

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 787 231**

51 Int. Cl.:

G01V 1/48 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.05.2010 E 10425184 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **08.04.2020 EP 2390683**

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

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
15.10.2020

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 2 787 231 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

Método y sistema para determinar la rigidez de una capa geológica

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

10 La solicitud de patente WO 2004/019063 se refiere a un método y a un sistema para adquirir y utilizar el tiempo de retardo registrado para diferentes modos de señales sísmicas respecto de una fuente de broca de trabajo. Las capas y velocidades cercanas a la superficie se obtienen mediante modelado por tomografía computarizada de las capas meteorizadas poco profundas y submeteorizadas. La broca es la fuente que genera ondas elásticas, detectadas en la superficie terrestre utilizando una pluralidad de sensores a varias distancias respecto de la ubicación del pozo y en diferentes direcciones acimutales. La señal de referencia se registra mediante acelerómetros montados en un buje del cuadrante de la columna de sondeo. Los sensores utilizados son receptores triaxiales o de 3 componentes que detectan las ondas axiales y de torsión que emanan de la vibración de la broca.

20 La patente US 6.094.401 describe un método para generar una fuente sísmica abajo en el pozo capaz de generar un barrido de frecuencias sin una interrupción significativa del proceso de perforación. La fuente sísmica comprende un modulador controlable por frecuencia de una herramienta MWD (medición durante la perforación, por sus siglas en inglés) que se utiliza para proporcionar una gran fuerza a la broca que está en contacto con la formación. En la patente, se indica que, como la fuente está abajo en el pozo, la resolución del procesamiento de VSP (perfil sísmico vertical, por sus siglas en inglés) inverso es relativamente buena, y las formaciones por delante de la broca pueden ser captadas antes de ser alcanzadas por la herramienta de MWD.

30 La solicitud de patente WO 2008/154640 se refiere a un método para obtener datos sísmicos mejorados y reflectividades invertidas optimizadas. El método incluye la etapa de calcular una pluralidad de caracterizaciones de pozo estadísticas en función de reflectividades de pozo de banda limitada correspondientes a una región de interés subsuperficial. Se calcula una pluralidad de conjuntos de datos sísmicos procesados aplicando una pluralidad de secuencias de procesamiento sísmico diferentes a al menos una parte de un grupo de datos sísmicos correspondiente a la región de interés subsuperficial. También se calcula una pluralidad de conjuntos de reflectividades invertidas invirtiendo la pluralidad de conjuntos de datos sísmicos procesados. Se calcula una pluralidad de caracterizaciones sísmicas estadísticas en función de la pluralidad de conjuntos de reflectividades invertidas. Se calcula una pluralidad de mediciones de diferencia estadística (SDM) entre las caracterizaciones de pozo y la pluralidad de caracterizaciones sísmicas. Se selecciona una secuencia de procesamiento sísmico óptima en función de las SDM calculadas. Los datos sísmicos mejorados se obtienen procesando los datos sísmicos correspondientes a la región de interés subsuperficial utilizando la secuencia de procesamiento sísmico óptima. Después, se selecciona un algoritmo de inversión sísmica óptimo en función de las SDM calculadas. Después, los datos sísmicos se invierten usando el algoritmo de inversión sísmica óptimo para producir un conjunto de reflectividades invertidas optimizadas invirtiendo los datos sísmicos mejorados usando el algoritmo de inversión sísmica óptimo.

45 El documento US 2004 0226380 A1 divulga un ejemplo de un método para medir la rigidez de las capas base y subrasante del suelo.

50 El artículo de la Sociedad Geofísica de Geofísicos de Exploración, EE. UU. vol. 64 n.º 3, 1 de mayo de 1999 "Multichannel analysis of surface waves", documento XP 002466095, divulga un método para medir los parámetros del suelo por medio de un dispositivo multicanal. La medición de las propiedades elásticas y, en particular, la rigidez, μ , de las capas geológicas en las que se encuentran o en las que están enterrados los cimientos del edificio y, en general, las estructuras del edificio, puede tener varias aplicaciones, por ejemplo, la evaluación de la estabilidad del terreno y, de este modo, el riesgo de colapso o deformación permanente de la estructura de un edificio a largo plazo y/o en el caso de un evento sísmico.

55 La clasificación de los suelos de cimentación según el NEHRP (EE. UU.), los estándares Eurocode 8 (Europa) y NTC2008 (Italia) para el diseño de estructuras de edificios antisísmicos se basan principalmente en la velocidad de las ondas de corte de una capa homogénea equivalente a los primeros treinta metros de profundidad, V_{s30} . Las velocidades de las ondas de corte, V_s , en realidad están directamente relacionadas con la rigidez del material que forma la capa geológica a través de la ecuación

60
$$\mu = \rho V_s^2, \tag{1}$$

donde ρ es la densidad de la capa.

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 terreno debajo de los cimientos existentes, cuyo objetivo es mejorar los parámetros elásticos, como el módulo de Young y el módulo de rigidez.

5 A menudo se emplean técnicas indirectas, basadas en mediciones superficiales, es decir, sin insertar elementos detectores en el subsuelo ni extraer muestras del subsuelo y midiendo sus propiedades en un laboratorio, con el fin de medir la velocidad de las ondas elásticas. Normalmente, las técnicas indirectas son de tipo sísmico, es decir, se basan en el análisis de ondas sísmicas producidas por una fuente artificial.

10 Los enfoques convencionales para medir la velocidad de las ondas de corte requieren un número relativamente alto de sensores, con el consiguiente aumento de los costes y los espacios necesarios, así como las dificultades prácticas que implica su uso en entornos urbanos.

