(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 991 094**

(51) Int. Cl.:

E02B 17/02 (2006.01)
E02D 27/42 (2006.01)
E02D 27/52 (2006.01)
F03D 13/20 (2006.01)
E02D 7/02 (2006.01)
E02D 5/48 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(86) Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **20.11.2020 PCT/EP2020/082862**

(87) Fecha y número de publicación internacional: **10.06.2021 WO21110436**

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **20.11.2020 E 20811291 (2)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.06.2024 EP 4069908**

(54) Título: **Estructura de cimentación de una turbina eólica, así como método para la producción de una estructura de cimentación de una turbina eólica**

(30) Prioridad:

05.12.2019 DE 102019133132

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.12.2024

(73) Titular/es:

BARTMINN, DANIEL (100.0%)
Moltkestraße 11b
25335 Elmshorn, DE

(72) Inventor/es:

BARTMINN, DANIEL

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

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

Estructura de cimentación de una turbina eólica, así como método para la producción de una estructura de cimentación de una turbina eólica

El objeto se refiere a una estructura de cimentación de una turbina eólica; según la reivindicación 1, así como a un método según la reivindicación 12 para la producción de una estructura de cimentación de este tipo. Por turbinas eólicas en el sentido del objeto se pueden entender turbinas eólicas, estaciones transformadoras, subestaciones, estaciones de transformación o similares.

Las turbinas eólicas suelen estar cimentadas sobre elementos estructurales huecos. Los elementos estructurales huecos se cimentan en el suelo, en este caso, con una longitud de empotramiento de entre 5 y 50 m. Los elementos estructurales huecos tienen preferentemente una longitud de >45 m, en particular entre 50 y 100 m. En los sistemas en alta mar, los elementos estructurales huecos se cimentan de tal manera que tengan longitudes de empotramiento de entre 5 y 50 m y que sobresalgan de la superficie del agua entre 10 y 30 m.

Los elementos estructurales huecos tienen diámetros de entre 4 m y 10 m. Tradicionalmente, los elementos estructurales huecos se fabrican como cilindros de acero, que se introducen en el fondo marino mediante embestida o vibración. El uso de acero como material para los elementos estructurales huecos conlleva costes elevados, debido a su producción, así como su elevado propio peso. Además, es necesaria la conexión con las llamadas "piezas de transición" (transition pieces) en la parte superior por medio de conexiones de lechada (conexiones grout) o conexiones roscadas.

También es conocido cimentar postes de hormigón de material macizo mediante perforación. Para ello, se perfora un agujero en el suelo, en el que se inserta el poste de hormigón. Sin embargo, una cimentación de este tipo es compleja y el equipo de perforación necesario es caro.

El documento US 2014/033628 A1 revela una estructura de cimentación de una turbina eólica según el preámbulo de la reivindicación 1. El estado de la técnica anterior adicional proviene de los documentos US 2011/138720 A1, así como US 3 034 304 A.

El objetivo del objeto era crear una estructura de cimentación que fuera fácil de cimentar, que tuviera una gran capacidad de carga y que se pudiera producir de manera económica.

Este objetivo se resuelve mediante una estructura de cimentación según la reivindicación 1. El objetivo se resuelve además mediante un método según la reivindicación 12.

La estructura de cimentación en el presente caso presenta un elemento estructural hueco, que se extiende en la dirección longitudinal, y que está formado en la dirección longitudinal por una pared circunferencial. La pared tiene dos extremos distales, cada uno de los cuales está delimitado por caras extremas. Una primera cara de extremo es una cara de extremo superior y una segunda cara de extremo es una cara de extremo inferior. La parte superior e inferior se pueden definir mediante la posición del elemento estructural hueco en el estado final instalado. En este caso, en el estado instalado, la cara del extremo inferior se cimenta en el suelo, la cara del extremo superior sobresale del suelo.

En el presente caso, la pared está formada por un material de construcción mineral y puede tener una pared que se estrecha hacia la parte inferior. La pared se estrecha desde la parte superior de la cara del extremo hacia la parte inferior de la cara del extremo.

Una pared está delimitada por una pared interior y una pared exterior, o por un diámetro interior y un diámetro exterior. A continuación, a veces se hace referencia a una pared exterior cuando se hace referencia a la pared. La pared es la delimitación exterior del elemento estructural hueco. La pared es en particular tubular. La pared tiene en particular una sección transversal redonda, elíptica u ovalada.

Esto significa que a lo largo de la longitud del elemento estructural hueco aumenta un volumen de desplazamiento desde la cara del extremo inferior hasta la cara del extremo superior. De este modo se consigue que la estructura de cimentación, en el presente caso, se pueda cimentar simplemente mediante embestida o vibración. A diferencia de los postes de hormigón convencionales, que están hechos de material macizo, la estructura de cimentación en el presente caso, se puede cimentar más fácilmente en forma de un elemento estructural hueco. Para mantener baja la resistencia a la penetración en el suelo durante la cimentación, la parte inferior de la cara del extremo es más pequeña que la parte superior de la cara del extremo. El elemento estructural hueco penetra en el suelo en forma de cuña, y puede avanzar más fácilmente que un elemento estructural hueco no ahusado o un elemento hecho de material macizo.

El elemento estructural hueco tiene preferentemente una longitud de empotramiento de al menos 7 m. Esto puede ser suficiente para cimentar suficientemente el elemento estructural hueco en el suelo. Se prefieren longitudes de empotramiento de entre 7 y 20 m.

