

(19)



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA



(11) Número de publicación: **2 949 569**

(51) Int. Cl.:

**E02D 3/046** (2006.01)

**E02D 3/054** (2006.01)

**E02D 3/12** (2006.01)

(12)

## TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **02.06.2010 PCT/US2010/037032**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **13.01.2011 WO11005386**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **02.06.2010 E 10797500 (5)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.04.2023 EP 2446089**

---

(54) Título: **Aparato y método para la mejora del terreno**

(30) Prioridad:

**24.06.2009 US 219814 P**

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

**29.09.2023**

(73) Titular/es:

**GEOPIER FOUNDATION COMPANY, INC.  
(100.0%)**

**130 Harbour Place Drive, Suite 280  
Davidson, North Carolina 28036, US**

(72) Inventor/es:

**MAHER, STEPHEN, A. y  
WISSMANN, KORD, J.**

(74) Agente/Representante:

**SÁEZ MAESO, Ana**

ES 2 949 569 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

Aparato y método para la mejora del terreno

5 Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

Esta solicitud de patente está relacionada y reivindica la prioridad de la solicitud provisional de EE. UU. con número de serie 61/219,814, presentada el 24 de junio de 2009.

10 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un aparato y un método para mejorar la resistencia y la rigidez del suelo mediante el tratamiento del suelo con un dispositivo de desplazamiento que tiene una pluralidad de púas y, opcionalmente, el llenado subsiguiente de los huecos creados por el dispositivo con medios fluidos como, por ejemplo, arena, grava, materiales reciclados, materiales de desecho, pedazos de neumáticos, lechada u hormigón.

15 Antecedentes de la invención

20 Las instalaciones pesadas o sensibles a los asentamientos que están ubicadas en áreas que contienen suelos blandos, sueltos o débiles a menudo se apoyan sobre cimientos profundos. Tales cimientos profundos suelen estar hechos de pilotes hincados o pilares de hormigón instalados después de la perforación. Los cimientos profundos están diseñados para transferir cargas estructurales a través de suelos blandos a estratos de suelo más competentes. Los cimientos profundos suelen ser relativamente caros en comparación con otros métodos de construcción.

25 Otra forma de sostener tales estructuras es excavar los suelos blandos, sueltos o débiles y luego llenar la excavación con material más competente. El área completa debajo de los cimientos del edificio normalmente se excava y se reemplaza hasta la profundidad del suelo blando, suelto o débil. Este método es ventajoso porque se realiza con métodos de movimiento de tierras convencionales, pero tiene las desventajas de ser costoso cuando se realiza en áreas urbanas y puede requerir que se realice un drenaje o apuntalamiento costoso para estabilizar la excavación.

30 Otra forma más de soportar tales estructuras es tratar el suelo con "compactación dinámica profunda" que consiste en dejar caer un peso pesado sobre la superficie del terreno. El peso se deja caer desde una altura suficiente para provocar que se desarrolle una gran onda de compresión en el terreno. La onda de compresión compacta el suelo, siempre que el suelo tenga una gradación suficiente para ser tratable. Hay disponible una variedad de formas de peso para lograr la compactación mediante este método, tal como las descritas en patente de EE. UU. No. 6,505,998. Si bien la compactación dinámica profunda puede ser económica para ciertos sitios, tiene la desventaja de que induce grandes ondas como resultado del peso que golpea el suelo. Estas ondas pueden dañar las estructuras. La técnica es deficiente porque solo es aplicable a una pequeña banda de gradaciones de suelo (tamaños de partículas) y no es adecuada para materiales con partículas finas apreciables. Lo que se necesita en el campo es un sistema que pueda mejorar rápidamente los suelos no cohesivos, cohesivos y semicohesivos sin inducir vibraciones dañinas.

35 Más recientemente, se ha utilizado el refuerzo del terreno con columnas de agregado para soportar estructuras ubicadas en áreas que contienen capas de suelos blandos. Las columnas están diseñadas para reforzar y fortalecer las capas blandas y reducir los asentamientos. Dichos pilares se construyen utilizando una variedad de métodos, incluidos métodos de perforación y apisonamiento, tal como se describe en la patente de EE. UU. No. 5,249,892 y 6,354,766 ("Short Aggregate Piers"), métodos de mandril accionado tales como los descritos en la patente de EE. UU. No. 6,425,713 ("Lateral Displacement Pier"), y métodos de mandril accionados por cabeza apisonadora como se describe en la patente de EE. UU. No. 7,226,246 ("Impact® system").

40 La técnica de "pilar de agregado corto" mencionada anteriormente, tal como se describe en la patente de EE. UU. No. 5,249,892, que incluye perforar o excavar una cavidad, es una solución de cimentación efectiva, especialmente cuando se instala en suelos cohesivos donde la estabilidad de la pared lateral del orificio se mantiene fácilmente. El método pilar de agregado corto, en teoría, también se puede aplicar a múltiples orificios a la vez. Sin embargo, esta técnica tiene las desventajas de requerir revestimiento en suelos granulares con orificios colapsados y de necesitar el relleno de los orificios antes del apisonamiento. Cuando teóricamente se aplica a múltiples orificios a la vez, el sistema se limita a profundidades de tratamiento muy superficiales, tales como las necesarias para mejorar debajo de los pavimentos. Se necesita en el campo un sistema que supere estas deficiencias al permitir la mejora del suelo en una amplia gama de condiciones del suelo sin la necesidad de llenar los huecos entre las pasadas de apisonamiento y de ser capaz de tratar a las profundidades más profundas requeridas para el soporte de zapatas continuas de poca profundidad.

45 Los métodos "Pilar de Desplazamiento Lateral" y sistema "Impact®" fueron desarrollados para instalaciones de columnas de agregados en suelos granulares donde la estabilidad de la pared lateral de la cavidad no se mantiene fácilmente. El pilar de desplazamiento lateral se construye como se describe en patente de EE. UU. No. 6,425,713 introduciendo una tubería en el terreno, perforando el suelo dentro de la tubería, llenando la tubería con agregado y usando la tubería para compactar el agregado "en capas delgadas". Por lo general, se usa un borde biselado en la

parte inferior de la tubería para la compactación. El sistema Impact® es una extensión del pilar de desplazamiento lateral. En este caso, se introduce en el terreno un cabezal de compactación de menor diámetro (de 8 a 20 pulgadas) (de 20.32 a 50.8 cm) como se divulga en la patente de EE. UU. No. 7,226,246. La cabeza de pisón está unida a una tubería, que se llena con piedra triturada una vez que la cabeza de pisón se coloca en la profundidad de diseño. Luego se levanta la cabeza de pisón, lo que permite que la piedra permanezca en la cavidad, y luego la cabeza de pisón se acciona de regreso para densificar cada capa de agregado. Una ventaja del sistema Impact®, sobre el pilar de desplazamiento lateral, es la velocidad de construcción.

El sistema "Rampact®" es otro método de desplazamiento en el que un único mandril de forma cónica se introduce en el terreno y luego se llena con piedra triturada como se describe en la patente de EE. UU. No. 7,326,004. El mandril es hueco y está equipado con una placa de sacrificio o un mecanismo de válvula en la parte inferior. Posteriormente, se levanta el mandril para permitir que la roca fluya por la parte inferior del mandril. Luego, el mandril se vuelve a introducir en la cavidad para compactar la piedra. El pilar se construye progresivamente hacia arriba en capas delgadas desde la parte inferior.

Los documentos EP0672794, GB2217427, RU2116193C1 y FR2482155A1 divultan otros dispositivos de densificación. El documento GB2217427 es el estado de la técnica más cercano con respecto a la aplicación y se refiere a un método para compactar material aislante granular en el espacio anular entre una cubierta interior y una pared exterior de un tanque de almacenamiento utiliza un aparato que comprende un portador, medios para mover el portador alrededor del espacio, y una pluralidad de compactadores alargados sostenidos por y que dependen del portador. El método comprende bajar periódicamente el portador para sumergir los compactadores en el material granular y luego elevar el portador para retirar los compactadores del material granular y mover periódicamente el portador a diferentes posiciones con los compactadores retirados del material granular.

## 25 Resumen de la invención

Las realizaciones de acuerdo con la invención se establecen en las reivindicaciones independiente 1 y 13 con realizaciones específicas adicionales como se establece en las reivindicaciones dependiente. La presente invención está dirigida a un aparato y un método para mejorar el terreno. En una realización, se proporciona un dispositivo para mejorar el terreno y comprende una placa superior que tiene una primera superficie configurada para tener un dispositivo de accionamiento unido a ella para proporcionar impacto sobre ella; una pluralidad de púas que se extienden verticalmente unidas a una segunda superficie de la placa superior opuesta a la primera superficie de la placa superior, y espaciadas horizontalmente entre sí en los bordes laterales superiores de la misma, para ser introducido en una superficie del terreno; y las púas están conformadas, espaciadas y orientadas entre sí de manera que se logre el desplazamiento del material del terreno hacia abajo y radialmente hacia afuera.

En una realización ejemplar, las púas se pueden afilar para que sean más estrechas en un extremo alejado de la placa superior que en la unión a la segunda superficie de la placa superior. Las púas se pueden afilar en un ángulo en el rango de 0° a 5°, y más específicamente, en un ángulo en el rango de 0.5° a 2.5°. Las púas pueden tener una longitud en el rango de 2 a 30 pies (0.6096 a 9.144 metros), pueden ser circulares en sección transversal o articuladas en sección transversal. Las púas pueden ser sustancialmente planas en un extremo alejado de la placa superior, sustancialmente puntiagudas en un extremo alejado de la placa superior, o tener una forma bulbosa en un extremo alejado de la placa superior. Las púas pueden estar hechas de material ferroso, acero o materiales compuestos. Las púas pueden ser huecas y tener aberturas en los extremos alejados de la placa superior y válvulas respectivas en las aberturas para restringir la entrada de tierra durante el avance y para permitir el paso de material fluido hacia el exterior durante la retracción. Las púas huecas también pueden tener aberturas en los extremos alejados de la placa superior y respectivas placas de sacrificio en las aberturas.

En una realización ejemplar, la pluralidad de púas comprende cinco púas espaciadas horizontalmente entre sí, con cuatro púas perimetrales espaciadas alrededor de la periferia de la placa superior y rodeando una púa ubicada en el centro. Las cuatro púas perimetrales se pueden orientar a 45° sobre su eje vertical en relación con la púa ubicada en el centro. En otro ejemplo de realización, la pluralidad de púas comprende once púas espaciadas horizontalmente entre sí, con ocho púas perimetrales espaciadas alrededor de la periferia de la placa superior y rodeando tres púas situadas en el centro. Las ocho púas perimetrales se pueden orientar a 45° sobre su eje vertical en relación con las púas ubicadas en el centro.

En otra realización, se proporciona un método para mejorar el terreno y comprende proporcionar un dispositivo para mejorar el terreno comprendido por una placa superior que tiene una primera superficie configurada para tener un dispositivo de accionamiento unido a ella para proporcionar impacto sobre ella, y una pluralidad de púas que se extienden verticalmente unidas a una segunda superficie de la placa superior opuesta a la primera superficie de la placa superior, y espaciadas horizontalmente entre sí en los bordes laterales superiores de la misma, para introducirse en una superficie del terreno, y las púas están formadas, separadas y orientadas entre sí de manera que se logre el desplazamiento del material molido hacia abajo y radialmente hacia afuera; hacer avanzar las púas del dispositivo en la superficie del terreno; retraer las púas de la superficie del terreno; repetir el avance y la retracción hasta que se logre la condición de terreno deseada.

En una realización ejemplar, el avance de las púas crea cavidades en el lugar donde se avanzan las púas, y el método comprende además agregar relleno en las cavidades y avanzar y retraer el dispositivo repetidamente después de que se haya agregado el relleno. Las púas pueden ser huecas y cada una tiene una abertura en un extremo alejada de la placa de superficie, de modo que se puede agregar relleno a través de las púas y fuera de la abertura de cada púa al retraerse. Las púas pueden tener válvulas respectivas en los extremos abiertos, y el método comprende mantener las válvulas cerradas al avanzar el dispositivo y abrir las válvulas al retraerse, y agregar el relleno a través de las púas. Las púas también pueden tener placas de sacrificio respectivas en los extremos abiertos, y el método comprende asegurar las placas de sacrificio a las púas al avanzar el dispositivo y permitir que las placas de sacrificio se separen de las púas al retraerse, y agregar el relleno a través de las púas. El relleno puede ser uno o una combinación de piedra triturada, arena, agregados, grava, lechada, concreto, cal, cenizas volantes, materiales de desecho, pedazos de neumáticos, materiales reciclados y otras sustancias fluidas. El nivel de mejora del terreno logrado se puede medir mediante una monitorización de la presión descendente durante la penetración para determinar el grado de densificación.

15 Debe entenderse que la invención, tal como se describe a continuación, no se limita a los detalles de construcción y disposición de los componentes expuestos en la siguiente descripción o ilustraciones en los dibujos. La invención es susceptible de realizaciones alternativas y de ser puesta en práctica o llevada a cabo de diversas maneras. Específicamente, las dimensiones tal como se describen, y donde aparecen en los dibujos, son solo realizaciones ejemplares y pueden ser modificadas por los expertos en la técnica según lo justifiquen las condiciones.

20 Breve descripción de los dibujos

La Figura 1 es un dibujo que ilustra un sistema que emplea el dispositivo de la presente invención.

25 Las Figuras 2A y 2B son vistas en planta y perfil del dispositivo, respectivamente, que ilustran la configuración de las púas y la placa superior de acuerdo con una realización de la presente invención.

Las Figuras 3A y 3B son vistas en planta y perfil del dispositivo, respectivamente, que ilustran la configuración de las púas y la placa superior de acuerdo con otra realización de la presente invención.

30 Las Figuras 4A y 4B son vistas en planta y perfil del dispositivo, respectivamente, que ilustran la configuración de las púas y la placa superior de acuerdo con otra realización más de la presente invención.

35 Las Figuras 5A y 5B son vistas en planta y perfil, respectivamente, de una realización que muestra un bulbo expandido en la parte inferior de las púas.

Las Figuras 6A y 6B son vistas de perfil que muestran válvulas que se pueden colocar en la porción inferior de un solo púa.

40 La Figura 7 es una vista de perfil que muestra una tapa de sacrificio en la parte inferior de un solo púa.

La Figura 8 es una ilustración en perspectiva del dispositivo de la Figura 1 durante el accionamiento para lograr la densificación.

45 La Figura 9 es una ilustración que muestra cavidades u orificios formados por el dispositivo de la presente invención, después de retirar el dispositivo del terreno.

La Figura 10 es una ilustración que muestra una superficie del terreno cuando el dispositivo de la presente invención está tratando el suelo, e ilustra el asentamiento de la superficie que se produce cuando el suelo se densifica.

50 La Figura 11 es un gráfico que ilustra los resultados de resistencia de la punta de la prueba de penetración de cono ("CPT") en un sitio de arena importada después del tratamiento con un dispositivo de 6 pies (1.8288 m) de largo.

55 La Figura 12 es un gráfico que ilustra los resultados de la resistencia de la punta del CPT en un sitio de arena limosa natural después del tratamiento con un dispositivo de 6 pies (1.8288 m) de largo.