15 Asimismo, el uso del método convencional de prospección sísmica y, por ejemplo, la generación, por medio de un aparato adecuado, de ondas sísmicas internas longitudinales P y transversales S y el registro de la refracción de las mismas por las capas geológicas, con la consiguiente identificación y medición de las propiedades elásticas de estas últimas, resulta ineficiente. De hecho, la ley que rige la refracción en una interfaz entre dos capas es la ley de Snell

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

20 según la 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 posicionan 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 según el cual $\text{sen } r = 90^\circ$, la onda refractada viaja en paralelo a la interfaz entre las dos capas y puede volver a refractarse en la capa superficial, permitiendo de este modo medir las velocidades y los espesores de ambas
25 capas. Sin embargo, como suele ocurrir en el caso de las capas de cimentación inferiores, si $V_1 > V_2$, la onda sísmica interna no se refracta en paralelo a la interfaz y no se refracta nuevamente en la capa superficial. Por ende, es imposible medir, detectando las ondas sísmicas internas refractadas, la velocidad y el espesor de la capa subyacente, que permanece invisible y se conoce como "capa fantasma".

30 Recientemente se han desarrollado métodos para explorar el subsuelo en función del estudio de la dispersión de ondas superficiales elásticas. Estos permiten usar un número menor de sensores manteniendo la misma precisión y, generalmente, la profundidad de exploración de las ondas superficiales directamente proporcionales a la longitud de onda. C.B. Park et al. en "Multi-channel analysis of surface waves (MASW)" publicado en Geophysics, vol. 64, págs. 800-808. 1999, describen un análisis multicanal de la técnica de ondas superficiales para determinar el perfil de
35 velocidad de las ondas de corte.

En caso de análisis técnico de ondas superficiales, la fuente es un aparato que genera tanto ondas P como 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 suele activarse por medio de un martillo que golpea, una o varias veces,
40 placas de metal acopladas a la superficie del terreno que se va a explorar. De esta manera, se generan frentes de onda propagados a través del terreno subyacente.

Generalmente, la capa superficial que comprende los cimientos de la estructura de un edificio, indicada en adelante también como una capa de cimentación, suele tener una rigidez mayor que la rigidez de la capa subyacente, que puede ser de diferente tipo (por ejemplo, suelo arcilloso, suelo arenoso, etc.).
45

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 terreno que se va a explorar, la energía desarrollada por la fuente permanece mayormente atrapada en la capa superficial que sirve como guía de ondas para las ondas elásticas, debido a la
50 diferencia con respecto a la alta impedancia sísmica entre las dos capas. En realidad, a través de la interfaz entre la capa superficial y la capa subyacente, solo una fracción k de la energía incidente se transmite, mientras que la energía restante $(1-k)$ se refleja. 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 una primera aproximación, si la diferencia entre la rigidez y, por ejemplo, los productos de densidad por velocidad al cuadrado,
55 según la relación (1) de las dos capas es grande, solo una pequeña cantidad de energía se transmite a la capa subyacente y está disponible para su exploración. 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, su energía se reduce, en una primera aproximación, en un factor k^2 . Por ejemplo, un valor típico de k es 0,2, de este modo, las ondas que han explorado la capa subyacente regresan a la superficie con energía del orden de 0,04 y su identificación dentro del campo de ondas que están atrapadas para la reflexión en la primera capa (cuya energía es mucho mayor, del orden de 0,8) se vuelve prácticamente imposible. Por ende, la identificación de las ondas superficiales asociadas a la capa más profunda en los rastros sísmicos detectados y su medición son extremadamente
60 difíciles.

65 El solicitante se ha dado cuenta de que si la fuente activa del generador de ondas primarias se posiciona en la capa

subyacente cuya rigidez se pretende medir, la energía generada en la capa subyacente está disponible principalmente para caracterizar la propia capa y se transmite a la capa suprayacente únicamente después de haber "explorado" la subyacente.

5 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 queda "atrapada" en la capa subyacente y está representada por ondas de interfaz. Estas ondas, denominadas ondas de 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 vertical y horizontal simultáneo. Debido a la continuidad de los movimientos en la interfaz, las ondas de Stoneley también se extienden en la capa superior, excitando, por continuidad, tanto los movimientos horizontales como verticales, pero atenuándose exponencialmente al alejarse de la propia interfaz. Más específicamente, las ondas cuya frecuencia coincide con la de los modos de vibración de las ondas de Rayleigh y las ondas de Love en la capa suprayacente se atenuarán menos entre las ondas transmitidas. Estas últimas aparecerán en la superficie con más energía. En cualquier caso, dado que solo una fracción de energía se transmite a la interfaz, para su detección en la superficie, deben generarse con suficiente energía para registrarse.

El solicitante ha entendido que al posicionar la fuente de ondas sísmicas en la capa cuya rigidez se pretende medir, es posible detectar en la superficie las ondas de Stoneley, que se producen en la superficie como modos de ondas superficiales de Rayleigh y Love.

En un aspecto, la presente invención se refiere a un método para medir las ondas elásticas de una capa geológica según la reivindicación 1.

25 En un aspecto adicional, la presente invención se refiere a un sistema adecuado para medir las ondas elásticas de una capa geológica según la reivindicación 8.

De aquí en adelante, la presente invención se describirá en mayor detalle con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran algunas realizaciones, pero no todas. Los dibujos que ilustran las realizaciones son representaciones esquemáticas.

- La figura 1 representa una vista plana que ilustra una disposición ejemplar de una serie de sensores aptos para medir las propiedades elásticas del subsuelo por debajo y/o en las proximidades de un edificio, según una realización de la invención.
- 35 - 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. En aras de la claridad, la representación del edificio 1 se omite en la figura.
- La figura 4 muestra esquemáticamente la estructura de un rifle sísmico que puede usarse para la implementación del método según la presente invención.
- 40 - 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.
- 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 consolidar la capa subyacente a los cimientos.