Según un ejemplo de realización se propone, que el elemento estructural hueco esté producido de manera monolítica en al menos una extensión longitudinal del 50%. También se propone, que el elemento estructural hueco se produzca de manera monolítica en la zona de su extremo inferior hasta al menos 5 m por encima del fondo marino/terreno. La parte monolítica del elemento estructural hueco está cimentada al menos parcialmente en el suelo.

El elemento estructural hueco puede presentar una extensión longitudinal, en la que el borde superior del elemento estructural hueco, en el estado instalado, termina al menos 5 m por encima del fondo marino, y en particular no más de 2 veces el diámetro exterior o interior del elemento estructural hueco, en particular menos de 3 veces el diámetro exterior o interior del elemento estructural hueco por encima del fondo marino.

Preferentemente, el extremo monolítico del elemento estructural hueco está pretensado mecánicamente. La fuerza de compresión generada en el hormigón por el pretensado es tal, que las fuerzas de tracción que se producen al embestir y/o hacer vibrar un poste monolítico de la misma masa y dimensiones, se compensan en al menos un 70%, en particular al menos un 85%. Preferentemente, el pretensado es la fuerza de pretensado, que se determina como fuerza de pretensado neta después de deducir la relajación del acero de pretensado y/o las pérdidas por fluencia y contracción en el hormigón y las pérdidas por fricción.

La fuerza de compresión en el hormigón generado por el pretensado es tal, que la fuerza de compresión en el hormigón generado por el pretensado, compensa (sobre presiona) las fuerzas de tracción, que se producen durante el funcionamiento y/o bajo carga máxima en un poste monolítico de la misma masa y dimensión en al menos el 45 %, en particular al menos el 65 %.

Dado que el elemento estructural hueco en el presente caso, presenta una pared, que tiene un espesor más grande que las estructuras de acero, al principio la cimentación por medio de vibración o embestida es más difícil. El hecho de que la pared se estreche hacia abajo en forma de cuña, facilita la penetración en el suelo.

Según un ejemplo de realización se propone que el elemento estructural hueco sea cilíndrico hueco. La forma cilíndrica aumenta la integridad estructural, de modo que el elemento estructural hueco puede soportar momentos de flexión más elevados.

Según un ejemplo de realización se propone que el espesor de la pared se vaya estrechando constantemente al menos a lo largo de partes de una extensión longitudinal del elemento estructural hueco. En particular, la pared se puede estrechar continuamente. Un estrechamiento constante significa que no hay saltos ni escalones.

También se propone, que el espesor de la pared se vaya estrechando de manera escalonada al menos a lo largo de partes de una extensión longitudinal del elemento estructural hueco. En este caso, se puede formar un salto en el espesor de la pared de manera escalonada, por ejemplo, a distancias de entre 2,5 m y 15 m. Sin embargo, en los escalones se pueden formar ranuras huecas o transiciones cónicas, de modo que los escalones formen una resistencia aceptable al clavar el elemento estructural hueco en el suelo. Las ranuras huecas o las transiciones cónicas pueden estar previstas en cada escalón, en toda la circunferencia.

Según un ejemplo de realización se propone que el diámetro interior del elemento estructural hueco aumente debido al estrechamiento. El radio interior cambia en función de la extensión longitudinal del elemento estructural hueco, de modo que se forma un cono interior. En este caso, en particular, el radio exterior es constante al menos a lo largo de partes de la extensión longitudinal.

También se propone, que el diámetro exterior del elemento estructural hueco disminuya debido al estrechamiento. El radio exterior cambia a lo largo de la extensión longitudinal del elemento estructural hueco. El elemento estructural hueco discurre particularmente de manera cónica, desde arriba hacia abajo. El radio interior es, en este caso, constante en partes de la extensión longitudinal del elemento estructural hueco.

También se propone, que tanto el radio interior como el radio exterior cambien en función de la extensión longitudinal. Cuando se estrecha, el radio interior se hace más grande y el radio exterior se hace más pequeño. El gradiente del radio interior y el gradiente del radio exterior pueden tener la misma longitud a lo largo de la longitud. Esto significa que los radios interior y exterior aumentan o disminuyen en la misma medida, en función de la extensión longitudinal del elemento estructural hueco.

Según un ejemplo de realización se propone, que el material de construcción contenga al menos una parte de cemento. El material de construcción es, en particular, hormigón que se mezcla con cemento, grava, arena y agua y se endurece después del vertido.

Para una buena capacidad de carga se ha demostrado que la relación agua-cemento (a/c) del material de construcción es <0,45, en particular <0,35 o <0,3.

Los momentos y fuerzas cortantes que se producen en las turbinas eólicas son absorbidos adecuadamente por el elemento estructural hueco, particularmente si el material de construcción presenta una clase de resistencia de al menos C40/50, preferentemente C70/85, en particular C100/115 según EN 206 y EN1992.

Una estabilidad suficiente a largo plazo de la estructura de cimentación durante la vida útil de la turbina eólica, particularmente en el caso de una penetración permanente de agua, se consigue en particular, si el material de construcción presenta un contenido de poros (poros de aire) inferior al 5% preferentemente menos del 3%, en particular menos del 2%. La porosidad total medida con la porosidad de presión de mercurio, debe ser después de 28 días P_{28d}<12% en volumen y después de 90 días P_{90d}<10% en volumen.

Una capacidad de carga suficiente del elemento estructural hueco se consigue en particular, si el material de construcción presenta un contenido de cemento de al menos 350 kg/m^3, preferentemente más de 450 kg/m^3, en particular más de 650 kg/m^3.