Las Figuras 13 y 14 son gráficos que ilustran los resultados de la resistencia de la punta del CPT en un sitio de arena importada y en un sitio de arena limosa natural, respectivamente, después del tratamiento con un dispositivo de 10 pies (3.048 m) de largo.

60 La Figura 15 es un gráfico que ilustra los resultados de la resistencia de la punta del CPT en un sitio de arena limosa natural después del tratamiento con un dispositivo de 20 pies (6.096 m) de largo.

65 La Figura 16 es un gráfico que ilustra los resultados de la resistencia de la punta del CPT dentro de la pisada de compactación de las instalaciones del dispositivo después del tratamiento con un dispositivo de 6 pies (1.8288 m) de largo.

La Figura 17 es un gráfico que ilustra los resultados de la resistencia de la punta del CPT después del tratamiento con un dispositivo de 6 pies (1.8288 m) de largo en ubicaciones a 2.25 pies (0.6858 m) de la pisada de compactación (entre ubicaciones de instalación).

- 5      Descripción detallada de la invención
- 10     De acuerdo con las figuras, la invención incluye un aparato y un método para mejorar la resistencia y la rigidez de los materiales subsuperficiales in situ, por ejemplo, suelo en una superficie de tierra, antes de la carga de edificios, losas, paredes, tanques, estructuras de transporte, obras industriales, y otras estructuras. El aparato incluye un dispositivo 15 compuesto por una serie de púas 11 orientadas verticalmente que se extienden hacia abajo y están fijadas a una placa 13 superior. El propósito de la placa 13 superior es mantener las púas 11 en su lugar. La placa 13 superior mantiene unidas las púas y no proporciona necesariamente densificación o confinamiento durante la densificación.
- 15     Como se muestra en las Figuras 1, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A y 4B, las púas 11 (incluidas las púas 19 centrales) se fijan a la placa 13 superior, con soldaduras u otros medios, para lograr una conexión de unión mecánica. Las púas 11 están espaciadas horizontalmente entre sí en la conexión de fijación en la placa 13 superior. En la Figura 2A, la realización de la placa 13 superior es cuadrada con unas dimensiones de aproximadamente 30 pulgadas (76.2 cm) en cada lado, y normalmente tiene un grosor de tres pulgadas (7.62 cm). La placa 13 superior puede estar hecha de acero. En otras 20    realizaciones, la placa 13 superior podría estar hecha de otros materiales tales como hierro, hormigón o materiales compuestos. Las dimensiones de la placa 13 superior se seleccionan como apropiadas para sujetar las púas 11 en una disposición vertical. En una realización alternativa, que se muestra en la Figura 3A, la placa 13 superior es rectangular con unas dimensiones de aproximadamente 30 pulgadas (76.2 cm) de ancho por aproximadamente 60 pulgadas (152.4 cm) de largo. Como se muestra en la realización de la Figura 4A, la placa 13 superior es rectangular con unas dimensiones de aproximadamente 30 pulgadas de ancho (76.2 cm) por aproximadamente 45 pulgadas (114.3 cm) de largo. Las dimensiones precisas de la placa 13 superior se seleccionan dependiendo de la disposición 25    de púas deseada.
- 30     Cada púa 11 se extiende verticalmente hacia abajo desde la placa 13 superior. Como se muestra en la realización que se muestra en las Figuras 1 y 2B (y se describe en los ejemplos a continuación), las púas 11 son típicamente de cinco pulgadas (12.7 cm) cuadradas en la parte inferior en transición a ocho pulgadas (20.32 cm) cuadradas en la parte superior, y se extienden una longitud de aproximadamente seis pies (1.8288 m) por debajo de la parte inferior de la placa 13 superior (un ángulo de conicidad de aproximadamente 2.4°). En esta realización, las púas 11 se afilan para facilitar el accionamiento y la extracción. La forma afilada también sirve para confinar el suelo verticalmente contra 35    levantamientos. El grado del ángulo de conicidad puede variar, pero se contempla que esté típicamente en el rango de 0 a 5°, y preferiblemente de 0.5° a 2.5°. Si bien estos rangos de ángulos tienen fines ilustrativos, se entiende que se podrían usar otros rangos de ángulos para lograr el desplazamiento del suelo hacia abajo y radialmente hacia afuera para rigidizar los límites verticales del suelo entre púas adyacentes durante el proceso de densificación.
- 40     Si bien son posibles otras dimensiones, la realización asociada con la Figura 3B (y descrita en los ejemplos a continuación) contempla púas 11 típicamente cuadradas de cuatro pulgadas (10.16 cm) en la parte inferior que pasan a ocho pulgadas (20.32 cm) cuadradas en la parte superior, y que se extienden una longitud de aproximadamente 10 pies (3.048 m) por debajo de la parte inferior de la placa 13 superior (un ángulo de conicidad de aproximadamente 1.9°). La realización asociada con la Figura 4B (y descrita en los ejemplos a continuación) contempla púas 11 típicamente de cuatro pulgadas (10.16 cm) cuadradas en la parte inferior (que es de 20 pies (6.096 m) por debajo de la placa superior) en transición a ocho pulgadas (20.32 cm) cuadrada a una distancia de 10 pies (3.048 m) por debajo de la placa superior y 8 pulgadas (20.32 cm) cuadradas restantes desde la altura media hasta la placa 13 superior (o 45    el estrechamiento puede ser consistente desde la parte inferior hasta la parte superior, con un cambio apropiado en geometría o ángulo de estrechamiento).
- 50     Las grandes proporciones de largo a ancho de cada púa 11 individual de la presente invención son importantes para garantizar una densificación adecuada a las profundidades de diseño para zapatas continuas (a diferencia de las profundidades de tratamiento poco profundas, como las necesarias para mejorar debajo de los pavimentos, como se enseña en la técnica anterior). Por ejemplo, las púas asociadas con las Figuras 2A y 2B (longitud de las púas de seis pies (1.8288 m) y una transición de cinco pulgadas (12.7 cm) de ancho en la parte inferior a ocho pulgadas (20.32 cm) de ancho en la parte superior tendrían una longitud de relación de ancho que va de 9 a 14.5 (medido desde el ancho superior y el ancho inferior, respectivamente). Las púas asociadas con las Figuras 3A y 3B (longitud de las púas de 10 pies (3.048 m) y transición de cuatro pulgadas (10.16 cm) de ancho en la parte inferior a ocho pulgadas (20.32 cm) de ancho en la parte superior) tendrían una relación de largo a ancho oscilando entre 15 y 30 (medido desde el ancho superior y el ancho inferior, respectivamente). Las púas asociadas con las Figuras 4A y 4B (longitud de las púas de 20 pies (6.096 m) y transición de cuatro pulgadas (10.16 cm) de ancho en la parte inferior a ocho pulgadas (20.32 cm) de ancho en la parte superior) tendrían una relación de largo a ancho oscilando entre 30 a 60 (medido desde el ancho superior y el ancho inferior, respectivamente).
- 55     En una realización alternativa, las púas pueden ser cilíndricas. En otra realización más, las púas 11 pueden ser afiladas o cilíndricas alternativamente. En otra realización, las púas 11 pueden tener un cabezal 18 inferior bulboso para una

densificación adicional, como se muestra en las Figuras 5A y 5B. En sección transversal, las púas 11 pueden ser circulares o pueden estar articuladas, tal como por ejemplo octagonales, hexagonales, cuadradas, triangulares u otra forma articulada o semiarticulada.

5 Las púas 11 normalmente están hechas de acero, hierro fundido, otro metal ferroso o materiales compuestos y normalmente son huecas (lo que contribuye a la naturaleza relativamente ligera del dispositivo). Las púas 11 y la placa 13 superior que forman el dispositivo 15 deben ser fuertes y ligeras para facilitar accionamiento. El dispositivo 15 se introduce en el terreno o el suelo mediante un aparato de accionamiento mecánico o un martillo 17, como se muestra en la Figura 1. En consecuencia, es importante que el dispositivo se construya de manera que sea relativamente ligero para facilitar el accionamiento. Los pesos típicos para el dispositivo 15 pueden variar de 1000 a 5000 libras (453.592 a 2267.962 kg). Esto contrasta con la técnica anterior, en particular con los dispositivos de "compactación dinámica profunda" discutidos anteriormente, que deben tener un gran peso para un funcionamiento adecuado.

10 Como se muestra en la Figura 1, el dispositivo 15 se introduce en el terreno usando el aparato 17 de accionamiento que puede incluir un martillo de pilotaje de alta frecuencia conectado a una máquina tal como una excavadora 16. En una realización, el martillo puede ser un martillo vibratorio usado típicamente para el accionado de pilote de hoja. En otra realización, el martillo puede ser un martillo de caída o un martillo neumático o diésel tales como los que se utilizan para accionar pilotes de desplazamiento accionados. También se contemplan otros dispositivos de impacto, vibratorios o no vibratorios.

15 20 La placa 13 superior puede incluir una placa de agarre (no mostrada) en la superficie de la misma que mira hacia el aparato 17 de accionamiento. La placa de agarre es de naturaleza convencional y permite unir la placa 13 superior al dispositivo 17 de accionamiento. El accionamiento de las púas 11 se realiza de forma suave, vibratoria o martilleante. Esto contrasta con los dispositivos de "compactación dinámica profunda" discutidos anteriormente que requieren dejar caer un dispositivo muy pesado desde una altura relativamente grande a los intervalos intermitentes requeridos para levantar pesos pesados.

25 30 Se puede utilizar opcionalmente un dispositivo sensor para medir el grado de densificación durante el proceso. Se puede unir un sensor 101 al dispositivo 17 de accionamiento por encima de la placa 13 superior del dispositivo 15 de multipúas (tal como, por ejemplo, en una ubicación en un trineo de martillo). El sensor permitiría la medición de la presión de "multitud" hacia abajo aplicada durante el proceso de densificación. El sensor podría consistir en un indicador de presión montado en las líneas hidráulicas de la plataforma, un indicador de tensión montado en el trineo del martillo o en el cable de tracción, o un pasador instrumentado que mide la fuerza de corte aplicada a una conexión. El sensor serviría como indicador de cuándo se ha alcanzado el nivel de densificación de diseño.

35 40 En otra realización, las púas 11 se utilizan como conductos para la colocación de relleno fluido, como lechada u otra sustancia fluida. En esta realización, las púas de las púas 11 pueden equiparse con válvulas mecánicas, tal como se muestra en las Figuras 6A y 6B, para evitar la intrusión de suelo hacia adentro debajo de las púas durante la penetración y para permitir el flujo de relleno hacia afuera a través de las púas durante la extracción. Los materiales de relleno pueden consistir en mezclas de fluidos como lechada, concreto y otros fluidos autoaglutinantes y endurecedores o pueden consistir en mezclas de arena, cemento, cenizas volantes y otras mezclas. Las válvulas pueden consistir en portales como los que se muestran en la Figura 6A, en las que una placa 22 plana está asegurada, por ejemplo, con un cable metálico o un perno en U 24 sobre un pasador 26 que se extiende entre las paredes de la púa 11. Las válvulas también pueden consistir en puertas mecánicas, como la válvula con bisagras que se muestra en la Figura 6B, que consta de una placa 22 plana unida de forma articulada al cuerpo de la púa 11 mediante una bisagra 28. La operación de cualquier válvula prevista permitiría que la válvula permaneciera cerrada (para evitar la intrusión de suelo) mientras las púas se insertan en la superficie del terreno (debido a la fuerza hacia arriba del terreno que mantiene la válvula/bisagra cerrada herméticamente contra el cuerpo de la púa) y a medida que se levantan las púas, el movimiento hacia abajo del material de relleno hará que la válvula se abra para permitir que el material de relleno fluya desde el interior de las púas. Opcionalmente, se pueden usar placas de sacrificio, tal como la placa 32 en la parte inferior de la púa 11 que se muestra en la Figura 7, en lugar de válvulas y funcionarían de la misma manera operativamente.

45 50 55 Como se mostrará posteriormente, el dispositivo 15 facilita la mejora del suelo a una profundidad mayor que la máxima extensión de las púas 11 en el suelo. Esto es significativo porque la invención proporciona un medio para tratar el suelo a profundidades mucho mayores que las proporcionadas por otros medios.

60 65 Un método de acuerdo con la invención implica accionar el dispositivo 15 y sus púas 11 en el terreno hasta una profundidad de mejora deseada. El accionamiento se lleva a cabo lo más rápido posible en un movimiento suave facilitado por energía vibratoria o de impacto como la que se logra al martillar. A continuación, el dispositivo se retrae desde el terreno hasta la superficie del terreno. Durante la retracción, las paredes laterales de los agujeros formados pueden colapsar si la matriz del suelo está muy suelta. Este colapso se manifiesta en el asentamiento de la superficie del terreno en el área de mejora del terreno por el dispositivo 15. El dispositivo 15 y sus púas 11 se pueden volver a insertar en el terreno a la profundidad deseada y luego retraerse una vez más. El proceso de penetración y retracción sirve para lograr la densificación mediante el desplazamiento del material del terreno hacia abajo y radialmente hacia afuera.

Para algunos perfiles de suelo, después de tratar el terreno con el dispositivo, el terreno puede "tensarse" y los agujeros formados por las púas 11 pueden permanecer abiertos. Opcionalmente, estos orificios pueden llenarse con material fluido, como, por ejemplo, piedra caliza triturada, arena, agregados, grava, productos de desecho granulados, virutas de neumáticos, hormigón, lechada, cenizas volantes, cal, cemento, materiales reciclados (hormigón, vidrio, etc.), u otro material fluido. El propósito del relleno es evitar que los orificios se derrumben en un momento posterior. El área de mejora puede entonces mejorarse una vez más volviendo a insertar el dispositivo 15 y sus púas 11, o puede considerarse que está completamente tratada, dependiendo de los requisitos de diseño.

10 La presencia de la pluralidad de púas 11 verticales cumple una función importante para el dispositivo 15. A medida que se inserta cada púa 11, el suelo en el área de las púas 11 se desplaza tanto hacia abajo como radialmente hacia afuera. El desplazamiento radial hacia afuera se llama expansión de la cavidad. Durante la inserción de la púa 11, la expansión de la cavidad hace que el suelo alrededor de la púa 11 se desplace hacia fuera y se compacte. El grado de densificación depende de la capacidad del suelo para drenar y compactar, del grado de expansión de la cavidad y de las condiciones de contorno que rodean la cavidad.

Cuanto más rígido sea el contorno que rodea la cavidad expandida, mayor será la densificación. Por el contrario, para un dispositivo unitario o de una sola púa, es decir, sondas simples, el contorno de una cavidad expandida en cualquier radio desde el borde de la cavidad consiste en suelo que puede deformarse aún más hacia afuera de la púa única. 20 Este contorno no rígido disminuye la cantidad de densificación potencial porque proporciona poca restricción lateral. Para la presente invención, el contorno de la cavidad expandida alrededor de cada púa 11 se caracteriza en parte por la presencia y su interacción con las púas 11 adyacentes, que también provocan la expansión de la cavidad. Por lo tanto, la expansión de la cavidad de cada púa 11 está contenida por una cavidad de expansión adyacente que se expande en la dirección opuesta. Estas fuerzas iguales y opuestas forman efectivamente una condición límite vertical rígida o pared lateral durante la inserción y expansión de la cavidad. El resultado es un método de mejoramiento del suelo muy eficiente que conduce a una mayor densificación. Esto se debe a que las púas están separadas entre sí en todos los lugares, incluida la separación horizontal entre sí en las respectivas ubicaciones de unión en la placa superior.