45 Con referencia a las figuras 1 a 3, en una realización preferente, la presente invención se refiere a un método y a un sistema para medir la rigidez de una capa geológica posicionada debajo de los cimientos de edificios y estructuras de edificios en general, que constituyen o están incluidas en una capa superficial delimitada en la parte superior por la superficie libre del terreno e indicada como capa de base. La caracterización de las capas geológicas según el método y el sistema según la presente realización preferente se puede realizar tanto antes de una intervención de consolidación del terreno como después de la intervención con el objetivo de evaluar la propia intervención.

En la primera aproximación, es posible describir el subsuelo como un compuesto 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 despreciable. En este contexto y según una convención no limitativa de la presente invención, las capas se definen empezando desde la superficie: la primera capa será la superficial, la segunda será la subyacente, y así sucesivamente.

El método según un aspecto particular de la presente invención es adecuado para 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.

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

El sistema para medir las ondas elásticas que se propagan en el sistema geológico comprende una fuente 4 (mostrada en la figura 3) apta para generar ondas sísmicas internas elásticas y una serie de sensores 8 que comprende una pluralidad de sensores 8a, 8b, ..., 8j, cada uno de los cuales es apto para detectar ondas superficiales elásticas que se propagan a lo largo de la superficie libre 2 del terreno. Preferentemente, la serie de sensores es una serie lineal en la que los sensores están dispuestos en línea en un espaciado dado entre un sensor y el siguiente sensor adyacente (figura 3). En el ejemplo ilustrado en las figuras 1-3, la serie de sensores está constituida por diez sensores con espaciado constante Δx .

Sin embargo, no debe considerarse que el número de sensores comprendidos en la serie ilustrada es limitativo de la presente invención, seleccionándose dicho número según las aplicaciones, por ejemplo, en función de la longitud del área que se vaya a explorar, tal y como se describe más detalladamente de aquí en adelante. En este contexto, se pretende que una pluralidad de sensores comprenda al menos dos sensores, preferentemente entre 4 y 12 sensores.

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

Según un aspecto principal de las realizaciones preferentes de la presente invención, el método es adecuado para medir las ondas superficiales provocadas por ondas primarias y secundarias emitidas por una fuente proporcionada dentro de una segunda capa geológica subyacente a una primera capa geológica, posicionándose la fuente a una profundidad predeterminada mayor que el espesor de la primera capa, por ejemplo, la capa de cimentación. Con referencia a las figuras 1-3, donde el espesor de la primera capa 6 (figura 2, a lo largo del eje z) aparece referenciado como s, la fuente está dispuesta a una profundidad $t > s$. En una realización preferente, la distancia d desde la interfaz 3 entre la primera y la segunda capa geológica, es decir, $d = t - s$, está comprendida entre 0,5 m y 1,5 m.

Preferentemente, la fuente es una fuente sísmica de impulso y comprende al menos una carga explosiva con una velocidad inicial comprendida entre 300 y 700 m/s. En una realización preferente, 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 posiciona a una profundidad t, mayor que el espesor s de la capa de cimentación, 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.

En una realización preferente, la energización de la fuente se realiza mediante un rifle sísmico de profundidad, ilustrado esquemáticamente en la figura 4 e indicado en su totalidad con el número de referencia 10. El rifle comprende un cilindro 11, de longitud adecuada para alcanzar la profundidad t, que se introduce en el terreno, dentro de la capa geológica inferior, en un agujero hecho anteriormente (por ejemplo, el agujero 9 de la figura 3). Por ejemplo, la longitud del cilindro 11 del rifle sísmico es de al menos 2 metros de largo, por ejemplo, comprendido entre 2 y 3 metros, para poder posicionar y detonar la carga explosiva, es decir, un cartucho, dentro de la capa subyacente. El rifle comprende una placa 12 para apoyar en la superficie del terreno, un tirador de soporte 13 y un tirador de accionamiento 14. El extremo 15 del cilindro 11 está asociado a una cámara de explosión extraíble 16, con el fondo abierto, en que se inserta el cartucho del tipo industrial, conocido como tal y disponible en el mercado. La explosión del cartucho puede realizarse por la superficie libre, operando el tirador de accionamiento 14 que golpea mecánicamente un encendedor (no se muestra en la figura), lo que genera la explosión del cartucho, por medio de un dispositivo (no mostrado en la figura) que se extiende a lo largo del cilindro 11.

Preferentemente, los sensores de la serie de sensores 8 son geófonos, es decir, transductores electromecánicos de ondas elásticas.

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

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

se mantiene, 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 λ son los de baja frecuencia y aquellos con longitud de onda pequeña λ son los de alta frecuencia.

Preferentemente, cada sensor 8a, 8b, ..., 8j es un geófono con una frecuencia comprendida entre 4 y 10 Hz. En una realización, los geófonos 8a, ..., 8j de la serie 8 son geófonos de oscilación horizontal, adecuados para detectar la velocidad de las ondas superficiales con polarización horizontal transversal, es decir, ondas de Love. En una realización adicional, los geófonos son geófonos de oscilación 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 método de medición comprende la generación de un disparo "fuera" de la línea de sensores, es decir, la fuente se dispone a una distancia predeterminada D, definida a lo largo de la dirección de disposición de los sensores (eje x), respecto del sensor más cercano, es decir, primer sensor 8a, de la serie. Preferentemente, con el objetivo de reducir o minimizar los efectos del campo cercano, D no es menor de 5 m, más preferentemente está comprendida entre 6 y 20 m.