Particularmente en el caso de una penetración permanente de agua durante la instalación de la estructura de cimentación en alta mar, se consigue una vida útil suficiente, porque el material de construcción presenta una porosidad de $P_{28d<}$12% en volumen, en una medición simétrica de poros mediante presión de mercurio. P_{28d} es una medición de más de 28 días. La porosidad es, en este caso, también preferentemente inferior al 10% en volumen. En $P_{90d,}$ es decir, en una medición de más de 90 días, la porosidad es preferentemente <10% en volumen, en particular <8% en volumen.

Según un ejemplo de realización, se propone que la pared esté pretensada mecánicamente. El pretensado sobre presiona las fisuras y, por lo tanto, mantiene las superficies en gran medida libres de tensiones de tracción, lo que resulta particularmente ventajoso en el caso de cargas de momentos de torsión fluctuantes. La fuerza de pretensado es preferentemente un 5%, en particular más de un 15%, mayor que la resistencia a la compresión de la pared. La fuerza de pretensado se aplica preferentemente en la dirección longitudinal.

Para una mayor estabilidad en condiciones ambientales dinámicas, se propone reforzar metálicamente el material de construcción. El refuerzo metálico es en particular un refuerzo de acero. El refuerzo se puede proporcionar mediante fibras o hierro de refuerzo. El refuerzo de fibra también se puede conseguir utilizando fibra de carbono, fibra de vidrio o fibra de metal.

El refuerzo puede ser tal que tenga al menos 26 mm, preferentemente al menos 40 mm de recubrimiento de hormigón en el 90% de los puntos de medición, preferentemente en el 98% de los puntos de medición.

El material de construcción se puede reforzar con acero de refuerzo de acero inoxidable ferrítico. El refuerzo no puede exceder un contenido de cromo del 18M%. El refuerzo puede contener componentes de molibdeno.

El material de construcción se puede reforzar con acero de refuerzo de acero inoxidable austenítico. El refuerzo puede contener al menos un 5 M%, en particular entre un 5 M% - un 14 M% de níquel, y/o entre un 12 M% - un 22 M%, en particular un 15 M% - un 20 M% de cromo.

El material de construcción se puede reforzar con acero de refuerzo de acero inoxidable ferrítico-austenítico. El refuerzo puede contener al menos 18 M%, en particular entre 15 M% - 20 M% de cromo, y 2 M% - 8 M% de níquel y eventualmente molibdeno.

Según un ejemplo de realización se propone, que la parte superior de la cara del extremo superior esté reforzada metálicamente, en particular, que de la parte superior de la cara del extremo superior sobresalga un refuerzo metálico. El elemento estructural hueco se cimenta en el suelo a través de la parte superior, en particular mediante embestida o vibración. Esto significa que la carga mecánica en la parte superior de la cara del extremo superior de la propia cimentación es muy alta. Para soportar estas cargas mecánicas y en particular para evitar daños, se prefiere un refuerzo metálico en la cara del extremo. Si está previsto un nervio circunferencial, que sobresalga de la cara del extremo, la herramienta de cimentación, ya sea la herramienta de vibración o la herramienta de apisonamiento, se puede apoyar sobre este refuerzo, y no directamente sobre el material de construcción del elemento estructural hueco. Dado que el refuerzo metálico es mucho más maleable que un material de construcción mineral, se evitan daños durante la cimentación.

Según un ejemplo de realización se propone, que la densidad del refuerzo en una zona extrema del elemento estructural hueco en su parte superior y/o inferior de la cara del extremo sea mayor que en una zona central del elemento estructural hueco. La carga mecánica en las caras extremas es mayor, particularmente durante la cimentación, que en una zona central. La herramienta para la cimentación, en particular una herramienta de embestida o una herramienta de vibración, engrana en la parte superior de la cara del extremo superior. El elemento estructural hueco se embestida en el suelo por la parte inferior de la cara del extremo y la parte inferior de la cara del extremo debe desplazar el suelo. En estas dos caras extremas el refuerzo es mayor, es decir, la densidad del refuerzo aumenta en comparación con una zona central.

En particular, en una parte inferior de la cara del extremo puede estar prevista una cuña estrecha, que se estrecha hacia fuera del elemento estructural hueco. La cuña puede estar formada por el material de construcción del elemento estructural hueco o por un material metálico. Mediante la forma de cuña de la parte inferior se facilita el desplazamiento del suelo al cimentar.

Según un ejemplo de realización se propone, que el diámetro interior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco aumente, en particular de manera cónica, hacia la parte superior de la cara del extremo superior. Esto permite una conexión de lechada (conexión grout) con una pieza de transición (transition piece). La zona extrema se puede extender longitudinalmente desde un borde extremo con al menos 0,3 en particular 0,5 veces el diámetro interior.

Según un ejemplo de realización se propone, disminuir el diámetro exterior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco, en particular de manera cónica, hacia la parte superior de la cara del extremo superior. La zona extrema se puede extender longitudinalmente desde un borde extremo con al menos 0,3 en particular 0,5 veces el diámetro interior.

La pieza de transición se puede insertar en el elemento estructural hueco con un poste o elemento cilíndrico que sea congruente con el diámetro interior de la pared. Un espacio anular entre la superficie lateral interior del elemento estructural hueco y la superficie lateral exterior de la pieza de transición, puede estar formado por nervios, espaciadores o similares. En este espacio anular se puede rellenar hormigón o pasta de cemento, de modo que se forme una unión firme entre el elemento estructural hueco y la pieza de transición. El diámetro exterior de la zona extrema también puede disminuir hacia la parte superior de la cara del extremo superior, de modo que se estreche de manera cónica. Sobre ésta se puede colocar, por ejemplo, una pieza de transición y, en consecuencia, se puede formar una conexión de lechada (conexión grout).

