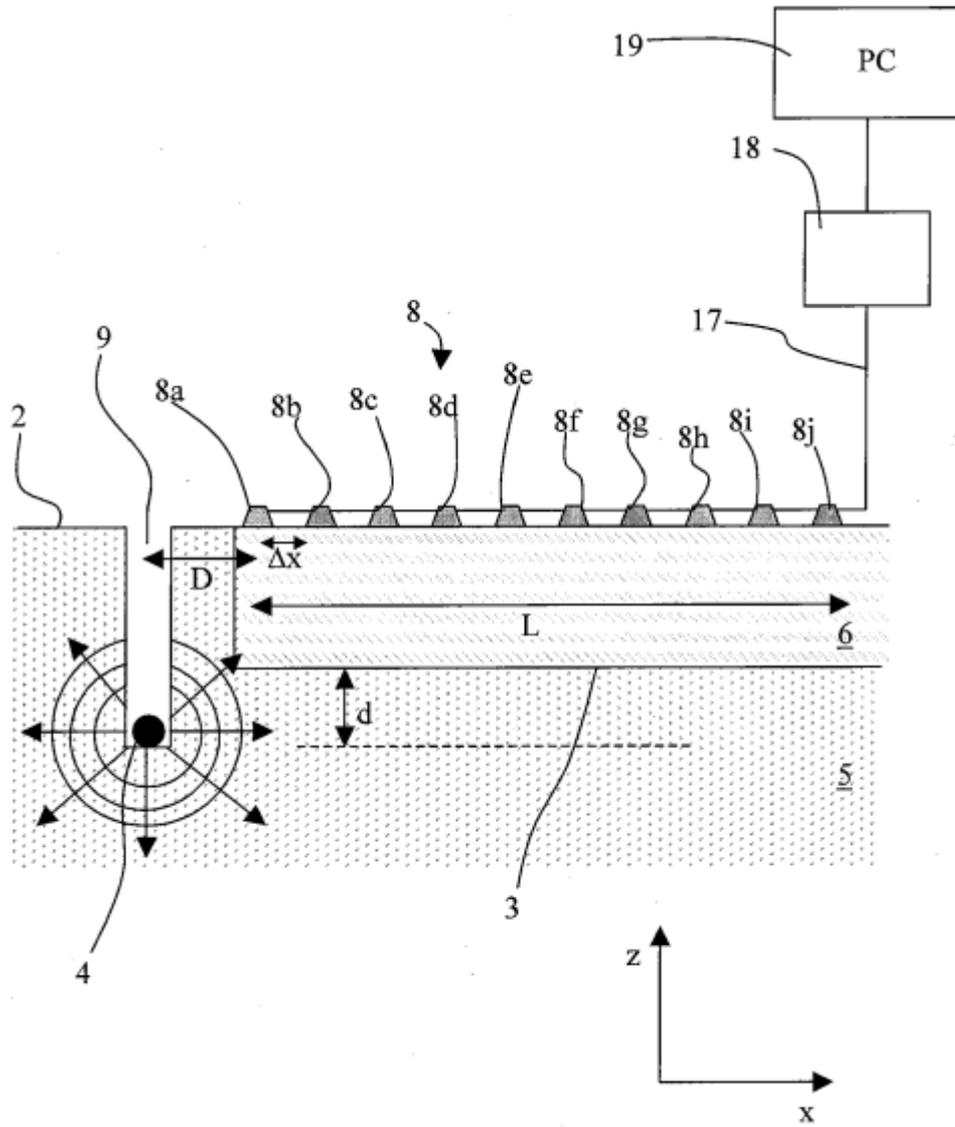


FIGURA 3

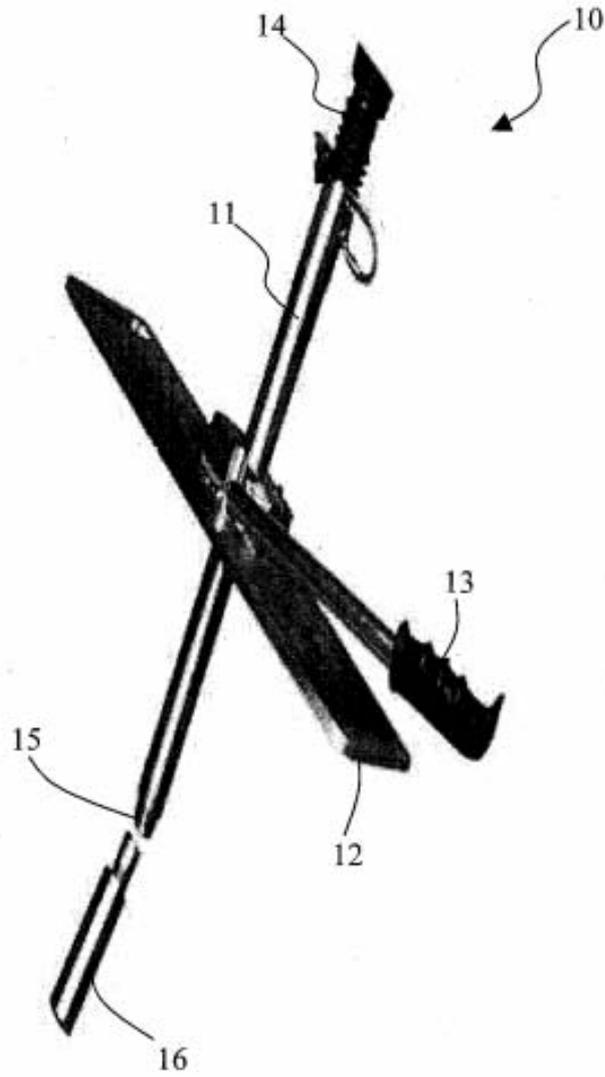


FIGURA 4