Preferentemente, la serie 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 alineada con la serie de sensores, sino que está ligeramente desplazada con respecto a la posición de alineación en el plano (y, z), indicado con el número de referencia 7 en la figura 2.

En una realización adicional (no mostrada en las figuras), la serie de sensores se desarrolla según una geometría bidimensional, tal como, por ejemplo, según una disposición en forma de X, T o L. El espaciado mínimo entre los sensores se encuentra en relación con la longitud de onda mínima detectable, y, de este modo, con la profundidad mínima detectable. Preferentemente, el espaciado mínimo está comprendido entre 0,5 y 2 m.

En una realización, los sensores de la serie de sensores están espaciados por igual entre sí, con un espaciado Δx de entre 0,5 y 2 m.

La distancia entre el primer y el último sensor de la serie, denominada longitud de detección e indicada mediante L, representa la longitud de la cubierta de detección del sistema y está en relación con la longitud de onda máxima, y, de este modo, con la máxima profundidad detectable.

La etapa de registrar las ondas superficiales se lleva a cabo según la técnica de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW, por sus siglas en inglés). En esta, el registro de las ondas superficiales generadas por la fuente sísmica por la pluralidad de receptores se produce simultáneamente. Los sensores suelen estar acoplados al suelo por medio de barras o sobre pavimentos/cimientos, por medio de trípodes. Con referencia a la figura 3, los sensores 8a, 8b, ..., 8j, sincronizados en adquisición, se conectan, a través de una línea de conexión 17, a una línea de adquisición de datos 18, preferentemente un sismógrafo digital multicanal con un número de canales al menos igual al número de sensores, que puede ser un sismógrafo comercial (por ejemplo, Rosina producido por Micromed spa). La unidad de adquisición de datos puede comprender, o estar conectada a su vez a, una unidad central de procesamiento 19, por ejemplo, a un ordenador personal (PC). La adquisición de rastros sísmicos se produce a partir de la superación de un umbral preestablecido ("desencadenador", 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 ("desencadenador previo"), durando dicho período unos segundos o unas pocas fracciones de segundo que preceden al instante en que se supera el umbral.

Durante el período de adquisición de datos por la unidad de adquisición de datos, los rastros sísmicos son registrados por cada sensor en función del tiempo, obteniendo de este modo una pluralidad de señales de amplitud/tiempo, detectándose cada señal por el sensor respectivo de la serie de sensores.

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 (p-f), o al dominio de velocidad/frecuencia (V-f), según los métodos de procesamiento conocidos en la técnica de campo del MASW. Dicha técnica es generalmente eficiente para aislar las ondas superficiales de las ondas sísmicas internas (P y S), constituyendo generalmente las primeras la parte principal del rastro sísmico en presencia de una energización suficientemente lejana. Una curva de dispersión se calcula buscando los valores máximos de potencia espectral en el espacio f-k o p-f, para formar una imagen bidimensional de la velocidad de fase de las ondas de Rayleigh y/o Love en función de la frecuencia, que a su vez se vincula a la profundidad.

En particular y según una realización, después de registrar los rastros sísmicos, la etapa para determinar la velocidad de las ondas superficiales comprende las siguientes etapas:

- 1) se plantea una hipótesis para un valor de velocidad de prueba (V_i),
- 2) los rastros se traducen en el tiempo a los diferentes geófonos en una cantidad (Δt) determinada por la relación entre la distancia de cada geófono a la fuente y la velocidad hipotética V_i ;
- 3) los rastros traducidos de este modo se suman, para calcular la función de correlación de todos los rastros,
- 4) se lleva a cabo una transformación de la señal correlacionada en el dominio de la frecuencia. Los máximos espectrales indicarán la frecuencia de las fases que han viajado a la velocidad V_i .

Llevar a cabo las etapas 1)-4) para diferentes velocidades de prueba produce una serie de datos que se representa en un gráfico- V_i bidimensional de frecuencias, generalmente representada con colores, donde los colores son

proporcionales a los espectros de potencia en la etapa 4). Cuanto mayor sea la densidad espectral de potencia en un par de velocidad y frecuencia dado, mayor es la energía de las ondas.

5 Los valores máximos en los gráficos 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 de Stoneley, que se producen de este modo como ondas superficiales, ondas superficiales tanto de Rayleigh como de Love.

10 En la práctica, lo que pasa es que las ondas de Stoneley, que viajan en la interfaz entre la capa subyacente y la capa superior, se acoplan con las ondas superficiales de la misma frecuencia, proporcionando energía a las mismas. Son estas ondas superficiales con "mayor energía" las que se registran en la superficie y proporcionan información sobre las ondas de Stoneley y, de este modo, sobre la capa subyacente.

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

20 La figura 5 es una imagen ejemplar de dispersión experimental, en el dominio de frecuencia-velocidad de fase, obtenido a partir del análisis de los rastros sísmicos medidos en un sistema geológico de dos capas, en el que la capa superior está constituida por los cimientos y tiene un espesor s de 1,3 m. Las condiciones del experimento a las que se refiere la figura 5 fueron: una serie 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 un rifle sísmico de calibre 8 con cartucho industrial explosivo que desarrolla una presión de aproximadamente 1700 bares y una velocidad inicial de gas 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 serie; la toma de muestras de las señales se realizó a una frecuencia de 1024 Hz.

25 En la imagen de la figura 5, se pueden ver 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 región de baja frecuencia extendida de aproximadamente 20 a 30 Hz (donde hay una alta densidad de puntos de energía máxima, representados por círculos blancos) y una segunda región de alta frecuencia que está extendida aproximadamente 35 a 80 Hz. A partir de los puntos de energía máxima en cada región, a continuación, 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, de este modo, 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.