Según un ejemplo de realización se propone, que en la superficie lateral interior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco se forma un tope dirigido radialmente hacia dentro. El tope puede estar formado por varios "rebordes" formados a distancias angulares entre sí. El tope puede estar formado en particular por resaltes dirigidos radialmente hacia dentro. El tope puede ser parcial o completamente circunferencial. El tope sirve como tope para la pieza de transición, que se inserta en el elemento estructural hueco. Una disposición axial adecuada del tope garantiza un espacio anular entre la superficie lateral interior del elemento estructural hueco y la superficie lateral exterior de la pieza de transición, en la que se puede rellenar hormigón o lechada (grout), para formar una conexión de lechada (conexión grout). Alternativamente, la conexión enchufable se realiza a partir de una conexión de racor sin masa de relleno.

Para una plataforma de aterrizaje o una plataforma de instalación, en una zona extrema del elemento estructural hueco se puede formar en la superficie lateral exterior de la pared, un faldón dirigido radialmente hacia fuera. El faldón puede ser parcial o completamente circunferencial. En particular, el faldón está distanciado de la cara del extremo superior en la dirección axial.

La pieza de transición asociada se puede unir al elemento estructural hueco, en particular enchufarla, en particular colocarla o ponerla. La pieza de transición puede presentar al menos un dispositivo de desembarco de barcos con una escalera.

Para una mayor estabilidad se propone, sellar el material de construcción, en particular con una lámina de sellado. Una lámina de sellado de este tipo puede ser, por ejemplo, una lámina de sellado de aluminio-butilo.

Un aspecto adicional es un método para la producción de una estructura de cimentación de una turbina eólica que se acaba de describir.

En este caso, el encofrado se forma primero en tierra. Esta carcasa tiene un espacio anular, que se estrecha desde un primer extremo hacia un segundo extremo. El espacio anular tiene una circunferencia radial y se extiende en la dirección axial por todo el encofrado. Se vierte hormigón líquido en el espacio anular del encofrado y a continuación se endurece. El hormigón endurecido forma el elemento estructural hueco y el encofrado se puede retirar.

A continuación, una vez endurecido el hormigón, el elemento estructural hueco se envía a un lugar de instalación en alta mar. En el lugar de instalación en alta mar, el elemento estructural hueco se cimenta mediante embestida o vibración en el fondo marino con la parte inferior de la cara del extremo inferior, en el estado instalado.

Para acortar el tiempo de construcción y en particular acortar el endurecimiento del hormigón, se propone endurecer el hormigón en un autoclave. Esto puede reducir significativamente el tiempo de secado.

Para aumentar la estabilidad en el agua de mar, se sugiere sellar el hormigón. Para ello se puede, por ejemplo, crear un vacío en la superficie o recubrirla.

Durante la producción se puede compactar el hormigón del elemento estructural hueco mediante rotación. En este caso, un encofrado exterior puede ser permeable al agua y/o estar parcialmente perforado, de modo que el agua transportada hacia el exterior por la fuerza centrífuga pueda escapar al exterior del encofrado.

El encofrado con el que se fabrica la pared es, en particular, un encofrado deslizante (método de encofrado deslizante) o un encofrado trepador (método de encofrado de salto de forma).

Para facilitar el llenado con hormigón y en particular para facilitar la compactación del hormigón en el encofrado se propone, que el primer extremo del encofrado esté en el lado inferior y el segundo extremo del encofrado esté en el lado superior. De este modo, el primer extremo, en el que el espacio anular es mayor que en el segundo extremo, se encuentra en el lado inferior y el encofrado se estrecha desde abajo hacia arriba. Para la cimentación, a continuación, se debe girar 180° todo el elemento estructural hueco una vez, de modo que la cara del extremo con la pared con el espesor de pared más pequeño quede hacia abajo, y la cara del extremo con la pared con el espesor de pared más grande quede arriba. A continuación, se puede cimentar el elemento estructural hueco mediante embestida o vibración.

Se propone que el elemento estructural hueco se produzca en orientación horizontal. Para mantener el número de rotaciones, particularmente en alta mar, lo más bajo posible, se propone enviar el elemento estructural hueco en posición vertical al lugar de instalación en alta mar. El elemento estructural hueco se puede cargar en un barco en posición vertical mediante una grúa. Allí sólo hay que descargarlo del barco en el lugar de instalación sin girarlo. Esto reduce el esfuerzo mecánico en alta mar.

El objeto se explica más detalladamente a continuación mediante dibujos, que muestran ejemplos de realización. Se muestran en el dibujo:

La Figura 1, una turbina eólica con una estructura de cimentación de una turbina eólica;
la Figura 2, una estructura de cimentación de una turbina eólica según un ejemplo de realización;
la Figura 3, una sección longitudinal a través de una estructura de cimentación de una turbina eólica según un ejemplo de realización;
la Figura 4, una sección longitudinal a través de una estructura de cimentación de una turbina eólica según un ejemplo de realización;
las Figuras 5a-f, representaciones esquemáticas exageradas de secciones longitudinales a través de estructuras de cimentación de una turbinas eólicas según ejemplos de realización;
las Figuras 6a, b, un detalle de una transición escalonada;
la Figura 7, la instalación de una estructura de cimentación de una turbina eólica según un ejemplo de realización.

La Figura 1 muestra una turbina eólica 2, que está cimentada en alta mar. Todas las declaraciones hechas aquí se aplican tanto a estructuras de cimentación en alta mar como a estructuras de cimentación en tierra.