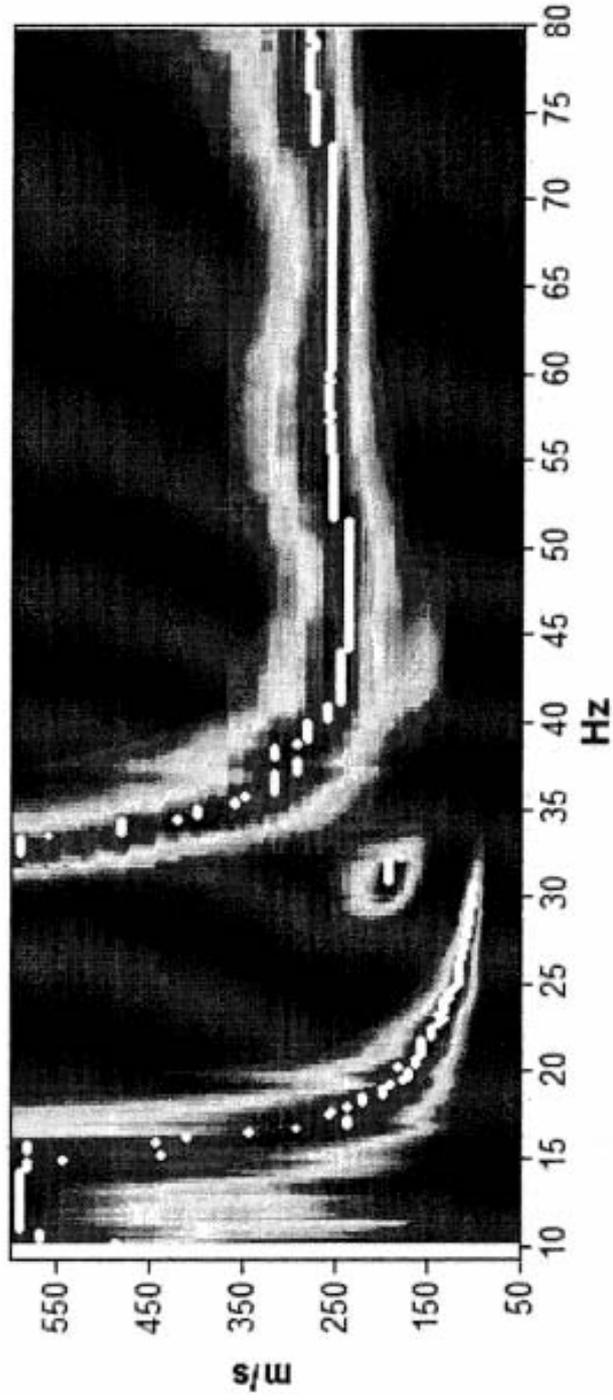


FIGURA 5

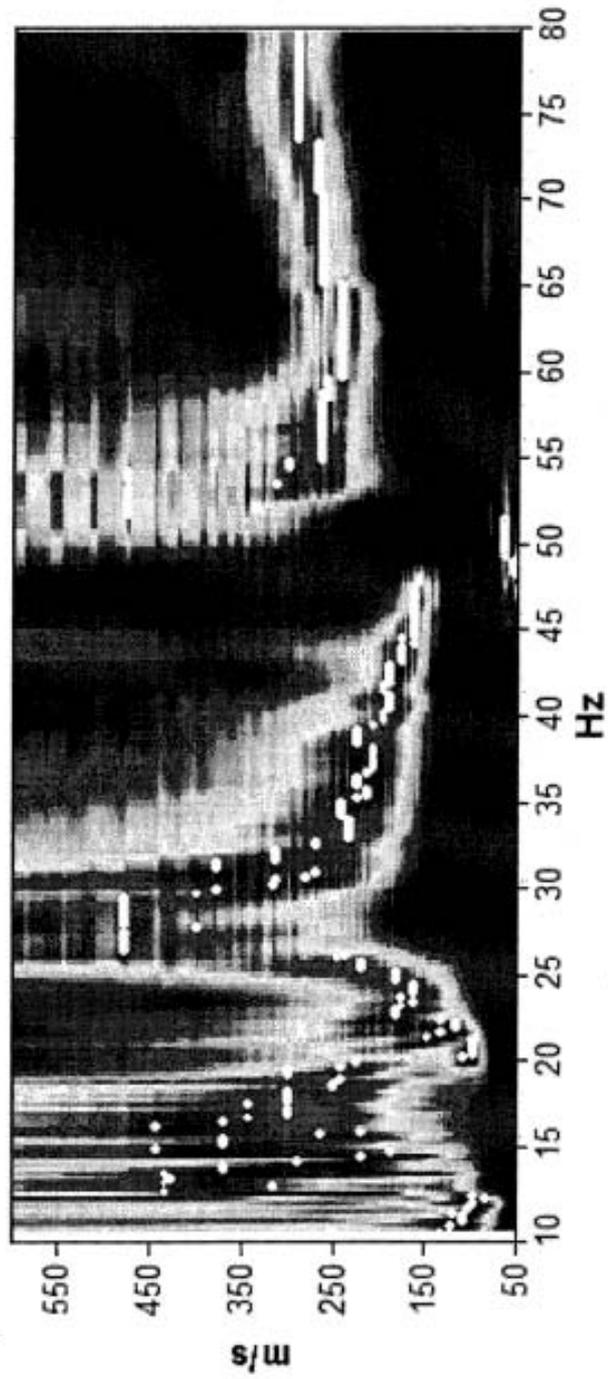


FIGURA 6