30 El método descrito en este documento (y en los ejemplos a continuación) contempla diversas etapas que incluyen varias pasadas y luego el llenado; llenado después de cada pasada; nunca llenando suelos que se derrumban; apisonamiento superficial posterior; llenado con arena; llenado con piedra triturada; llenado con otros agregados; llenado con grava; llenado con medios granulares como vidrio, materiales reciclados u otros; llenado con virutas de neumáticos; llenado con un medio fluido como lechada u hormigón; llenado con mezclas de arena, agua, cenizas volantes y cemento; o utilizando dos púas, tres púas, cuatro púas, cinco púas o púas adicionales, según corresponda al sitio.

Habiendo descrito en general la invención, se describe más específicamente mediante ilustración en los siguientes ejemplos específicos que describen diferentes realizaciones con diferentes números y formas respectivas de púas empleadas.

#### 40 Ejemplo I

En mayo de 2009, se realizaron pruebas utilizando una primera realización de la invención en un sitio de pruebas de Iowa. El dispositivo se utilizó para estabilizar arena natural, arena limosa natural y arena de relleno importada en el sitio. El dispositivo 15 de la invención fue avanzado en un total de 36 posiciones. El dispositivo 15 se avanzó a una profundidad de 6 pies (1.8288) en todos los casos. Este programa de prueba se utilizó para evaluar las mejoras cuantitativas utilizando el dispositivo 15, en comparación con la compactación superficial con una placa vibratoria aplicada en la superficie del suelo.

#### 50 Instalaciones

El dispositivo usado en este ejemplo I se fabricó para reflejar las características que se muestran en las Figuras 2A y 2B. De acuerdo con el dispositivo que se muestra en las figuras, se soldaron cinco púas 11 de 6 pies (1.8288 m) de largo a una placa 13 superior. Las púas 11 se fabricaron utilizando una forma de sección transversal cuadrada que se estrecha hacia arriba desde un ancho de 5 pulgadas (12.7 cm) en la parte inferior de las púas, hasta un ancho de 8 pulgadas (20.32 cm) en la parte superior de las púas 11. Las púas 11 se soldaron a una placa 13 superior cuadrada de 30 pulgadas (76.2 cm). Las púas 11 en el perímetro o periferia de la placa 13 estaban orientadas 45 grados con respecto a un púa 19 central para reducir el potencial de taponamiento de tierra/arena entre púas adyacentes. Una placa de agarre (no mostrada), como se discutió anteriormente, se unió a la superficie superior de la placa 13. Se utilizó un martillo de alta frecuencia que se utiliza a menudo para accionar pilotes de lámina para introducir el dispositivo 15 en el suelo. El martillo se fijó al dispositivo 15 sujetándolo a la placa de sujeción.

65 El sitio de prueba contenía aproximadamente 4 pies (1.2192 m) de arena limosa natural sobre arena limpia natural. Los valores N de la prueba de penetración estándar ("SPT") en los 10 pies superiores (3.048 m) generalmente oscilaron entre 5 y 10 golpes por pie (0.3048 m). Se observó agua subterránea a una profundidad de 6 a 8 pies (1.8288 a 2.4384 m) durante las mediciones posteriores a la instalación de la prueba de penetración de cono ("CPT").

5 Antes de la prueba, en un área de aproximadamente 20 pies por 20 pies (6.096 m por 6.096 m), los 4 pies superiores (1.2192 m) de sobrecarga de arena limosa se quitaron y se reemplazaron con arena sin compactar. Las pruebas se realizaron tanto en esta área como en el exterior de esta área donde la sobrecarga de arena limosa permaneció en su lugar. Las áreas de prueba fueron mejoradas por el dispositivo 15.

10 Haciendo referencia a las Figuras 8 a 10, en 9 ubicaciones (ubicaciones 1-9) dentro del área de arena, el dispositivo 15 y las púas 11 se avanzaron y se retrajeron tres veces en la misma ubicación. Cada ciclo de penetración y extracción se denomina "paso". Luego se agregó arena para llenar el área deprimida hasta la superficie del terreno adyacente. Este proceso de tres avances y retracciones (tres pasadas) seguido de llenado se repitió tres veces más para un total de doce pasadas por ubicación. Las primeras dos veces se agregó aproximadamente una yarda cúbica (0.7646 metros cúbicos) de arena. Después de eso, se necesitaron cantidades menores de arena a medida que se densificaba el terreno G. Por lo general, tomó 10 minutos para las 12 pasadas para cada ubicación. Las cavidades individuales u orificios H permanecieron abiertos después de seis pasadas (ver figura 9).

15 20 Para las segundas 9 ubicaciones (ubicaciones 10 a 18) en un área que contiene arena limosa natural sobre arena natural, se usó el mismo procedimiento que con las primeras 9 ubicaciones (ubicaciones 1 a 9), aunque se necesitó menos arena para llenar las áreas deprimidas. Se supone que esto se debe a que los 4 pies superiores de arena (1.292 m) de relleno están más sueltos en las primeras 9 ubicaciones (ubicaciones 1 a 9) que en las segundas 9 ubicaciones (ubicaciones 10 a 18).

25 30 Para aumentar la velocidad de instalación de 10 minutos a 3 minutos por ubicación, se cambió el procedimiento, como se describe a continuación. En las terceras 9 ubicaciones (ubicaciones 19 a 27) dentro del área de arena importada, se realizaron un total de tres pasadas en cada ubicación en comparación con los 12 realizados en las primeras 18 ubicaciones (ubicaciones 1 a 9 y ubicaciones 10 a 18). Se agregó piedra triturada para llenar el área de la depresión después de cada pase. Este mismo proceso se llevó a cabo en una cuarta parte de 9 ubicaciones (ubicaciones 28 a 36) en el área de suelo de arena limosa natural.

35 40 Para brindar una comparación con las cuatro instalaciones descritas anteriormente, dentro de áreas de aproximadamente 10 pies por 10 pies (3.048 m por 3.048 m) tanto en el área de arena importada como en el área de sobrecarga de arena limosa natural, la superficie del terreno se compactó con un compactador de placa vibratorio convencional aplicado a la superficie del terreno. También hubo sitios de prueba tanto en el área de arena como en el área de sobrecarga de arena limosa natural sin mejora de ningún tipo (con la placa vibratoria o con la presente invención) para establecer condiciones iniciales sin mejora (referencia).

### Pruebas CPT

45 50 Se realizaron pruebas de penetración de cono ("CPT") en las 36 ubicaciones tratadas descritas anteriormente (y los sitios de la placa vibratoria y los sitios de referencia) después de las instalaciones para cuantificar las mejoras que se lograron. Los resultados del CPT se muestran en las Figuras 11 y 12. La Figura 11 ilustra las resistencias de punta de CPT en el sitio de arena importada. La Figura 12 ilustra las resistencias de la punta del CPT en el sitio natural de arena limosa.

55 60 Para el sitio de arena importada (Figura 11), las lecturas de la línea base (sin mejora) muestran que las resistencias de la punta del CPT son de aproximadamente 20 toneladas por pie cuadrado ( $1915 \text{ kNm}^{-2}$ ) ("tsf") en la zona del relleno de arena importada (profundidad de 4 pies) (1.292 m) y aproximadamente 50 tsf ( $4788 \text{ kNm}^{-2}$ ) arriba. La compactación de la superficie con placa vibratoria solo mostró una mejora a una profundidad de aproximadamente 5 pies (1.524 m), aumentando las resistencias de la punta del CPT de aproximadamente 20 tsf ( $1915 \text{ kNm}^{-2}$ ) (línea base) a 50 tsf ( $4788 \text{ kNm}^{-2}$ ) (después del tratamiento con placa vibratoria solamente). El tratamiento con tres (3) pasadas del dispositivo y el relleno con grava de piedra triturada mejoró el suelo hasta una profundidad de unos 17 pies (8.1816 m); las resistencias de las puntas de CPT aumentaron hasta 250 tsf ( $23940 \text{ kNm}^{-2}$ ) a una profundidad de 3 pies (0.9144 m) y osciló entre aproximadamente 50 tsf ( $4788 \text{ kNm}^{-2}$ ) y 150 tsf ( $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) abajo. El tratamiento con 12 pasadas y el relleno con arena mejoraron el suelo a una profundidad de aproximadamente 14 pies (4.2672 m); las resistencias de la punta CPT generalmente alcanzaron un máximo de aproximadamente 340 tsf ( $32559 \text{ kNm}^{-2}$ ) a una profundidad de 3 pies (0.9144 m) y osciló entre 70 tsf ( $6703 \text{ kNm}^{-2}$ ) y 200 tsf ( $19152 \text{ kNm}^{-2}$ ) abajo.

65 70 Para el sitio de arena limosa natural (Figura 12), las resistencias de punta de CPT de referencia oscilaron entre 20 tsf y 80 tsf ( $1915 \text{ kNm}^{-2}$  y  $7661 \text{ kNm}^{-2}$ ). La compactación superficial con placa vibratoria solo mostró una mejora a una profundidad de aproximadamente de 3 a 5 pies (0.9144 m a 1.524 m), aumentando las resistencias de la punta del CPT hasta 175 tsf ( $16758 \text{ kNm}^{-2}$ ) a una profundidad de 1 pie (0.3048 m) y hasta 50 tsf ( $4788 \text{ kNm}^{-2}$ ) abajo. El tratamiento del sitio con 3 pasadas rellenado con grava de piedra mejoró el suelo a una profundidad de unos 13 pies (3.9624 m); las resistencias de las puntas de CPT aumentaron a 275 tsf ( $26334 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades de 4 a 7 pies (1.2192 a 2.1336 m) y osciló entre 70 tsf y 150 tsf ( $6703$  a  $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) abajo. El tratamiento del sitio con 12 pasadas rellenadas con arena mejoró el sitio a una profundidad de aproximadamente 11 pies (3.3528 m); las resistencias de las puntas de CPT aumentaron a más de 300 tsf ( $28728 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades de 3 a 5 pies (0.9114 a 1.524 m) y varió de 70 a 150 tsf ( $6703$  a  $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) abajo.

La mejora del suelo utilizando el dispositivo de la presente invención aplicado tanto al relleno de arena importada como a la arena limosa natural sobre sitios de arena limpia mostró aumentos de 5 a 7 veces en las resistencias de punta de CPT sobre la profundidad de penetración de las púas. Los suelos por debajo de la penetración máxima de las púas mostraron aumentos de 1.5 a 3 veces en las resistencias de punta de CPT a profundidades del doble del ancho de la placa superior que se extendía por debajo de la profundidad máxima de penetración de las púas.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y una comparación de los tiempos de instalación de los dos procedimientos, parece que el tratamiento con tres pasadas logra casi los mismos resultados que el tratamiento con 12 pasadas y, por lo tanto, se considera que es más eficiente.

#### Ejemplo II

En julio de 2009, se realizaron instalaciones y pruebas adicionales en el sitio de pruebas de Iowa como se describe en el ejemplo I anterior. Se hizo avanzar una realización alternativa del dispositivo 15 en un total de 22 ubicaciones, como se describe a continuación. El dispositivo se avanzó a una profundidad de 10 pies (3.048 m) en todos los casos.

#### Instalaciones

La realización utilizada en este ejemplo II se muestra en las Figuras 3A y 3B y es un dispositivo que tiene once púas 11 individuales unidas a una placa 13 superior de aproximadamente 30 pulgadas por 60 pulgadas (76.2 cm por 152.4 cm), con ocho púas 11 espaciadas entre sí a lo largo de la periferia de la placa 13 superior y tres púas centrales 19 separadas entre sí en una región interior de la placa 13 superior. Como en el ejemplo anterior, se soldó una placa de agarre (que no se muestra) a la placa superior, lo que permitió su uso con un martillo vibratorio (entre otros). Cada una de las púas tenía 10 pies (3.048 m) de largo, con un fondo cuadrado de 4 pulgadas por 4 pulgadas (10.16 cm por 10.16 cm) en transición a una parte superior cuadrada de 8 pulgadas por 8 pulgadas (20.32 cm por 20.32 cm) donde se conectaron a la placa 13 superior. Las púas 11 perimetrales o periféricas se orientaron 45 grados con respecto a las púas 19 centrales para reducir el potencial de taponamiento de suelo/arena entre púas 11 adyacentes (incluidas las púas 19 centrales).

Las instalaciones con la realización de este ejemplo incluyeron cuatro pasadas (insertar púas, luego retraer y llenar agujeros en el área hundida) y 12 pasadas en el sitio de arena importada, y cuatro pasadas y seis pasadas en el sitio de arena limosa natural. Para las instalaciones que utilizan la realización de este ejemplo, se utilizó relleno de arena en todos los casos. El área hundida se llenó con alrededor de 5 a 7 yardas cúbicas de arena para cada ubicación. El tratamiento tomó alrededor de 2 minutos por pasada. Después de completar las pasadas, la superficie del terreno se compactó con una placa vibratoria.

#### Pruebas CPT

Se realizaron pruebas de CPT dentro de la pisada del área mejorada para cuantificar la mejora que se logró. También se realizaron lecturas de referencia en áreas no tratadas.

En las Figuras 13 y 14 se presenta un resumen de los resultados de la CPT realizados. La Figura 13 muestra las resistencias de punta de CPT en el sitio de arena importada y la Figura 14 muestra las resistencias de punta de CPT para el sitio de arena limosa natural.

Para el sitio de arena importada (Figura 13), las resistencias de punta de CPT de referencia generalmente oscilaron entre 50 tsf y 100 tsf ( $4788 \text{ kNm}^2$  y  $9576 \text{ kNm}^2$ ) a lo largo de los 15 pies superiores (4.572 m) del perfil del suelo. Despues del tratamiento con cuatro pasadas, las resistencias de la punta de CPT aumentaron hasta aproximadamente de 170 tsf ( $16279 \text{ kNm}^2$ ) a una profundidad de 5 pies (1.524 m), y osciló entre 50 tsf y 150 tsf ( $4788 \text{ kNm}^2$  y  $14364 \text{ kNm}^2$ ) de 5 pies a 10 pies (1.524 m a 3.048 m). Por debajo de una profundidad de 10 pies (3.048 m), la resistencia de la punta del CPT osciló entre aproximadamente 30 tsf y 120 tsf ( $2872 \text{ kNm}^2$  y  $11491 \text{ kNm}^2$ ). Despues del tratamiento con 12 pasadas, las resistencias de la punta de CPT mostraron una mejora sustancialmente mayor; las resistencias de punta aumentaron a valores de hasta 240 tsf ( $22983 \text{ kNm}^2$ ) a profundidades de 5 pies y 7 pies (1.524 m a 2.1336 m); y valores que oscilan generalmente entre 100 tsf y 150 tsf ( $9576 \text{ kNm}^2$  y  $14364 \text{ kNm}^2$ ) de 7 pies a 13 pies (2.1336 m a 3.9624 m) que parecía ser la profundidad de la mejora del suelo.