La turbina eólica 2 está cimentada en el fondo marino 6 mediante una estructura de cimentación de una turbina eólica 4. La estructura de cimentación 4 se cimenta con una longitud de empotramiento 4a en el fondo marino. La estructura de cimentación sobresale por encima de la superficie del agua 8 con una longitud 4b. La estructura de cimentación está unida a una pieza de transición 10, por ejemplo, a través de una conexión de lechada conocida habitualmente.

En este caso, por ejemplo, sobre la pieza de transición 10 está dispuesta una turbina eólica 12, pero también puede estar prevista una subestación, una estación transformadora o similar. Para cimentar la estructura de cimentación 4, ésta se embiste o se hace vibrar en el fondo marino 6.

En el presente caso se propone ahora, que la estructura de cimentación 4 esté formada por un elemento estructural hueco 14, como se muestra en la Figura 2. El elemento estructural hueco 14 está moldeado de hormigón y tiene una cara de extremo superior 14a y una cara del extremo inferior 14b. El elemento estructural hueco 14 es preferentemente cilíndrico hueco. El espesor de la pared del elemento estructural hueco 14 disminuye comenzando desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. Esto puede facilitar la cimentación en el fondo marino 6.

Los dos extremos distales del elemento estructural hueco 14 se muestran ampliados en la Figura 3. En la cara del extremo superior 14a del elemento estructural hueco 14 puede sobresalir desde la cara del extremo superior 14a un nervio circunferencial 16. Este nervio 16 se puede utilizar para absorber fuerzas de embestida o vibraciones de la herramienta de cimentación. El nervio 16 está hecho preferentemente de acero y es considerablemente más dúctil que el hormigón del elemento estructural hueco 14. Al embestir o vibrar, las fuerzas son absorbidas por el nervio 16, y dirigidas uniformemente hacia el elemento estructural hueco 14. De este modo se evitan daños a la cara del extremo superior 14a.

En la zona del extremo superior puede estar previsto un collarín circunferencial (también llamado faldón) 18. El collarín circunferencial 18 puede estar formado como estructura de aterrizaje, nervio o similar. El collarín 18 puede estar dispuesto a una distancia en la dirección axial de la cara del extremo superior 14a.

En la Figura 3 también se puede ver que el elemento estructural hueco 14 termina con una cara del extremo inferior 14b en el extremo inferior. La cara del extremo inferior 14b tiene una extensión radial menor que la cara del extremo superior 14a. Esto se debe al estrechamiento del elemento estructural hueco 14 desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. En la cara del extremo inferior 14b puede estar prevista una cuña 20, que está formada, por ejemplo, de acero. La cimentación se puede simplificar usando esta cuña. Los elementos 16, 18 y 20 son opcionales.

La Figura 4 muestra el elemento estructural hueco 14 según la Figura 3 con su extremo superior, una zona central y su extremo inferior. Los refuerzos 20 se muestran en la sección longitudinal. Se puede ver que la densidad del refuerzo 20 es mayor en los extremos superior e inferior que en una zona central.

El estrechamiento desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b puede tener lugar de manera diferente, como se muestra en las Figuras 5a-f. Cabe señalar que las figuras se representan de manera puramente esquemática y muy exageradas, para ilustrar el principio del estrechamiento gradual. Los dibujos no están a escala ni muestran la relación correcta entre tamaños. Más bien, los dibujos sólo pretenden ilustrar el principio.

La Figura 5a muestra el elemento estructural hueco 14, en el que el diámetro de una superficie lateral interior aumenta constantemente desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. El diámetro de la superficie lateral exterior es constante.

En la Figura 5b se muestra que el diámetro interior de la superficie lateral interior aumenta de manera escalonada desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. El diámetro de la superficie lateral exterior es constante.

La Figura 5c muestra que el diámetro de la superficie lateral exterior disminuye constantemente desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. El diámetro de la superficie lateral interior es constante.

La Figura 5d muestra cómo el diámetro de la superficie lateral exterior disminuye de manera escalonada desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b. El diámetro de la superficie lateral interior es constante.

La Figura 5e muestra cómo el diámetro de la superficie lateral interior aumenta constantemente desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b, y el diámetro de la superficie lateral exterior disminuye constantemente.

La Figura 5f muestra cómo el diámetro interior aumenta de manera escalonada desde la cara del extremo superior 14a hacia la cara del extremo inferior 14b, y el diámetro de la superficie lateral exterior disminuye de manera escalonada.

En las Figuras 6a y b se muestra un detalle 22 de un escalón. Un escalón según las Figuras 5b, 5d o 5f puede estar formado como una ranura hueca 24a como se muestra en la Figura 6a. Un escalón puede tener forma de cuña 24b, como se muestra en la Figura 6b.

La Figura 7 muestra un método para la cimentación de un elemento estructural hueco 14 en el mar. En primer lugar, los elementos estructurales huecos 14 se moldean a partir de hormigón, utilizando los métodos de encofrado deslizante y de encofrado trepador, y se secan en posición vertical. A continuación, se giran los elementos estructurales huecos 14 una vez 180° y se cargan en un barco 26.

Los elementos estructurales huecos, colocados en posición vertical en el barco 26, se transportan a un lugar de instalación, y allí se cimentan con una herramienta adecuada de cimentación 28. Los elementos estructurales huecos 14 ya están montados en el barco 26 de tal manera que la cara del extremo inferior 14b está en la parte inferior, y la cara del extremo superior 14a está en la parte superior, de modo que, al cimentar, la cara del extremo inferior 14b se coloca en el fondo marino 6, y el elemento estructural hueco 14 se embiste en el fondo marino por medio de la herramienta de cimentación 28.