35 Después de la detección indicada en la figura 5, se llevó a cabo una intervención para consolidar la capa subyacente a la capa de cimientos superficial. La intervención de consolidación se puede producir, por ejemplo, proporcionando una pluralidad de agujeros a través de la capa del terreno que se va a consolidar (es decir, la capa inferior 5) y posteriormente inyectando una resina expandida para llenar los agujeros, según las técnicas conocidas.

40 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 no 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 intervalo 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 aproximadamente de 55 a 100 Hz, con una velocidad 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, asociado a la capa más profunda, aumenta aproximadamente un 30 %. Tanto la velocidad de las ondas superficiales de Rayleigh como de Love está muy cerca de la de las ondas de corte S, por lo tanto, el valor de velocidad detectado mediante el método descrito anteriormente representa, con buena aproximación, el valor de la velocidad de corte V_s .

55 De este modo, se deduce que la intervención de consolidación ha causado un aumento de la velocidad de corte en aproximadamente un 30 %.

60 El denominado proceso de inversión permite obtener una curva de dispersión teórica casi similar a la curva de dispersión experimental, según algoritmos, conocidos como tal, para modelar ondas superficiales en sistemas multicapa. El procedimiento de cálculo permite obtener de este modo, el perfil de velocidad de corte, V_s , en función de la profundidad, z . A partir de la determinación del perfil de velocidad de corte $V_s(z)$ se obtiene la rigidez del terreno y, en particular, la rigidez de la capa subyacente a los cimientos, m , dada por la relación (1).

REIVINDICACIONES

1. Método 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, estando dicha primera y segunda capa separadas entre sí por una interfaz (3), comprendiendo el método las etapas de:
- posicionar una fuente (4) dentro de la segunda capa geológica (5), cuya rigidez se pretende medir, siendo la fuente apta para generar ondas sísmicas;
 - activar dicha fuente de ondas sísmicas;
 - detectar al menos una señal sísmica por medio de al menos un sensor (8) dispuesto en la superficie libre, en donde la detección comprende detectar una pluralidad de señales sísmicas por medio de una serie de sensores (8) que comprende una pluralidad de sensores (8a, ..., 8j) dispuestos en la superficie libre (2), siendo cada sensor apto para detectar una señal sísmica de la pluralidad de señales sísmicas y para detectar ondas superficiales elásticas que se propagan a lo largo de la superficie libre, en donde el registro de ondas superficiales se lleva a cabo según una técnica de análisis multicanal de ondas superficiales;
 - determinar a partir de al menos una señal sísmica una velocidad de corte de ondas elásticas en la segunda capa y, por tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa, dicha etapa de determinar una velocidad de corte de las ondas elásticas en la segunda capa comprende las siguientes etapas:
 - determinar a partir de al menos una señal sísmica velocidades de propagación de las ondas superficiales producidas 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;
 - 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 corte de las ondas elásticas en la segunda capa (5) y, por tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa,
 - calcular la rigidez a partir de la velocidad de corte de las ondas superficiales elásticas en la segunda capa.
2. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el valor de rigidez de la primera capa es mayor que el valor de rigidez de la segunda capa.
3. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera capa geológica está delimitada por la superficie libre y comprende los cimientos de la estructura de un edificio (1).
4. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la primera capa tiene un espesor (s) y dicha fuente se posiciona a una profundidad (t) con respecto a la superficie libre mayor que el espesor de la primera capa.
5. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde dicha fuente de señal sísmica es una fuente impulsiva adecuada para generar ondas sísmicas internas.
6. Método de acuerdo con la reivindicación 6, en donde la fuente impulsiva comprende al menos una carga explosiva con una velocidad inicial comprendida entre 300 y 700 m/s.
7. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en donde 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 de tiempo al dominio de frecuencia.
8. 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, estando dichas capas separadas entre sí por una interfaz (3), comprendiendo el sistema una fuente apta para generar ondas sísmicas, estando posicionada la fuente dentro de la segunda capa geológica, siendo el valor de rigidez de la primera capa mayor que el valor de rigidez de la segunda capa; una serie de sensores de señal sísmica (8) que comprende una pluralidad de sensores (8a, ..., 8j), incluyendo la pluralidad un primer (8a) y un último (8j) sensor, dispuestos en la superficie libre con un espaciado predeterminado entre sí, siendo dichos sensores de señal (8) aptos para detectar una señal sísmica de la pluralidad de señales sísmicas y para detectar ondas superficiales elásticas que se propagan a lo largo de la superficie libre, en donde el registro de ondas superficiales se lleva a cabo según una técnica de análisis multicanal de ondas superficiales, y una unidad electrónica (18) para adquirir señales sísmicas detectadas por la serie de sensores de señal sísmica, estando configurada dicha unidad electrónica (18) para determinar a partir de al menos una señal sísmica una velocidad de corte de ondas elásticas en la segunda capa y, por tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa al:

- determinar a partir de al menos una señal sísmica velocidades de propagación de las ondas superficiales producidas 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, 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 corte de las ondas elásticas en la segunda capa (5) y, por tanto, indicativa de la rigidez de la segunda capa, estando configurada dicha unidad electrónica (18) para calcular la rigidez a partir de la velocidad de corte de las ondas superficiales elásticas en la segunda capa.
- 5
- 10 9. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8, en donde los sensores están alineados a lo largo de una dirección de alineación y la fuente se posiciona a una distancia predeterminada (D) del primer sensor de la serie lineal de sensores, definida a lo largo de la dirección de alineación.
- 15 10. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8 o 9, en donde dicha fuente se posiciona en la segunda capa a una profundidad (d) comprendida entre 0,1 m y 2,0 m desde la interfaz de la primera capa.
11. El sistema según la reivindicación 8, en donde la fuente es una fuente impulsiva.
- 20 12. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, en donde la fuente de ondas sísmicas es energizada por una pistola sísmica de profundidad (10).
- 25 13. El sistema según la reivindicación 8, en donde los sensores de señal sísmica de la serie son geófonos de oscilación horizontal, adecuados para detectar la velocidad de las ondas de Love o geófonos de oscilación vertical adecuados para detectar la velocidad de las ondas superficiales de Rayleigh.