Para el sitio de arena limosa natural (Figura 14), las resistencias de punta de CPT de referencia generalmente oscilaron entre 40 tsf y 70 tsf ( $3830 \text{ kNm}^2$  y  $6703 \text{ kNm}^2$ ) a una profundidad de 10 pies (3.048 m) y generalmente osciló entre 60 tsf y 110 tsf ( $57446 \text{ kNm}^2$  y  $10534 \text{ kNm}^2$ ) de 10 a 15 pies (3.048 m a 4.572 m). Despues del tratamiento con cuatro pasadas, los valores de resistencia de la punta del CPT aumentaron a valores de hasta 100 tsf ( $9576 \text{ kNm}^2$ ) en los 10 pies superiores (3.048 m) y superando los 150 tsf ( $14364 \text{ kNm}^2$ ) de 10 pies a 12 pies (3.048 m a 3.6576 m). Las resistencias de punta oscilaron entre 100 tsf y 150 tsf ( $9576 \text{ kNm}^2$  y  $14364 \text{ kNm}^2$ ) desde profundidades de 12 pies a 15 pies (3.6576 m a 4.572 m). Despues del tratamiento con seis pasadas, las resistencias de la punta de CPT mostraron una mejora sustancial con valores de resistencia de la punta de hasta 270 tsf ( $25855 \text{ kNm}^2$ ) a profundidades

de 10 pies (3.048 m) y que oscilan entre 100 tsf y 180 tsf ( $9576 \text{ kNm}^{-2}$  y  $17237 \text{ kNm}^{-2}$ ) de 10 pies a 15 pies (3.048 m a 4.572 m).

- 5 Los resultados de las pruebas realizadas después de las instalaciones con el dispositivo 15 de 10 pies (3.048 m) de largo mostraron mejoras significativas en toda la profundidad de penetración del dispositivo y más mejoras en el suelo hasta aproximadamente el doble del ancho de la placa (13) superior del dispositivo que se extiende por debajo de la profundidad de penetración máxima. El grado de mejora del suelo aumenta con el número de pasadas.
- 10 El dispositivo se fabricó para aumentar la longitud de las púas a 20 pies (6.096 m) para una realización separada, como se describe a continuación.

#### Ejemplo III

- 15 En noviembre de 2009, se realizaron pruebas adicionales en el sitio de pruebas de Iowa como se describe en el ejemplo I anterior. Se adelantó una nueva realización de la invención en un total de 10 ubicaciones, como se describe a continuación. El dispositivo 15 se avanzó a una profundidad de 20 pies (6.096 m) en todos los casos, a menos que se encontrara con un rechazo. La intención de este programa de prueba era evaluar las mejoras cuantitativas utilizando la nueva realización.

#### 20 Instalaciones

- 25 La nueva realización en este ejemplo III era un dispositivo 15 que incluía ocho púas 11 individuales unidos a una placa 13 superior de aproximadamente 30 pulgadas por 45 pulgadas (76.2 cm por 114.3 cm) como se muestra en las Figuras 4A y 4B. Las púas 11 individuales tenían cada una 20 pies (6.096 m) de largo, con un fondo cuadrado de 4 pulgadas por 4 pulgadas (10.16 cm por 10.16 cm) en transición a una parte superior cuadrada de 8 pulgadas por 8 pulgadas (20.32 cm por 20.32 cm) donde se conectan a la placa 13 superior. La transición se realizó aproximadamente a la mitad de la longitud de las púas. Se soldó una placa de agarre a la placa superior, lo que permitió su uso con un martillo vibratorio.

- 30 Para todas las realizaciones, las púas 11 perimetrales se orientaron 45 grados con respecto a las púas 19 centrales para reducir el potencial de taponamiento de suelo/arena entre las púas 11 adyacentes.

- 35 Las pruebas se realizaron en el área que se caracterizó por arena limosa natural sobre arena limpia natural. Los resultados discutidos a continuación se basaron en tratamientos que consistían de cuatro pasadas y una pasada.

- 40 Durante la instalación en las ubicaciones 1 a 4, se notó una depresión significativa en la superficie, como lo demuestra la cantidad de relleno que se usó. Además, se observaron una serie de grietas de tensión radial alrededor de esta área. Las primeras grietas se observaron a unos 8 pies (2.4384 m) del centro de la instalación. En el momento de la finalización, las grietas más lejanas estaban a unos 18 pies (5.4864 m) del centro, lo que representa un área circular afectada con un diámetro de unos 36 pies (10.9728 m).

La compactación de la superficie se realizó después de las instalaciones con la realización de este ejemplo y antes de la prueba CPT.

#### 45 Pruebas CPT

- 50 Se realizaron pruebas de CPT en las ubicaciones evaluadas para cuantificar la mejora que se logró. El primer intento de CPT en el centro de las cuatro instalaciones con las 8 púas encontró rechazo a una profundidad de 5 pies (1.524 m). El siguiente intento de CPT encontró rechazo a una profundidad de 10 pies (3.048 m).

- 55 Se agregaron pruebas CPT adicionales en el centro de diferentes ubicaciones en un intento de cuantificar las mejoras del suelo. Los resultados del CPT se presentan en la Figura 15.

- 60 Las lecturas de referencia de CPT mostraron resistencias de púa de aproximadamente 20 tsf ( $11915 \text{ kNm}^{-2}$ ) a una profundidad de 5 pies (1.524 m), aproximadamente 50 tsf a 100 tsf ( $4788 \text{ kNm}^{-2}$  hasta  $9576 \text{ kNm}^{-2}$ ) de 5 pies a 20 pies (1.524 m a 6.096 m), y aproximadamente 70 tsf a 150 tsf ( $6703 \text{ kNm}^{-2}$  a  $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) de 20 pies a 30 pies (3.096 m a 9.144 m). Después del tratamiento con solo una pasada, los valores de resistencia de la punta del CPT aumentaron con la profundidad desde alrededor de 25 tsf ( $2394 \text{ kNm}^{-2}$ ) a un pie (0.3048 m) a 200 tsf ( $19152 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades de 10 a 15 pies (3.048 m a 4.572 m). Las resistencias de punta fueron superiores a 300 tsf ( $28728 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades de 15 pies a 20 pies (4.572 m a 6.096 m) y luego volvió a disminuir a las lecturas de referencia a unos 25 pies (7.62 m). Después del tratamiento con cuatro pasadas, se produjo una mejora aún mayor con resistencias de punta de CPT que aumentaron a valores superiores a 400 tsf ( $38304 \text{ kNm}^{-2}$ ) a una profundidad de 20 pies (6.096 m) a cuya profundidad ocurrió el rechazo a empujar.

- 65 Los resultados de la prueba mostraron una mejora significativa del suelo a lo largo de la profundidad de instalación y una mejora sustancial a una profundidad de aproximadamente el doble del ancho de la placa 13 superior por debajo

del fondo de la profundidad máxima de penetración de 20 pies (6.096 m). Se produjo una mayor mejora del suelo con el aumento del número de pasadas.

#### Ejemplo IV

En enero de 2010, se realizaron instalaciones en un sitio ubicado en Oklahoma. El dispositivo se utilizó para tratar el suelo para el soporte de un gran tanque de almacenamiento de acero. El espacio entre las ubicaciones de instalación individuales fue de 7 pies (2.1336 m) en el centro. El diseño de esta realización se basó en resultados de pruebas anteriores, como se describe con referencia a los ejemplos anteriores y utilizando la geometría que se muestra en las Figuras 2A y 2B. El programa de verificación de campo consistió en realizar pruebas de CPT antes y después de las instalaciones. Las pruebas incluyeron realizar lecturas de referencia en áreas no tratadas, empujar el CPT en las ubicaciones de compactación y empujar el CPT en ubicaciones entre las ubicaciones de compactación. El objetivo de este programa de ensayos fue cuantificar la mejora en el suelo matriz mediante la verificación de la densificación obtenida después de realizadas las instalaciones, mediante el CPT.

#### Instalaciones

El dispositivo 15 utilizado fue similar al descrito anteriormente con referencia al ejemplo I y mostrado en las Figuras 2A y 2B.

Las perforaciones realizadas en el sitio antes de que se hicieran las instalaciones indican la presencia de arena suelta a medianamente densa dentro de la zona de refuerzo. La arena era de grano fino con un contenido de partículas finas de aproximadamente menos del 5 %. No se encontró agua subterránea.

El procedimiento general consistió en penetrar las púas en toda su longitud o en una porción del largo de las púas, seguido de retracción y relleno con arena nativa. Cada pasada tomó aproximadamente ½ minuto a 1 minuto para lograrlo. Cada conjunto de 3 pasadas generalmente tomó alrededor de 4 minutos. El dispositivo a veces lograba una profundidad de penetración de solo 1 a 4 pies (0.3048 m a 1.2192 m) durante la tercera pasada. Se utilizó arena fina para llenar las cavidades en todas las pasadas. Las instalaciones procedieron de un borde del tanque al otro.

Se observaron aproximadamente 3 a 4 pulgadas (7.62 cm a 10.16 cm) de levantamiento del terreno durante la instalación inicial en la primera pasada. También se observaron grietas radiales durante la primera pasada que se extendían hasta 5 pies (1.524 m) desde el borde de las instalaciones. Las cavidades formadas por las púas permanecieron abiertas después de cada pasada. Esto fue ayudado en parte por la humedad observada en la arena.

Durante la primera pasada, aproximadamente 2 yardas cúbicas (1.529 m<sup>3</sup>) de arena se añadió. Después de eso, se necesitaron cantidades menores de arena.

Se dispuso un total de ocho lugares de prueba en el campo para realizar las pruebas de verificación de la instalación. Las ubicaciones del sitio de prueba estaban en la vecindad general de las perforaciones iniciales realizadas antes de la construcción. Las pruebas se realizaron en los lugares de instalación y entre instalaciones adyacentes. Se realizó un CPT fuera del perímetro del tanque para que sirviera como lectura de referencia.

En todas las ubicaciones del sitio de prueba, excepto la ubicación del sitio de prueba número 8, la superficie del suelo se compactó con tres pasadas de un rodillo compactador vibratorio después de las instalaciones.

#### Pruebas CPT

La Figura 16 presenta los resultados de las lecturas de referencia de CPT y las resistencias de las puntas de CPT en los lugares de instalación. Las resistencias de punta de CPT de referencia generalmente oscilaron entre aproximadamente 50 tsf y 100 tsf (4788 kNm<sup>-2</sup> hasta 9576 kNm<sup>-2</sup>) con una resistencia de punta promedio de alrededor de 70 tsf (6703 kNm<sup>-2</sup>) entre profundidades de uno a 14 pies (4.2672 m) por debajo del nivel del suelo.

Las resistencias de la punta del CPT dentro del espacio ocupado por las instalaciones del dispositivo también se muestran en la Figura 16. Se observaron mejoras significativas tanto en la zona reforzada como debajo de la parte inferior de las púas a una profundidad de aproximadamente 13 pies (3.9624 m) por debajo del nivel del suelo. Después del tratamiento con una pasada, las resistencias de la punta del CPT se mantuvieron cerca de las lecturas de referencia hasta una profundidad de aproximadamente 5 pies (1.524 m), pero luego aumentaron a valores superiores a 150 tsf (14364 kNm<sup>-2</sup>) entre profundidades de 6 pies y 9 pies (1.8288 m y 2.7432 m). Las resistencias de punta oscilaron entre 100 tsf y 150 tsf (9576 kNm<sup>-2</sup> y 14364 kNm<sup>-2</sup>) entre profundidades de 9 pies y 13 pies (2.7432 m y 3.9624 m) bajo el nivel del suelo. Después del tratamiento con tres pasadas, las resistencias de la punta del CPT en los 5 pies superiores (1.524 m) aumentaron y excedieron valores de hasta 250 tsf (23940 kNm<sup>-2</sup>) y aumentó a valores que oscilan entre 130 tsf y 300 tsf (12449 kNm<sup>-2</sup> y 28728 kNm<sup>-2</sup>) entre una profundidad de 5 pies y 13 pies (1.524 m y 3.9624 m). No se observó un aumento en la resistencia de la punta en los 2 pies superiores (0.6096 m), probablemente debido a que el confinamiento de la superficie es insuficiente para la densificación.

La Figura 17 presenta los resultados de la resistencia de punta de CPT obtenidos entre las ubicaciones de instalación. Los sondeos CPT avanzaron en el punto medio entre las ubicaciones de instalación a 3.5 pies (1.0668 m) del centro de los elementos adyacentes o 2.25 pies (0.6858 m) desde el borde de las ubicaciones de instalación. Los resultados indican una mejora en la densidad evidenciada por un aumento en la resistencia de la punta desde la instalación.

- 5 Después del tratamiento con una pasada, los valores de resistencia de la punta aumentan a valores que oscilan entre 100 tsf y 150 tsf ( $9576 \text{ kNm}^{-2}$  y  $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades que oscilan entre 2 y 10 pies (0.6096 m y 3.048 m). Despues del tratamiento con 3 pasadas, las resistencias de punta aumentan a valores superiores a 150 tsf ( $14364 \text{ kNm}^{-2}$ ) a profundidades que oscilan entre 4 y 10 pies (1.2192 m y 3.048 m) por debajo del nivel del suelo.
- 10 Las instalaciones con el dispositivo de este ejemplo aumentan la resistencia de la punta dentro de la zona reforzada y debajo de la zona reforzada, extendiéndose a una profundidad de hasta 13 pies (3.9624 m), 7 pies (2.1336 m) por debajo de la parte inferior de la profundidad máxima de la púa. Esta profundidad de mejora es mayor que el doble del ancho de la placa 13 superior.
- 15 En arena limpia, el dispositivo aumenta los valores de resistencia de la punta entre puntos de compactación adyacentes. El aumento es, en promedio, dos veces la resistencia de la punta para condiciones no reforzadas en un espacio de instalación de 7 pies (2.1336 m) en el centro.
- 20 En arena limpia, el dispositivo aumenta los valores de resistencia de la punta dentro de la pisada del tratamiento hasta aproximadamente 250 tsf ( $23940 \text{ kNm}^{-2}$ ) o 2 a 4 veces la resistencia de la punta para condiciones no reforzadas. La mejora dentro y debajo de la zona reforzada, y entre instalaciones adyacentes se produce a partir de la penetración del primer dispositivo y aumenta con las pasadas sucesivas.

## REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo (15) para mejorar el terreno del suelo antes de cargar una estructura, que comprende:
  - 5 (a) una placa (13) superior que tiene una primera superficie configurada para tener un dispositivo de accionamiento unido a ella para proporcionar impacto sobre ella;
  - 10 (b) una pluralidad de púas (11) que se extienden verticalmente unidas rígidamente a una segunda superficie de la placa superior opuesta a la primera superficie de la placa superior, y espaciadas horizontalmente entre sí en los bordes laterales superiores de la misma, para ser clavadas en una superficie del suelo en respuesta al impacto proporcionado por el dispositivo de accionamiento; y
  - 15 (c) las púas (11) están conformadas, espaciadas y orientadas entre sí de manera que se logre el desplazamiento del material del terreno hacia abajo y radialmente hacia afuera, en el que las púas (11) se estrechan en un ángulo en el rango de 0.5° a 5°, y en el que las púas (11) tienen una relación de largo a ancho de 9 a 14.5, 15 a 30 o 30 a 60.
2. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) se estrechan para ser más estrechas en un extremo alejado de la placa (13) superior que en la unión a la segunda superficie de la placa (13) superior.
- 20 3. El dispositivo (15) de la reivindicación 2, en el que las púas (11) se estrechan en un ángulo en el rango de 0.5° a 2.5°.
- 25 4. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) tienen una longitud en el rango de 0.6096 metros a 9.144 metros (2 - 30 pies).
5. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) son circulares o articuladas en sección transversal.
- 30 6. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) son sustancialmente planas en un extremo alejado de la placa (13) superior o tienen una forma bulbosa en un extremo alejado de la placa (13) superior.
7. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) están hechas de material feroso, acero o materiales compuestos.
- 35 8. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que las púas (11) son huecas.
9. El dispositivo (15) de la reivindicación 8, en el que las púas (11) tienen aberturas en los extremos alejados de la placa (13) superior y válvulas respectivas en las aberturas para restringir la entrada de suelo durante el avance y para permitir el paso de material fluido hacia afuera durante la retracción.
- 40 10. El dispositivo (15) de la reivindicación 8, en el que cada una de las púas (11) tiene aberturas en los extremos alejados de la placa (13) superior, y respectivas placas (32) de sacrificio en las aberturas.
11. El dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que la pluralidad de púas (11) ya sea:
  - 45 (a) comprende cinco púas (11) espaciadas horizontalmente entre sí, con cuatro púas (11) perimetrales separadas alrededor de la periferia de la placa (13) superior y rodeando una púa (19) ubicada en el centro; o
  - (b) comprende once púas (11) espaciadas horizontalmente entre sí, con ocho púas (11) perimetrales espaciadas alrededor de la periferia de la placa (13) superior y rodeando tres púas (19) ubicadas en el centro.
- 50 12. El dispositivo (15) de la reivindicación 11, en el que las cuatro púas perimetrales, o las ocho púas perimetrales, están orientadas a 45° sobre su eje vertical con respecto a las púas (19) ubicadas en el centro.
13. Un método para mejorar el terreno del suelo antes de cargar una estructura, que comprende:
  - 55 (a) proporcionar un dispositivo (15) de una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, 11 o 12;
  - (b) hacer avanzar las púas (11) del dispositivo en la superficie del suelo;
  - 60 (c) retraer las púas (11) de la superficie del suelo; y
  - (d) repetir el avance y retroceso hasta que se logre una condición de suelo deseada.
- 65 14. El método de la reivindicación 13, en el que el dispositivo (15) es un dispositivo de la reivindicación 1, en el que el avance de las púas (11) crea cavidades en el lugar en el que avanzan las púas (11), y que además comprende agregar relleno en las cavidades y avanzar y retraer el dispositivo repetidamente después de agregar el relleno.

15. El método de la reivindicación 14, en el que las púas (11) son huecas y cada una tiene una abertura en un extremo alejado de la placa (13) de superficie, y que además comprende agregar el relleno a través de las púas (11) y fuera de la abertura de cada púa (11) a la retracción de las mismas.

- 5           16. El método de la reivindicación 15, en el que:
- (a) las púas (11) tienen válvulas respectivas en los extremos abiertos, y comprenden mantener las válvulas cerradas al avanzar el dispositivo (15) y abrir las válvulas al retraerse, y agregar el relleno a través de las púas (11); o
- 10          (b) las púas (11) tienen respectivas placas (32) de sacrificio en los extremos abiertos, y que comprenden asegurar las placas (32) de sacrificio a las púas (11) al avanzar el dispositivo (15) y permitir que las placas (32) de sacrificio se separen de las púas (11) al retraerse, y agregar el relleno a través de las púas (11).

15          17. El método de la reivindicación 14, en el que el relleno es una combinación de piedra triturada, arena, agregado, grava, lechada, hormigón, cal, cenizas volantes, materiales de desecho, virutas de neumáticos, materiales reciclados y otras sustancias fluidas.

20          18. El método de la reivindicación 13, en el que el dispositivo (15) es un dispositivo (15) de la reivindicación 1, en el que el nivel de mejora del suelo logrado se mide a través de una monitorización de la presión descendente durante la penetración para determinar el grado de densificación.

25          19. El método de la reivindicación 13, en el que el método comprende además, después de lograr la condición deseada del terreno, la etapa de agregar un pilote, un pilar de hormigón, una construcción, una losa, un muro, un tanque, una estructura de transporte, una obra industrial u otra estructura sobre el terreno.

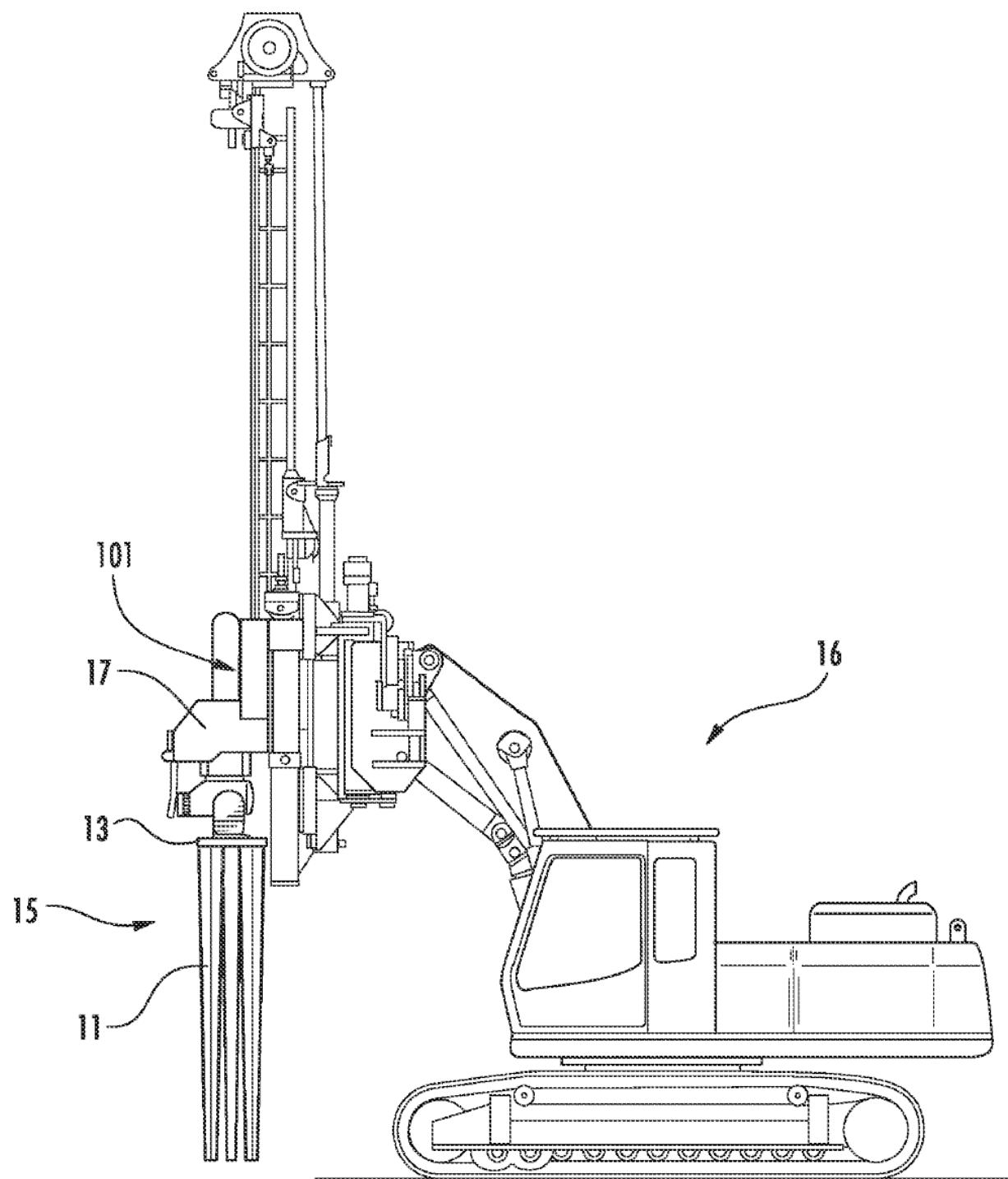


FIG. 1

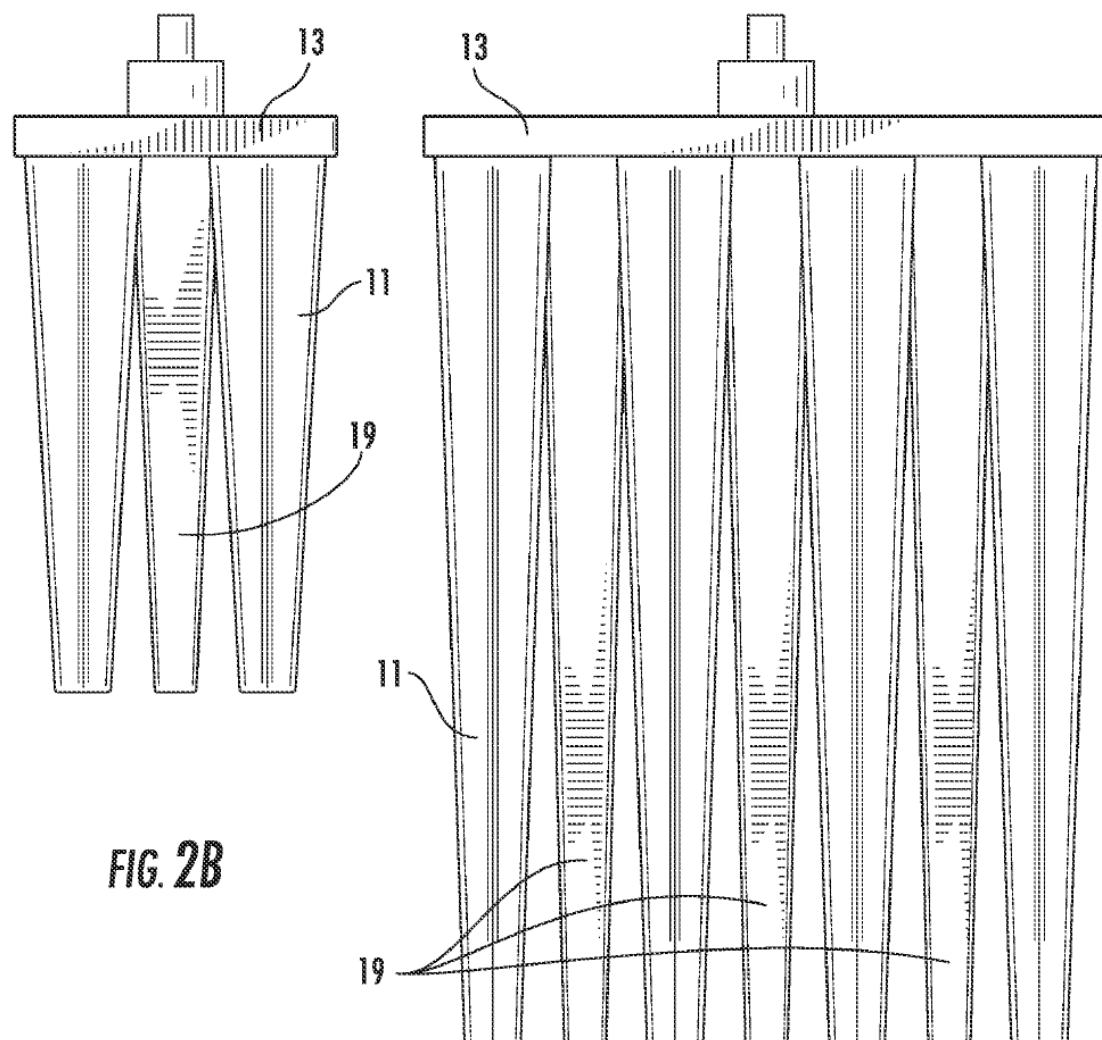
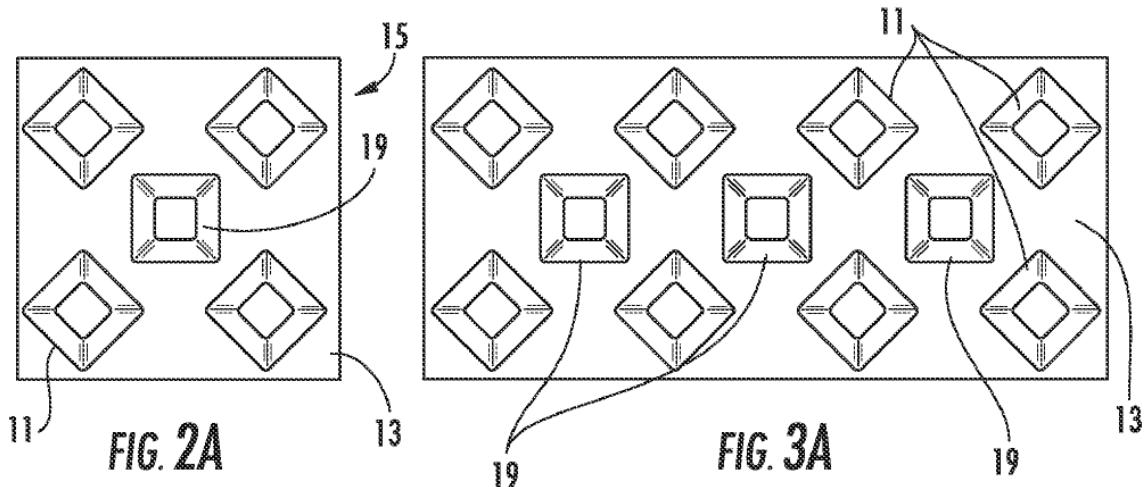
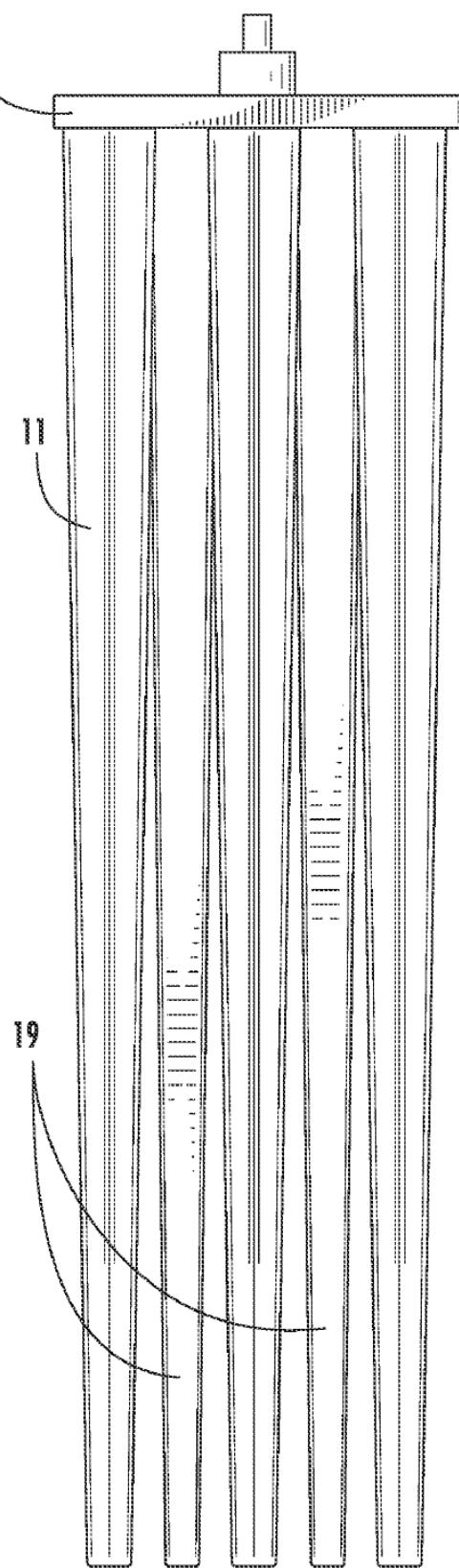
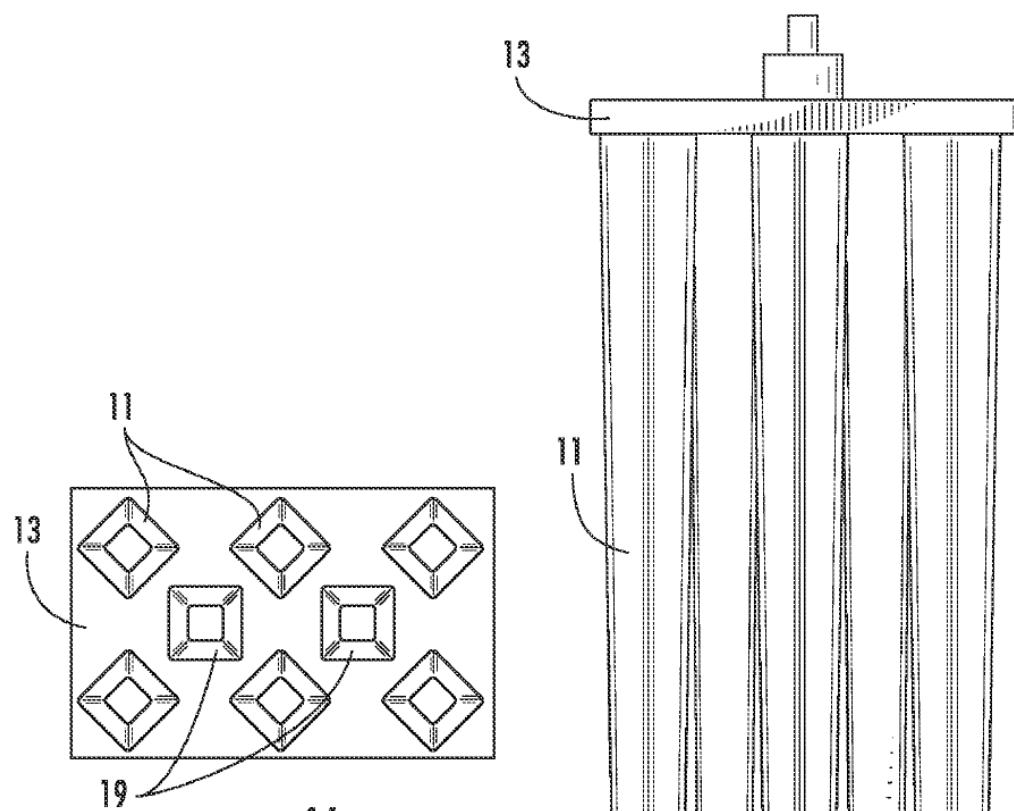