Lista de números de referencia

2	turbina eólica
4	estructura de cimentación
6	fondo marino
8	superficie del agua
10	pieza de transición
12	turbina eólica
14	elemento estructural hueco
14a	cara del extremo superior
14b	cara del extremo inferior
16	nervio

18	collarín
20	refuerzo
22	detalle
24a	ranura hueca
24b	cuña
26	barco
28	herramienta de cimentación

REIVINDICACIONES

1. Una estructura de cimentación de una turbina eólica que comprende:

un elemento estructural hueco que tiene una pared circunferencial, que se extiende en la dirección longitudinal, estando la pared delimitada en la parte superior por una cara del extremo superior y delimitada en la parte inferior por una cara del extremo inferior, por lo que
la pared está formada por un material de construcción mineral,
caracterizada por que
un espesor de pared de la pared se estrecha desde la parte superior de la cara del extremo superior, en el estado instalado, hacia la parte inferior de la cara del extremo inferior, en el estado instalado.

2. La estructura de cimentación de una turbina eólica según la reivindicación 1,
caracterizada por que
el elemento estructural hueco es cilíndrico hueco, y/o
un espesor de pared de la pared se estrecha constantemente a lo largo de al menos de partes de una extensión longitudinal del elemento estructural hueco, o
un espesor de pared de la pared se estrecha de manera escalonada a lo largo de partes de una extensión longitudinal del elemento estructural hueco.

3. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
el diámetro interior del elemento estructural hueco aumenta debido al estrechamiento, y/o el diámetro exterior del elemento estructural hueco disminuye debido al estrechamiento.

4. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
el material de construcción contiene al menos una parte de cemento, y/o
el material de construcción tiene una relación agua-cemento inferior a 0,45, en particular inferior a 0,5 o inferior a 0,3, y/o
el material de construcción presenta una clase de resistencia de al menos C40/50, preferentemente C70/80, en particular C100/115 según EN 206 y EN 1992, y/o
el material de construcción presenta un contenido de poros inferior al 5%, preferentemente inferior al 3%, en particular inferior al 2%, y/o
el material de construcción presenta un contenido de cemento de al menos 350 kg/m^3, preferentemente más de 450 kg/m^3, en particular más de 550 kg/m^3, en particular hasta 600 kg/m^3, y/o
en una medición simétrica de poros mediante presión de mercurio, el material de construcción tiene una porosidad P_{28d} inferior del 12% en volumen, en particular inferior del 10% en volumen, y P_{90d} inferior del 10% en volumen, en particular inferior del 8% en volumen.

5. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
la pared está pretensada mecánicamente, en particular con una fuerza de pretensado de más del 5 %, en particular más del 15 % de la resistencia a la compresión de la pared, aplicándose la fuerza de pretensado preferentemente en la dirección longitudinal.

6. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
el material de construcción está reforzado con metal, y/o
el refuerzo tiene un recubrimiento de hormigón no inferior a 26 mm, preferentemente no inferior a 40 mm, y/o
el material de construcción está reforzado con acero de refuerzo inoxidable ferrítico, que tiene un contenido de cromo que no supera el 18 M%, y/o
el material de construcción está reforzado con acero de refuerzo inoxidable austenítico, que contiene al menos un 5%, en particular entre un 8% y un 14% de níquel, y entre un 12% y un 22% de cromo, en particular entre un 15% y un 20% de cromo, y/o
el material de construcción está reforzado con acero de refuerzo inoxidable ferrítico-austenítico, que contiene al menos un 18 M% de cromo y entre un 2 M% y un 8 M% de níquel.

7. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
la parte superior de la cara del extremo superior está reforzada metálicamente, en particular, que un refuerzo metálico sobresale de la parte superior de la cara del extremo superior,
en particular, sobresale completa y circunferencialmente de la parte superior de la cara del extremo superior, y/o
la densidad del refuerzo en una zona extrema del elemento estructural hueco es mayor en la parte superior de la cara del extremo superior y/o de la parte inferior de la cara del extremo inferior, que en una zona central del elemento estructural hueco.

8. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
un diámetro interior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco aumenta, particularmente de manera cónica, hacia la parte superior de la cara del extremo superior.

9. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
en una superficie lateral interior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco se forma un tope dirigido radialmente hacia dentro.

10. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
en una superficie lateral exterior de la pared en una zona extrema del elemento estructural hueco se forma un collarín dirigido radialmente hacia fuera.

11. La estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores,
caracterizada por que
el material de construcción está sellado, en particular con una lámina de sellado.

12. Un método para la producción de una estructura de cimentación de una turbina eólica según una de las reivindicaciones anteriores, comprendiendo el método:

construcción de un encofrado en tierra, por lo que un espacio anular en el encofrado se estrecha desde un primer extremo hacia un segundo extremo,
verter hormigón líquido en el encofrado,
endurecer el hormigón de manera que el hormigón endurecido forme un elemento estructural hueco,
enviar el elemento estructural hueco a un lugar de instalación en alta mar, y
cimentar mediante embestida o vibración el elemento estructural hueco en un fondo marino con una parte inferior de la cara del extremo inferior, en el estado instalado.

13. El método según la reivindicación 12,
caracterizado por que
el hormigón se endurece en un autoclave, en particular el hormigón se sella.

14. El método según una de las reivindicaciones anteriores 12-13,
caracterizado por que
una pared se fabrica en un encofrado deslizante o en un encofrado trepador.