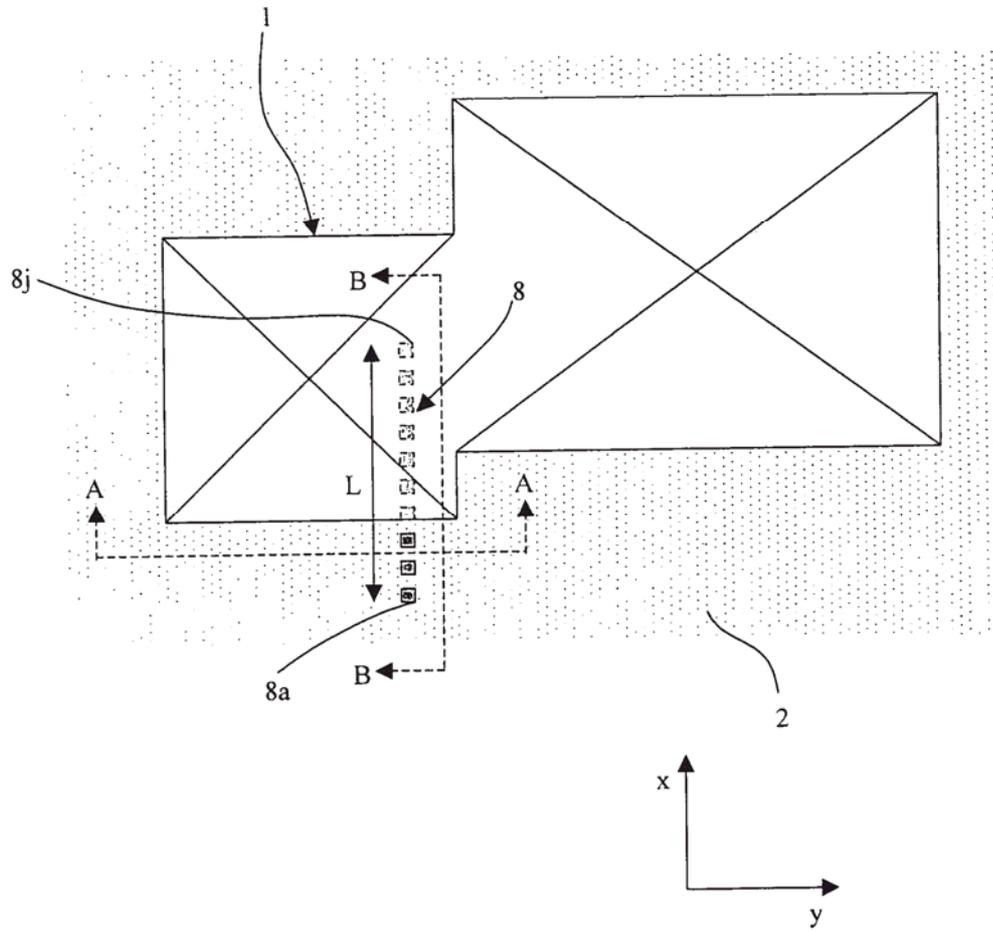


FIG. 1

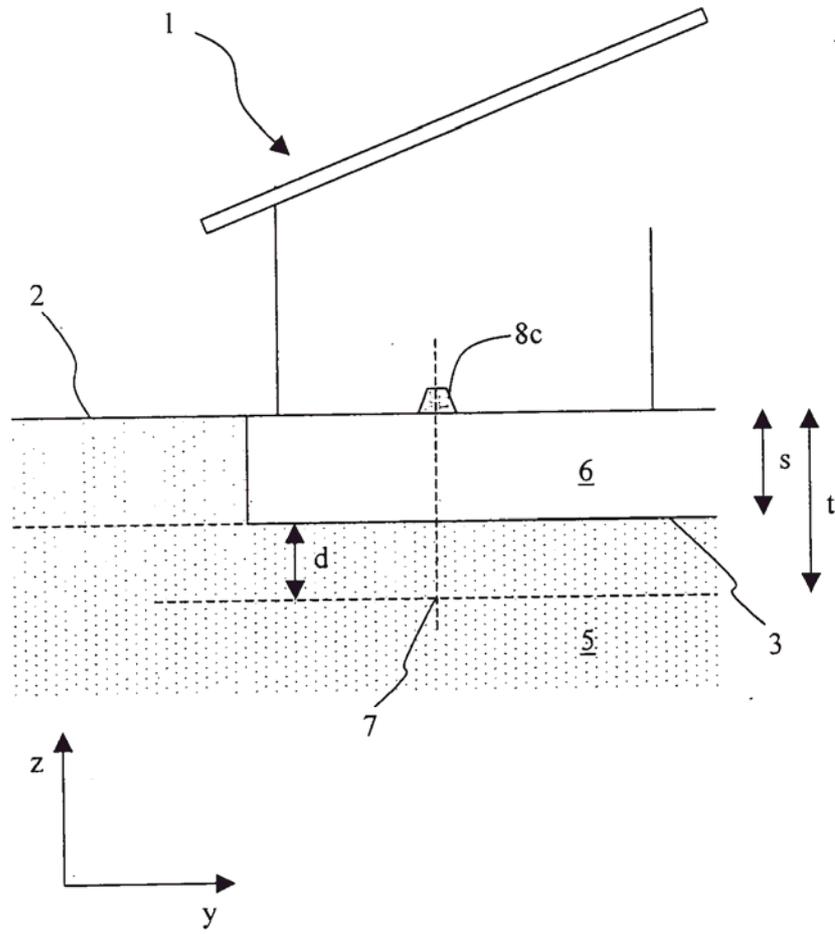


FIG. 2