FIG. 3B



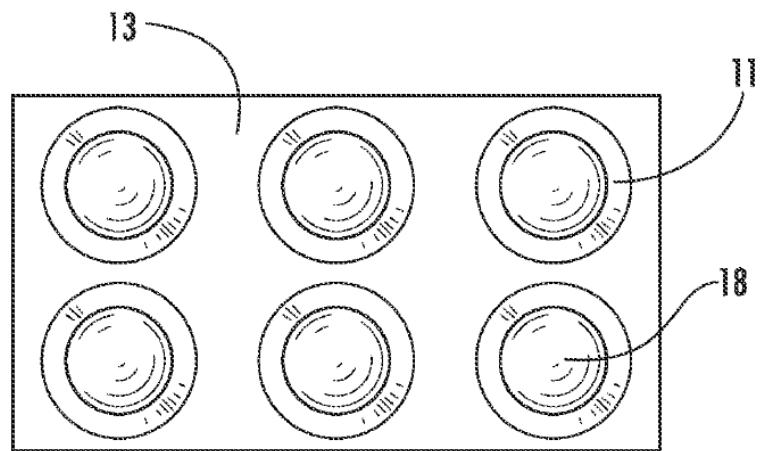


FIG. 5A

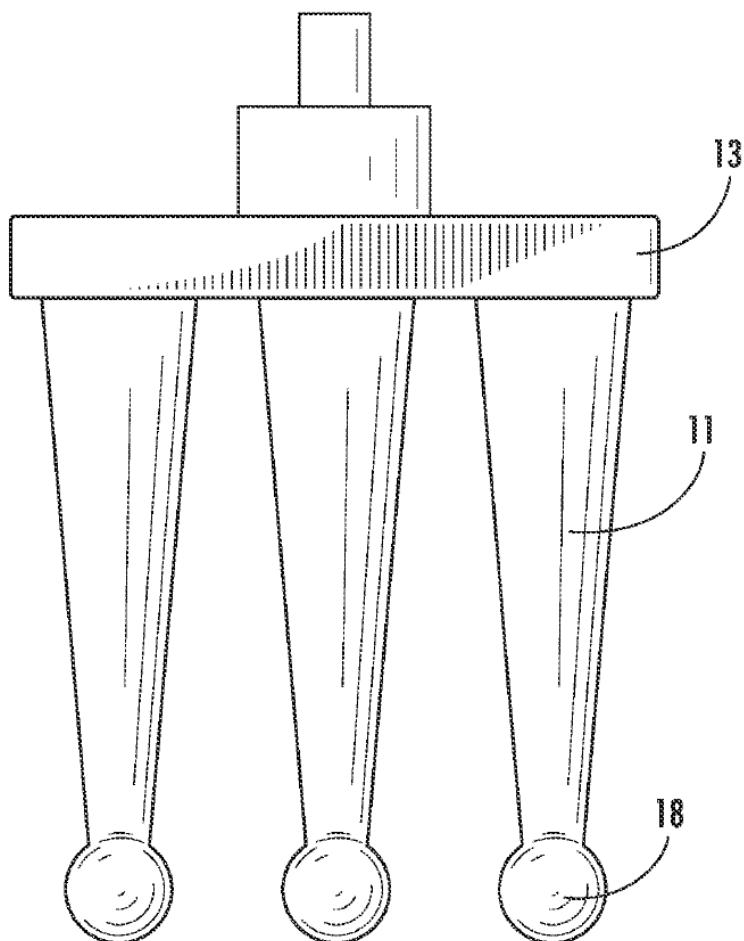


FIG. 5B

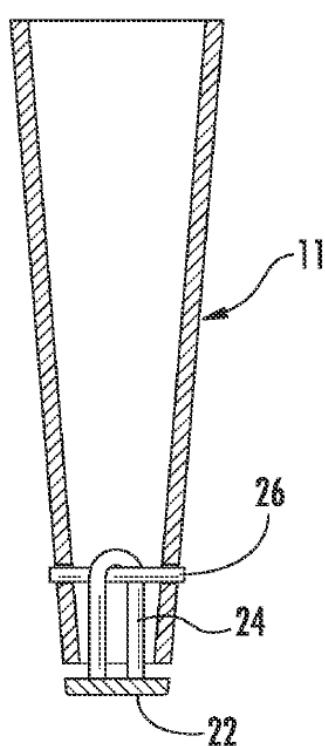


FIG. 6A

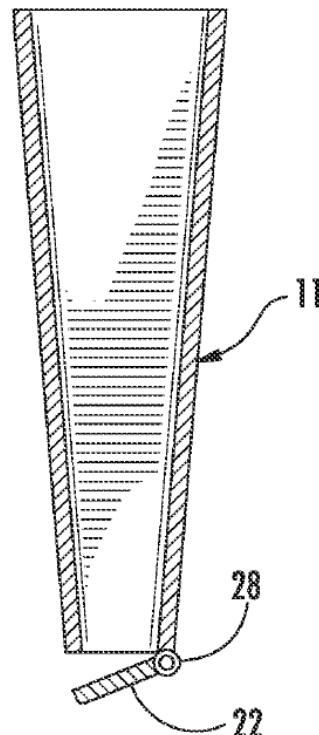


FIG. 6B

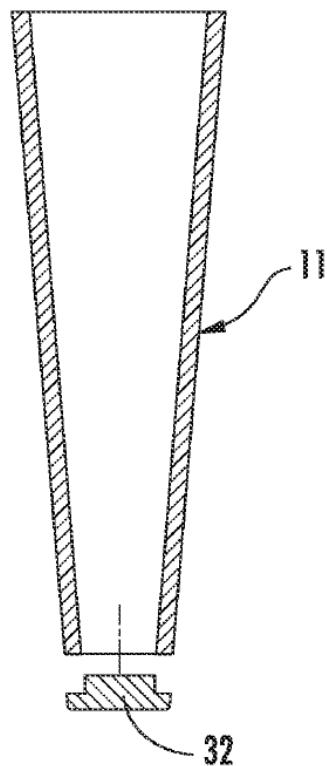


FIG. 7