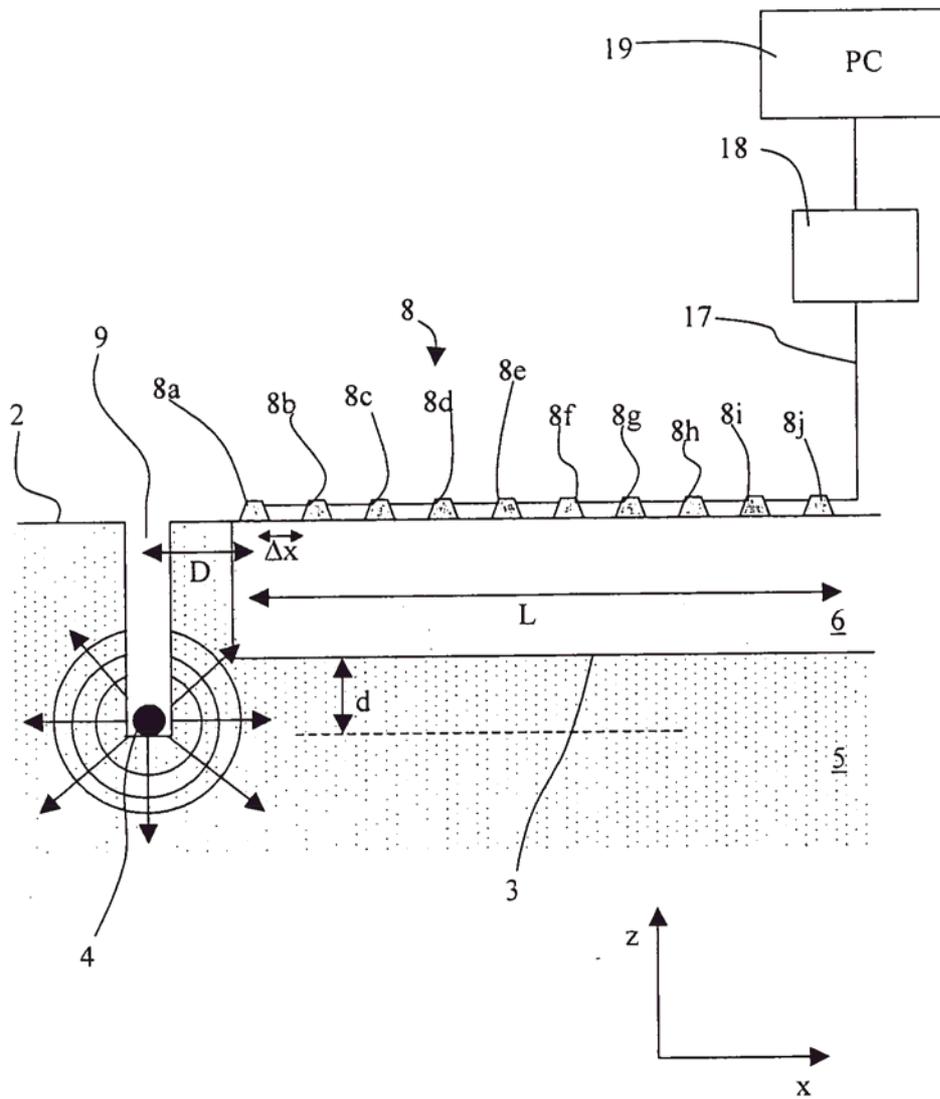


FIG. 3

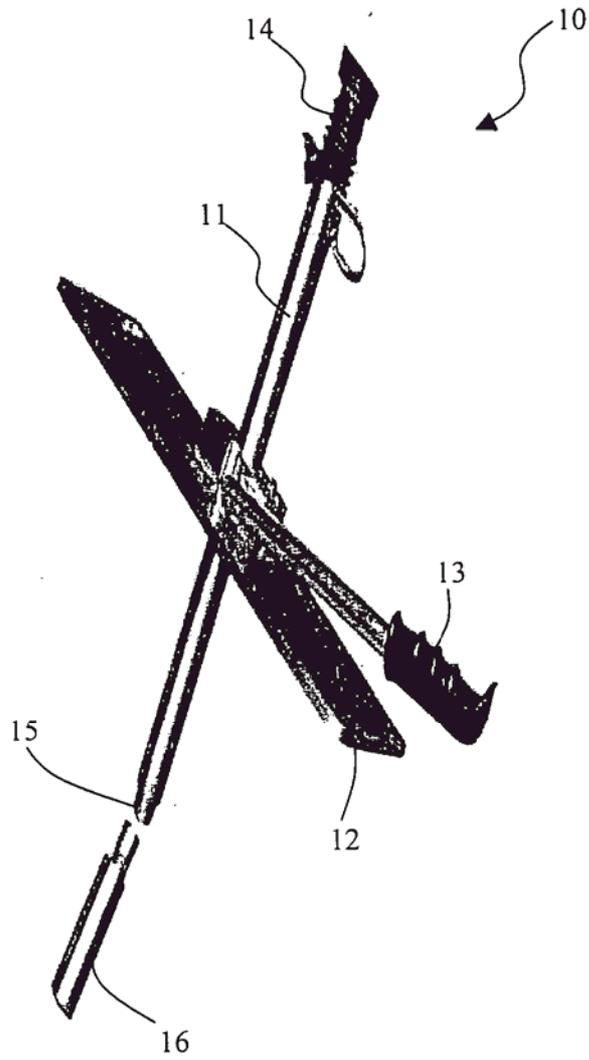


FIG. 4