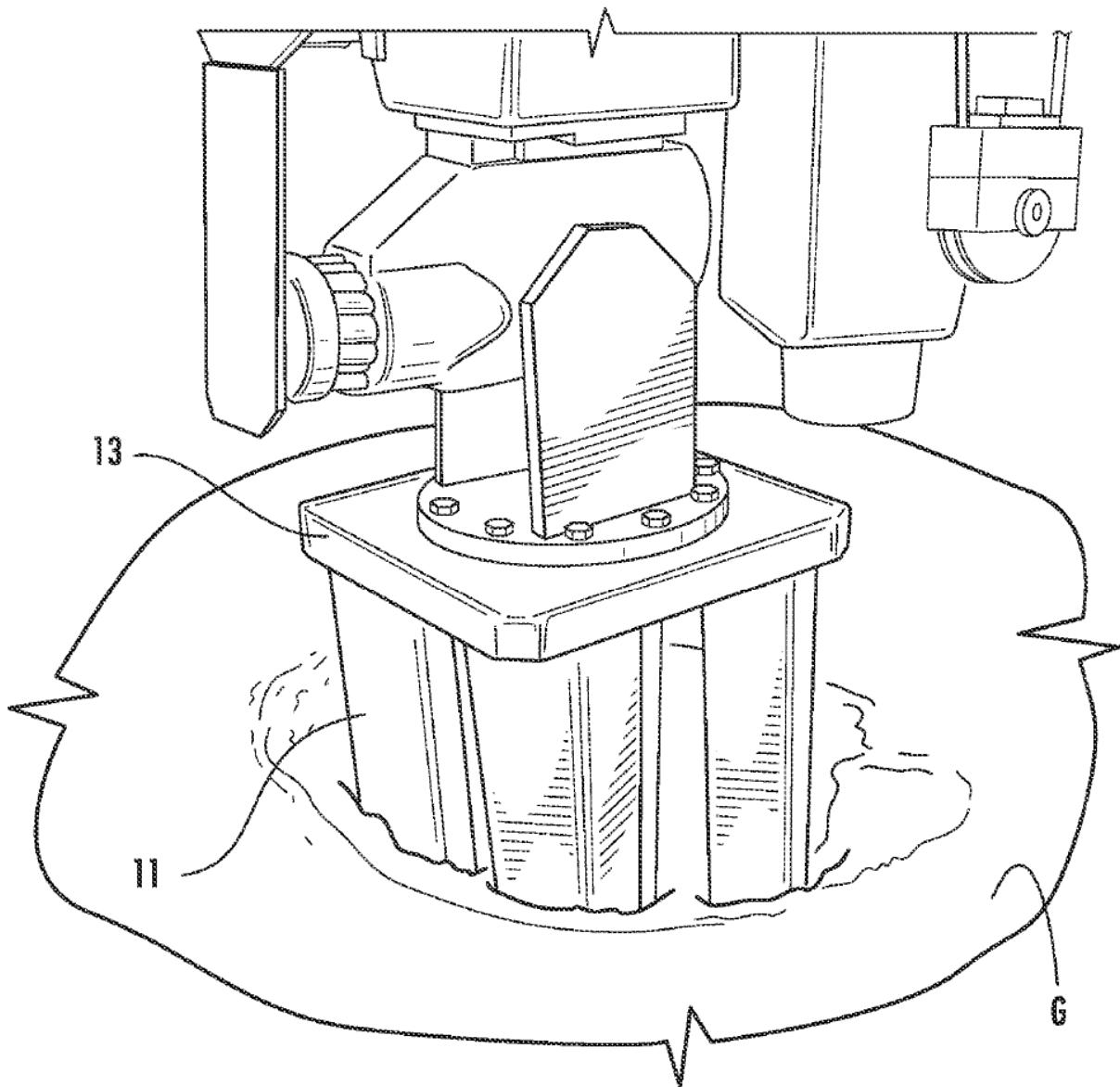


FIG. 8

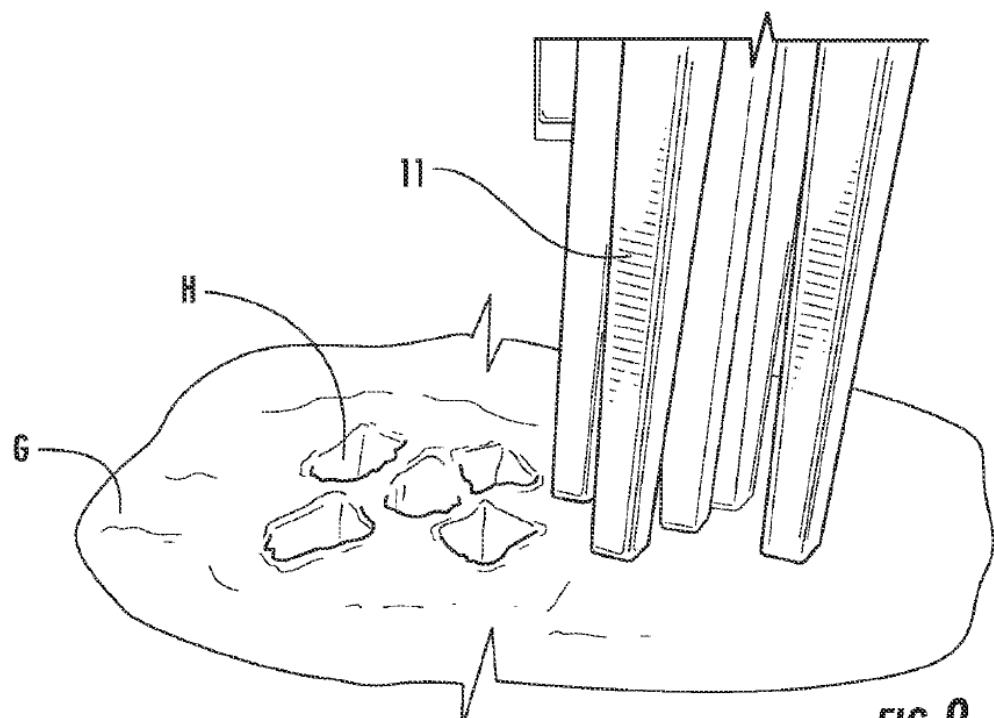


FIG. 9

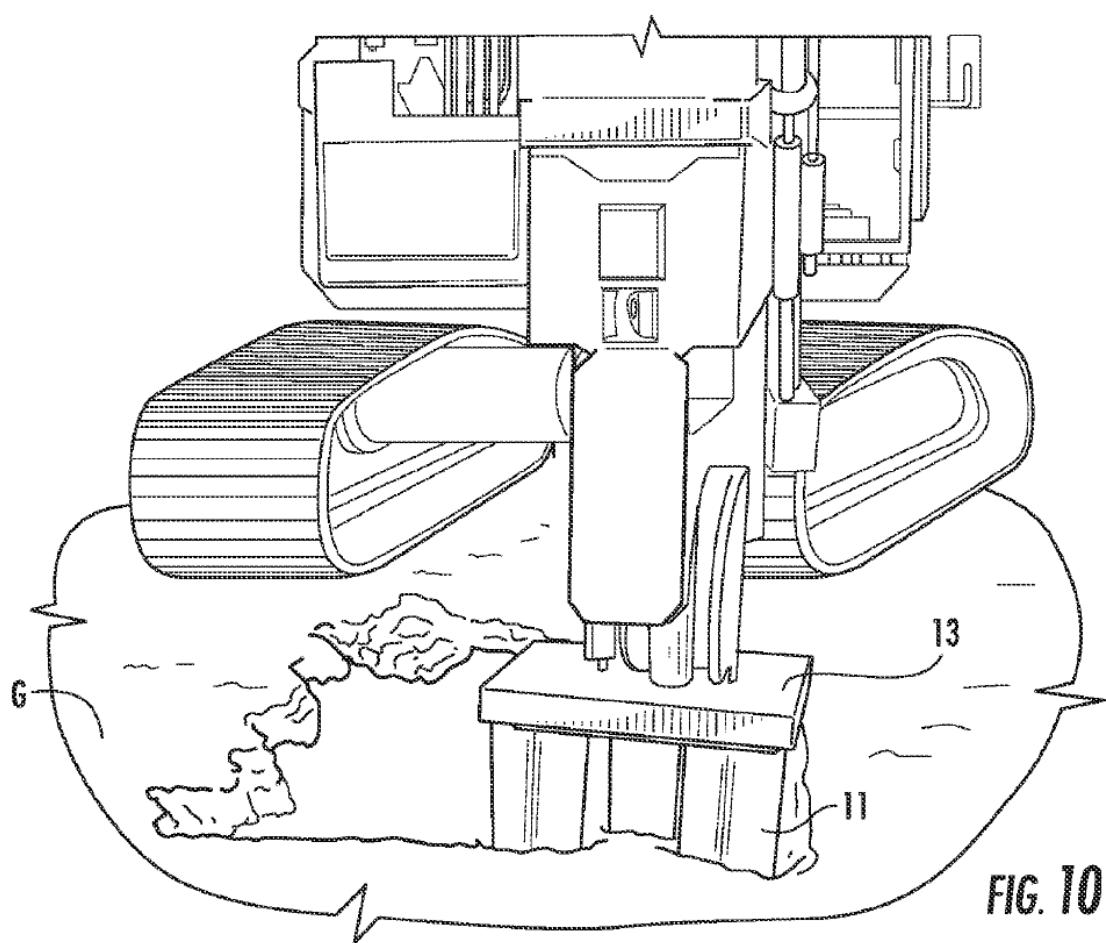


FIG. 10

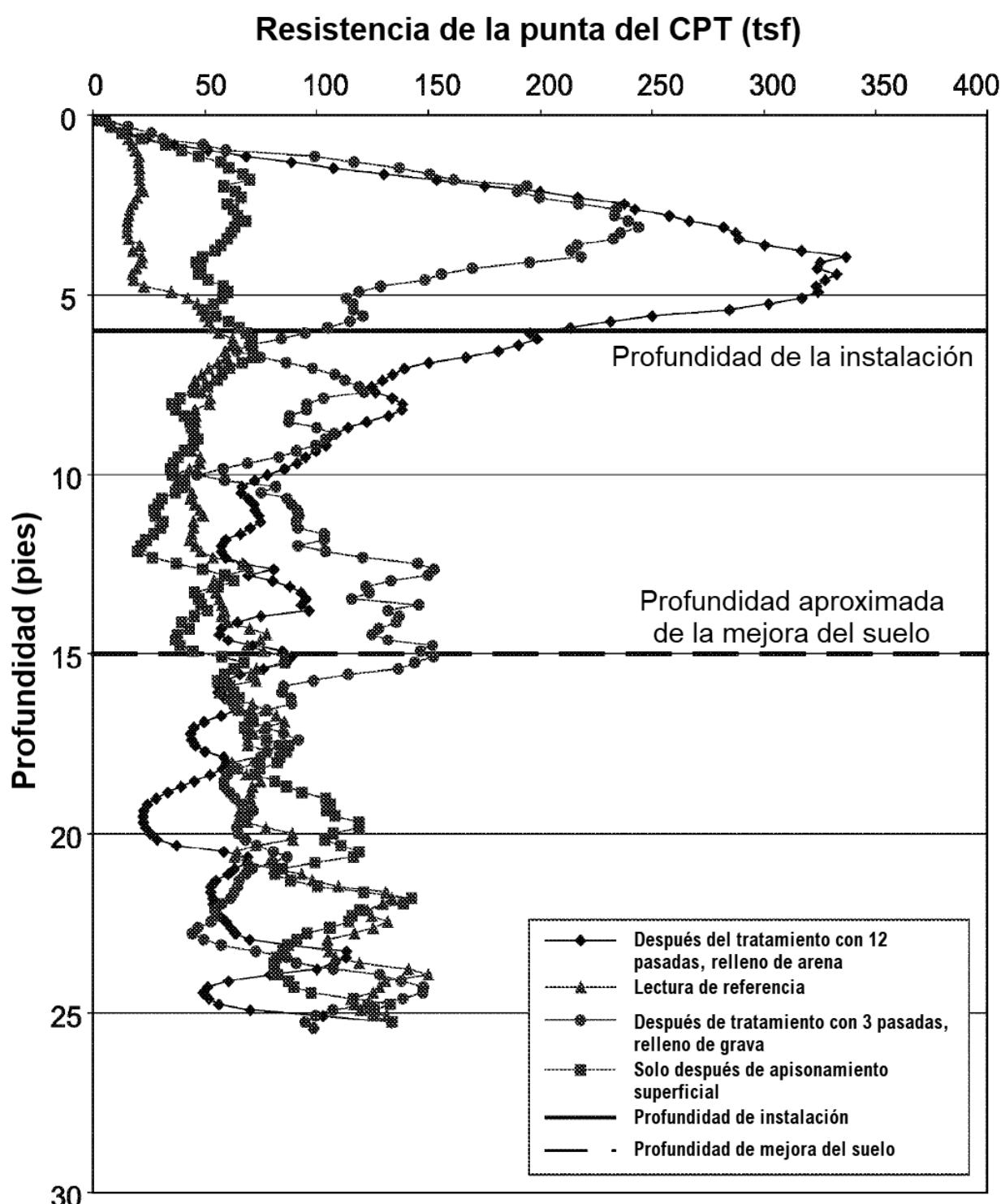


FIG. 11

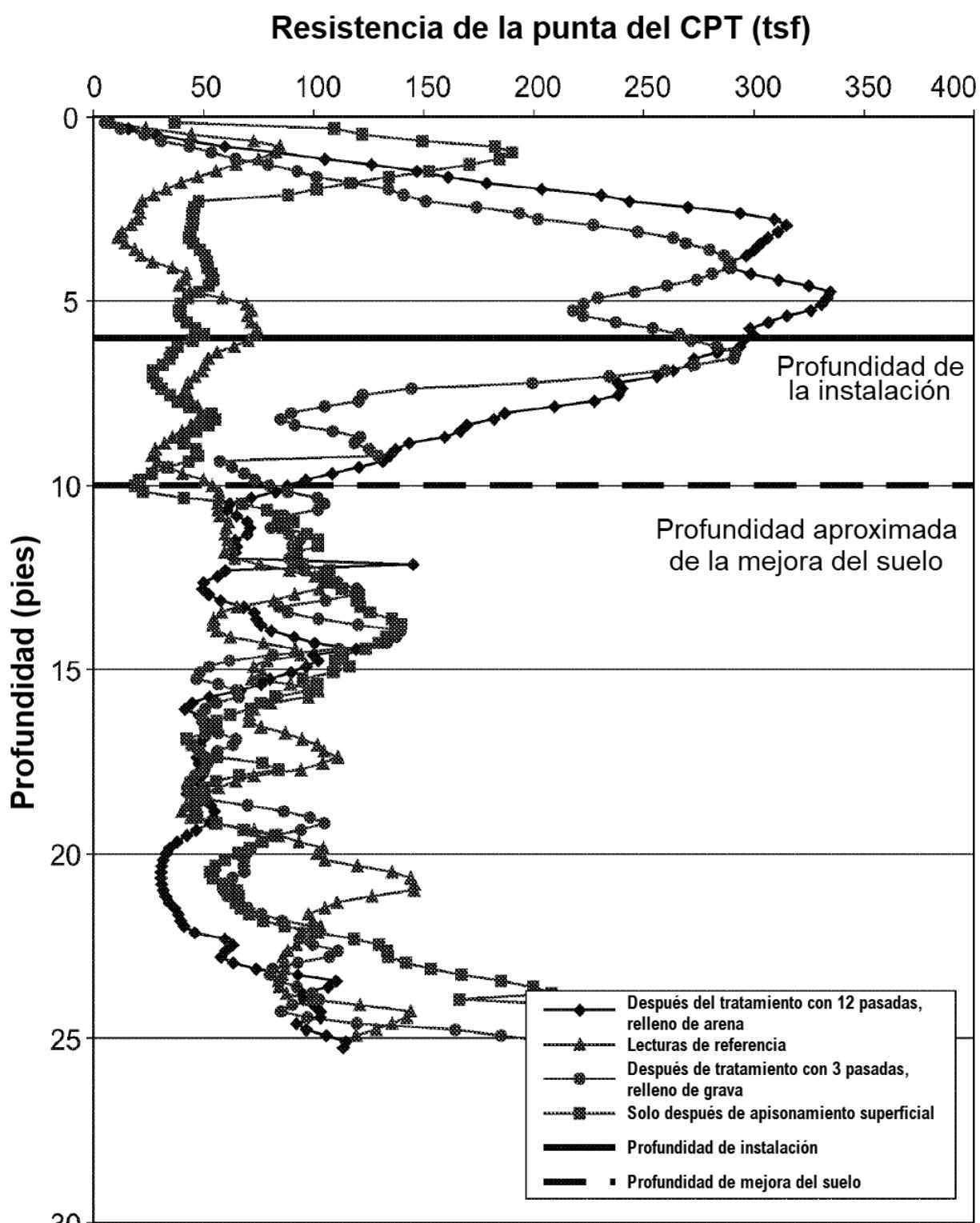
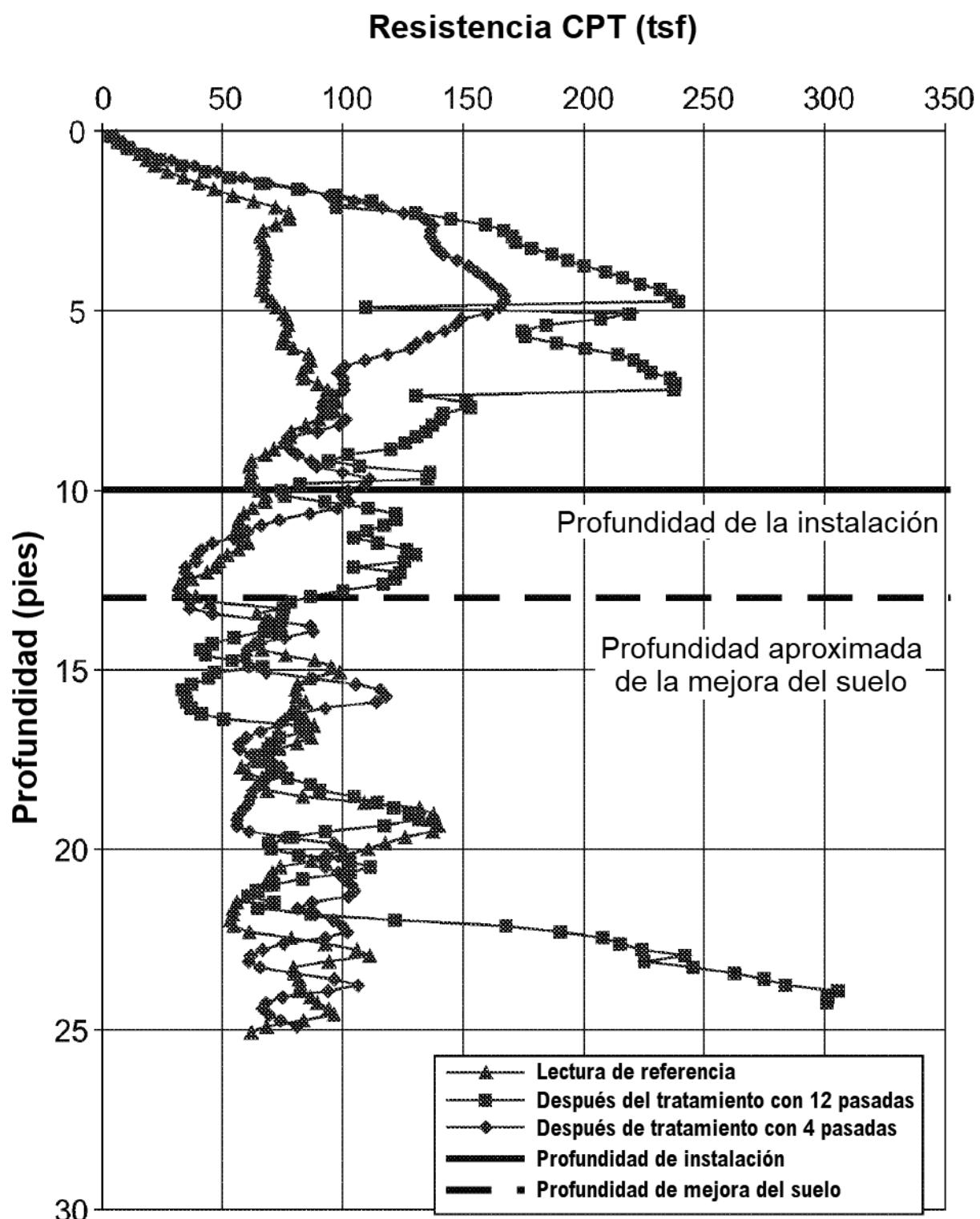


FIG. 12

**FIG. 13**

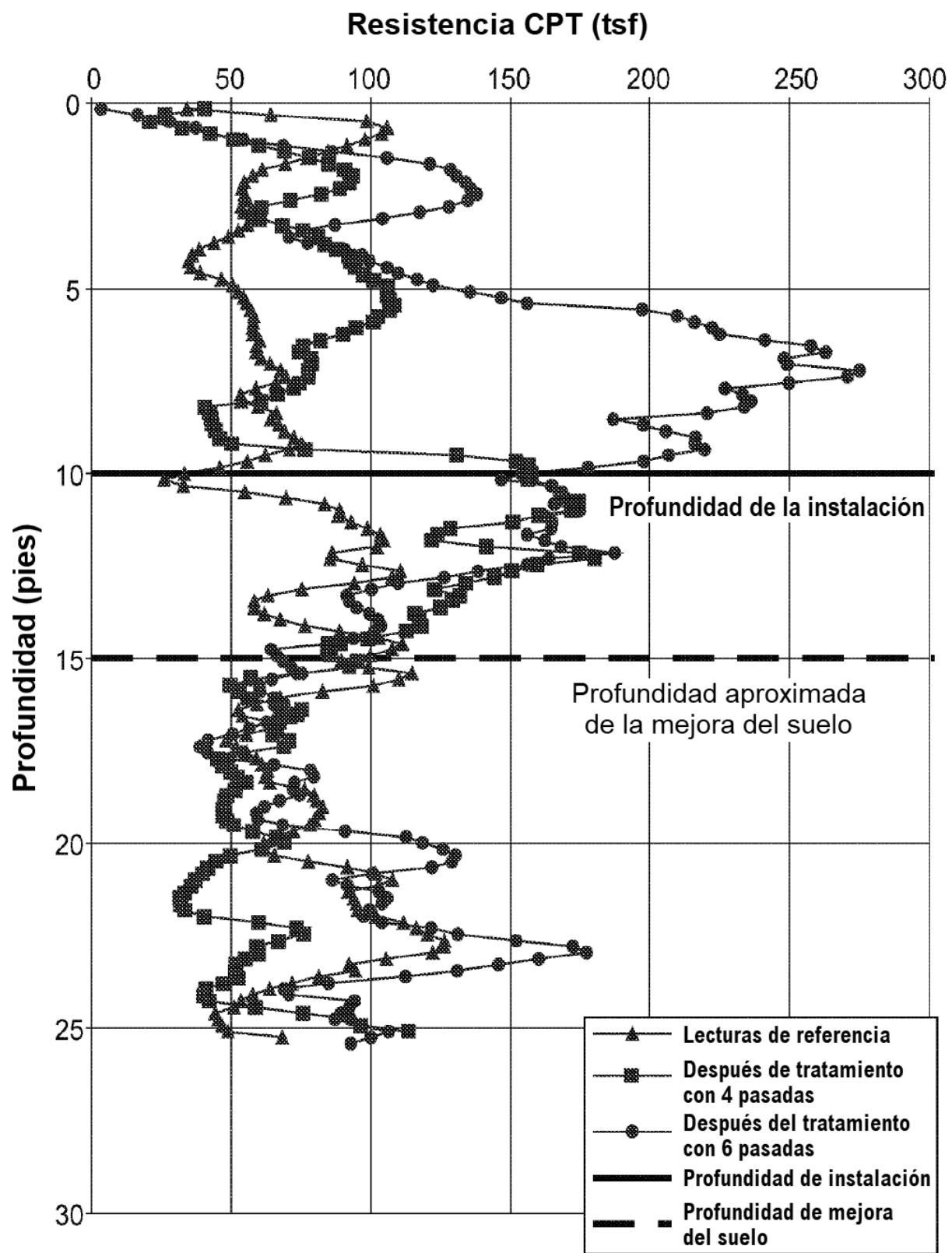


FIG. 14

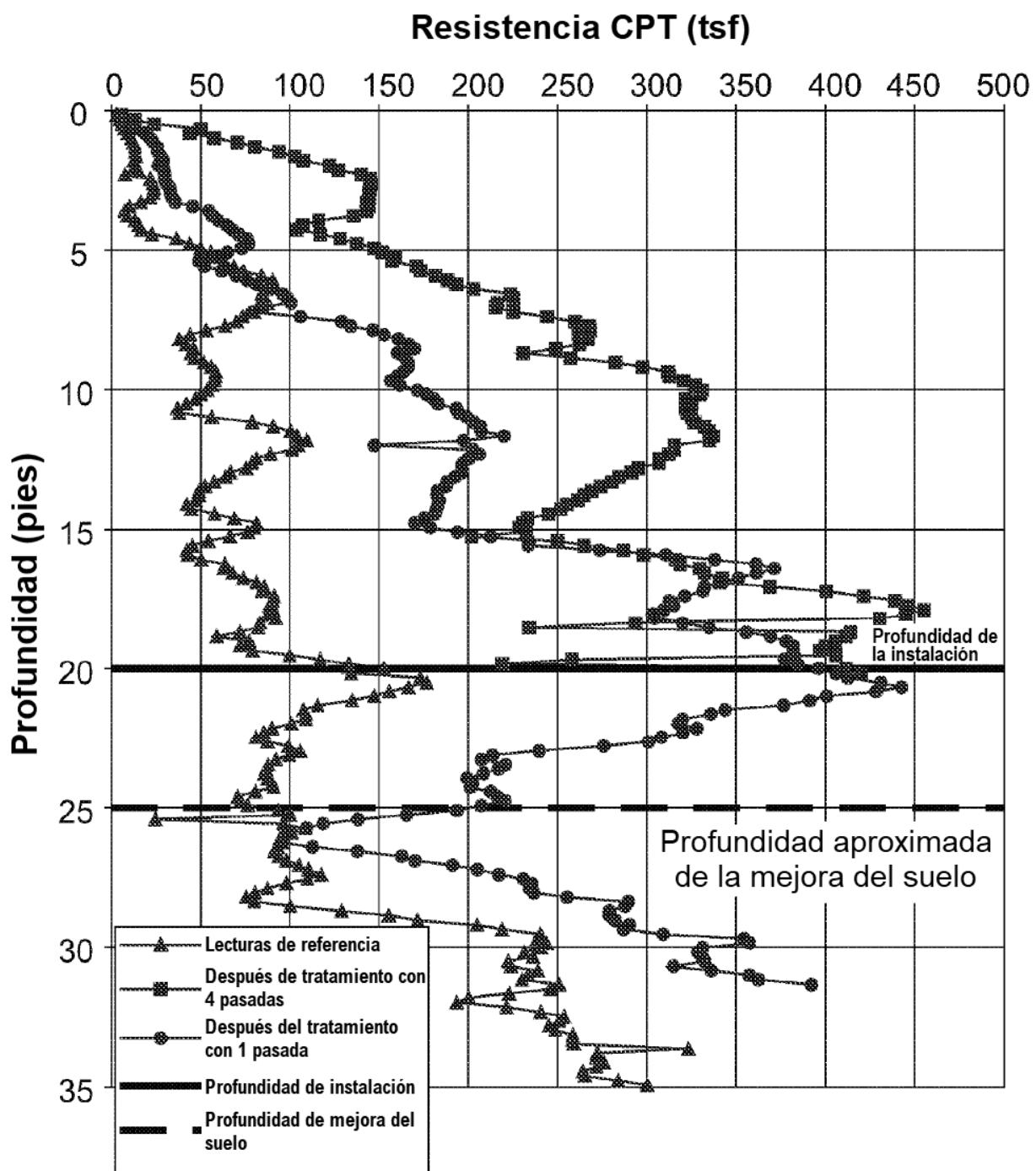


FIG. 15

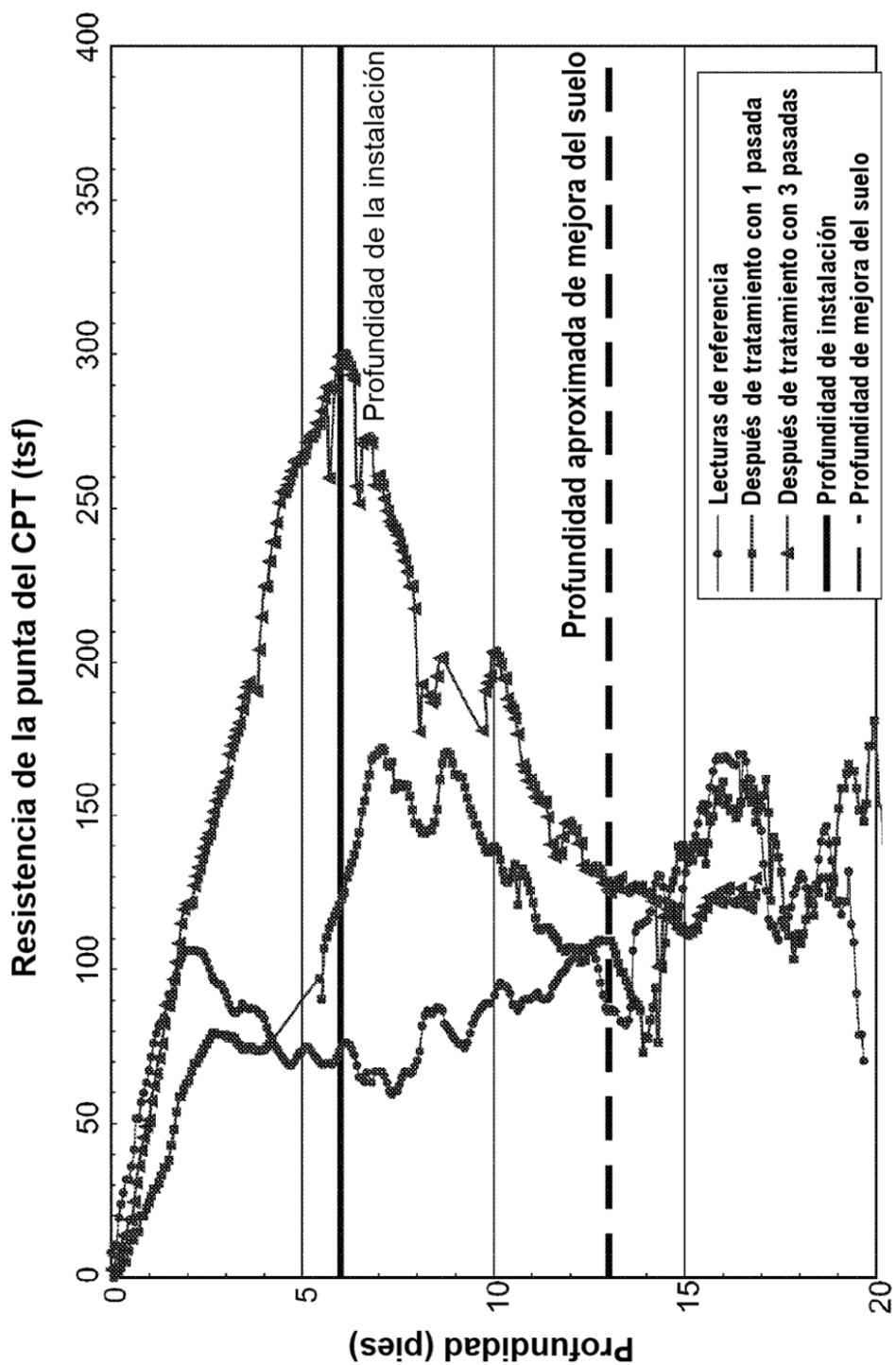


FIG. 16

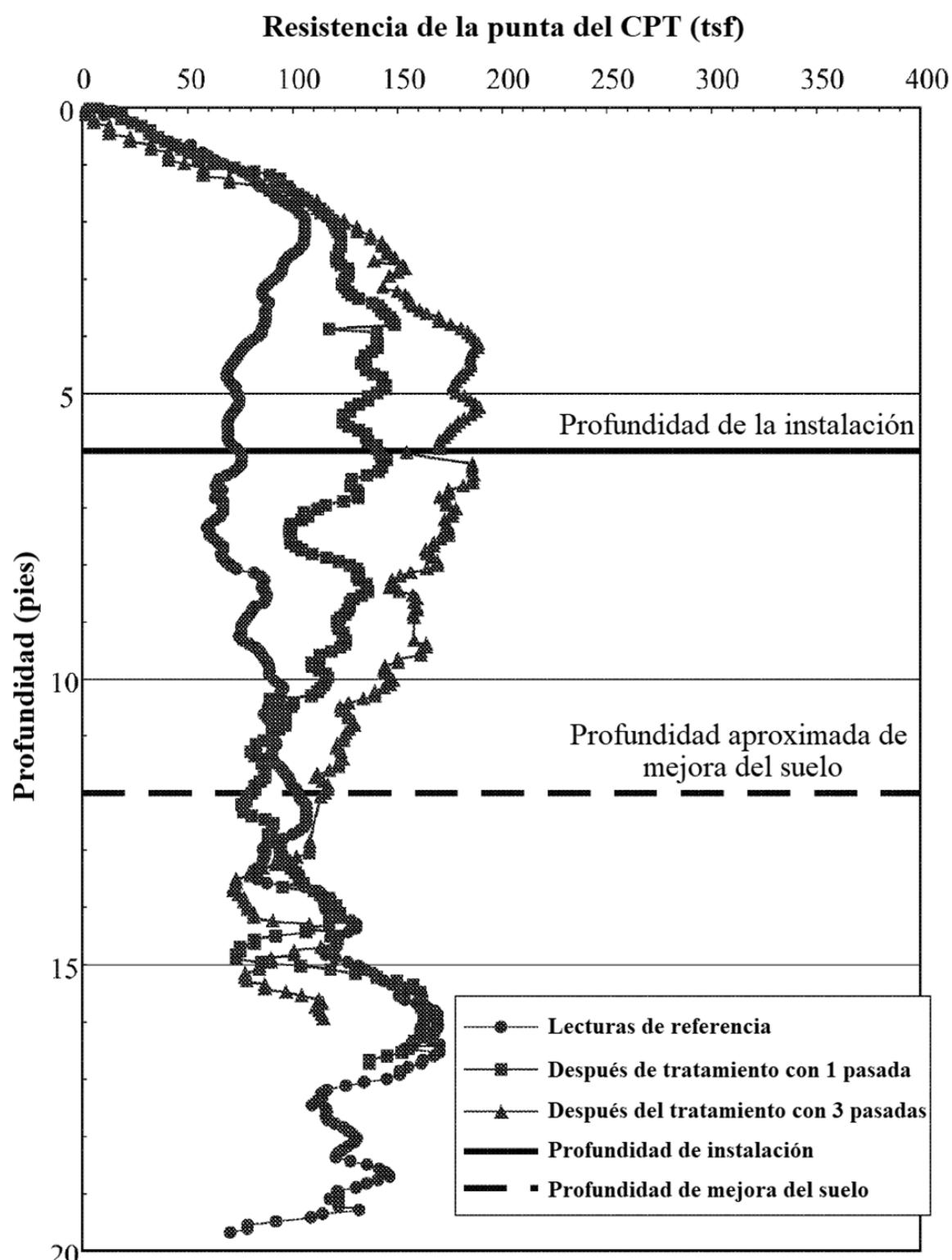


FIG. 17