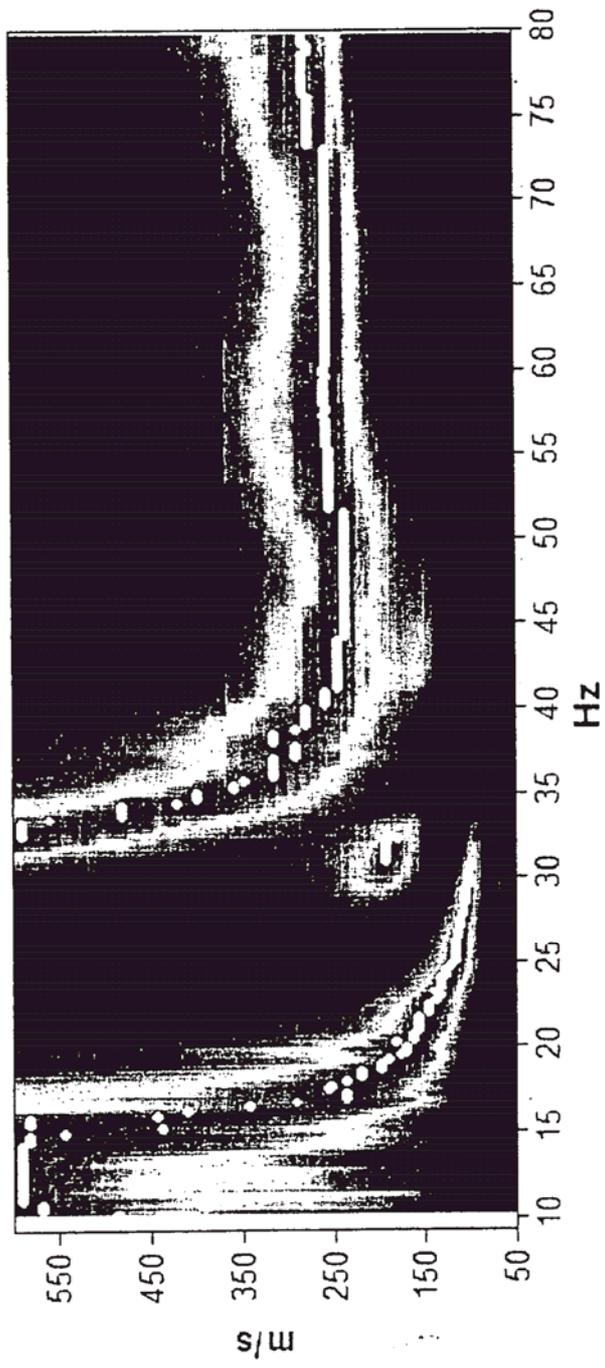


FIG. 5

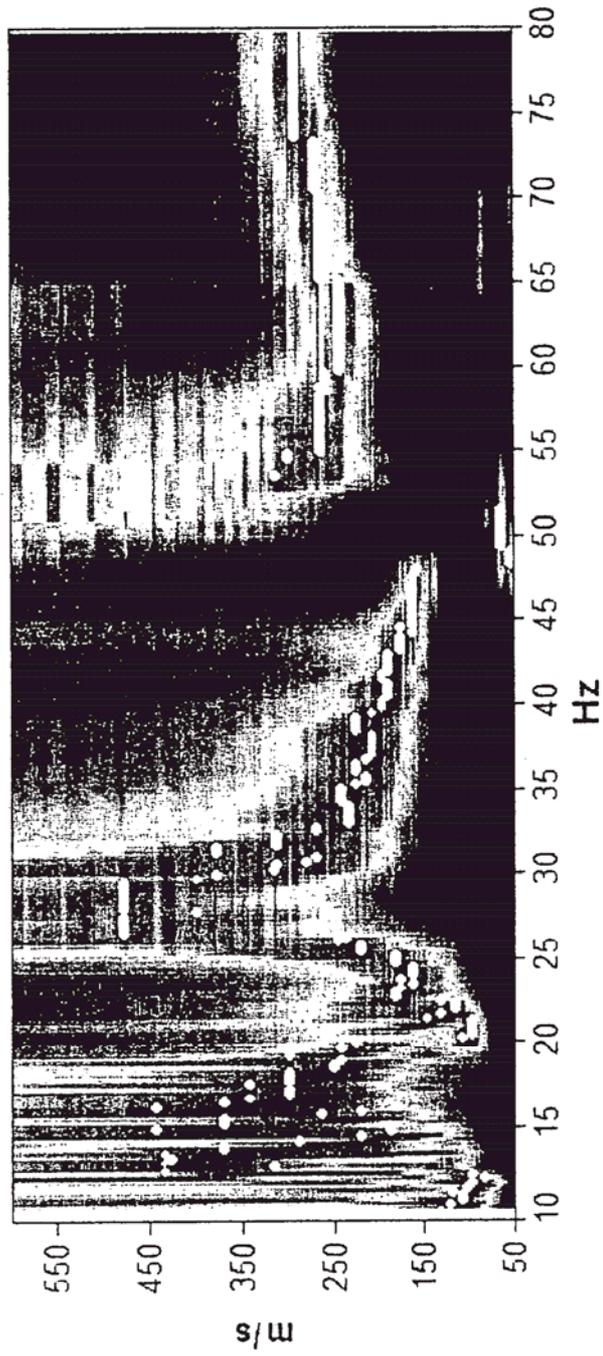


FIG. 6