15. El método según una de las reivindicaciones anteriores 12 a 14,
caracterizado por que
el primer extremo del encofrado está en un lado inferior y el segundo extremo del encofrado está en un lado superior, que el elemento estructural hueco seco se gira 180° después de endurecer y se cimenta a continuación, en particular que el elemento estructural hueco se envía en una posición vertical al lugar de instalación en alta mar.

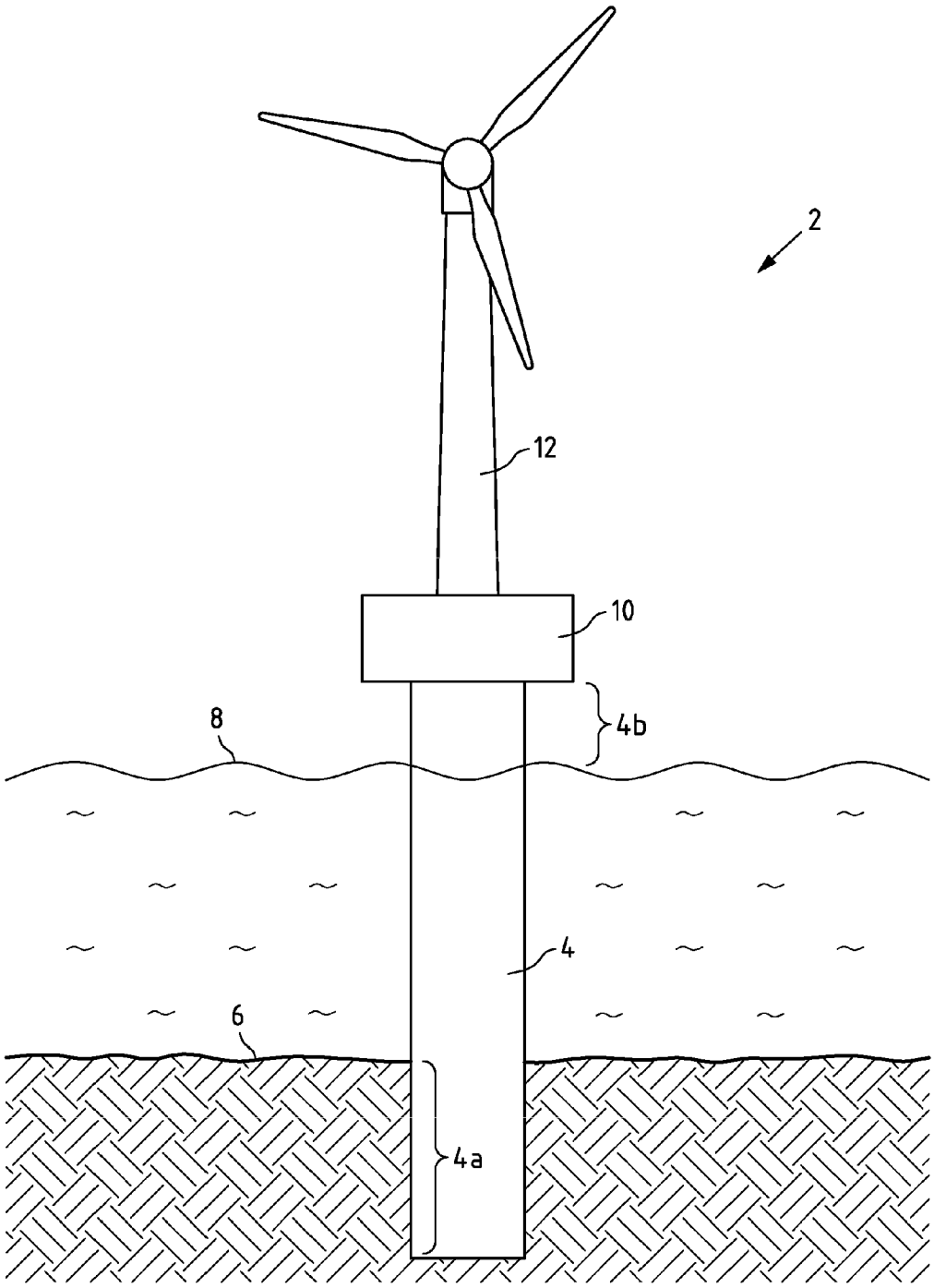

Fig.1

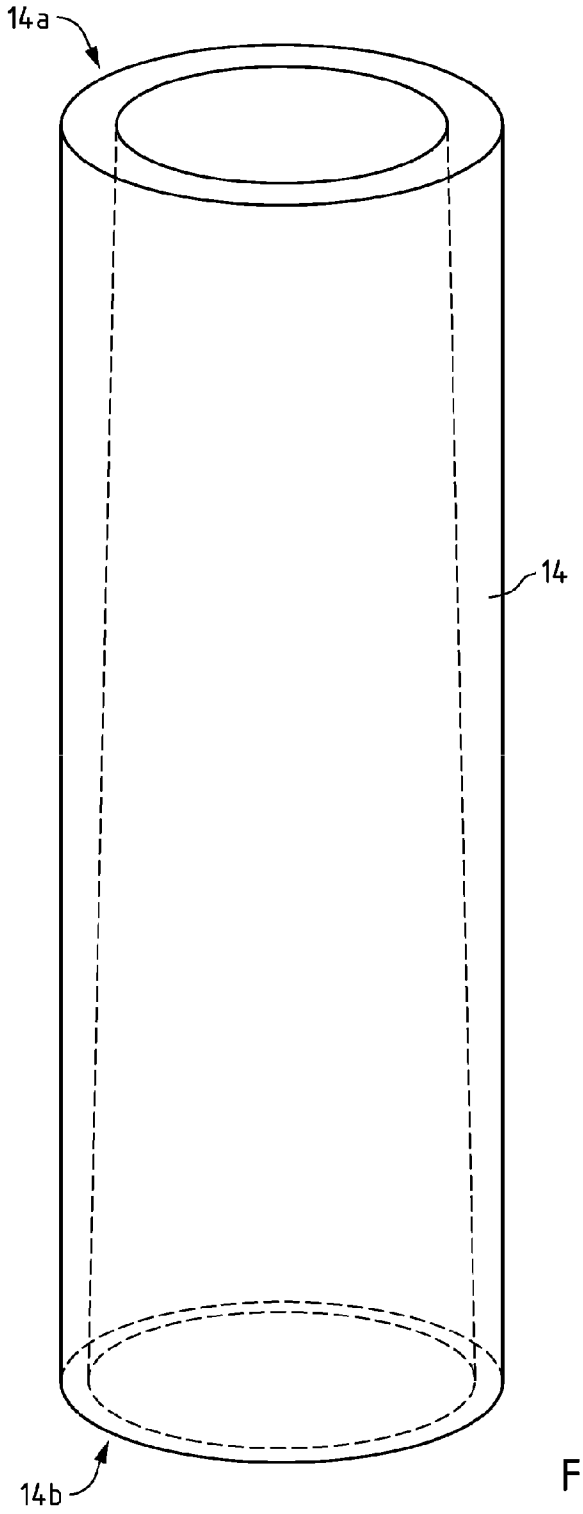

Fig.2

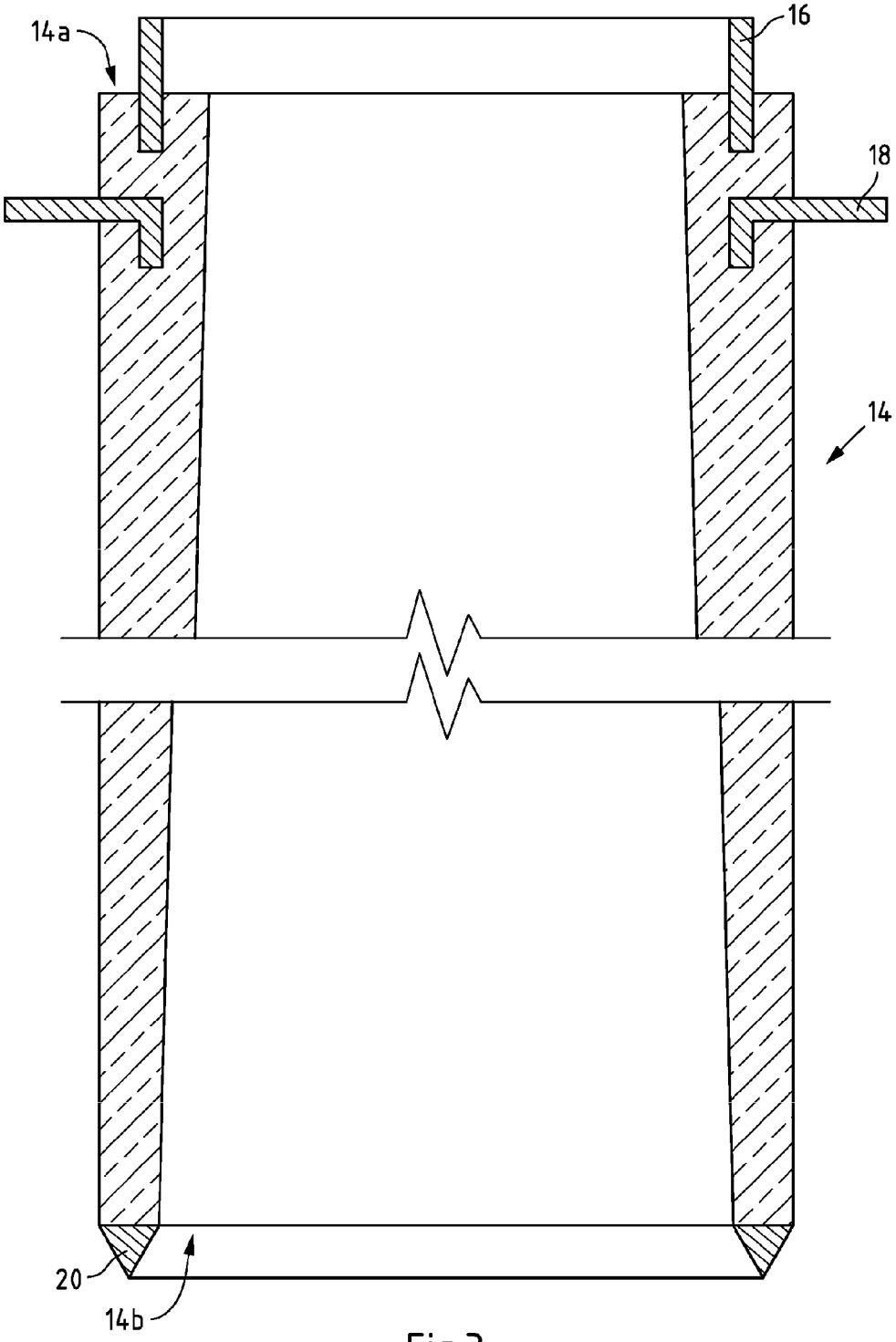

Fig.3

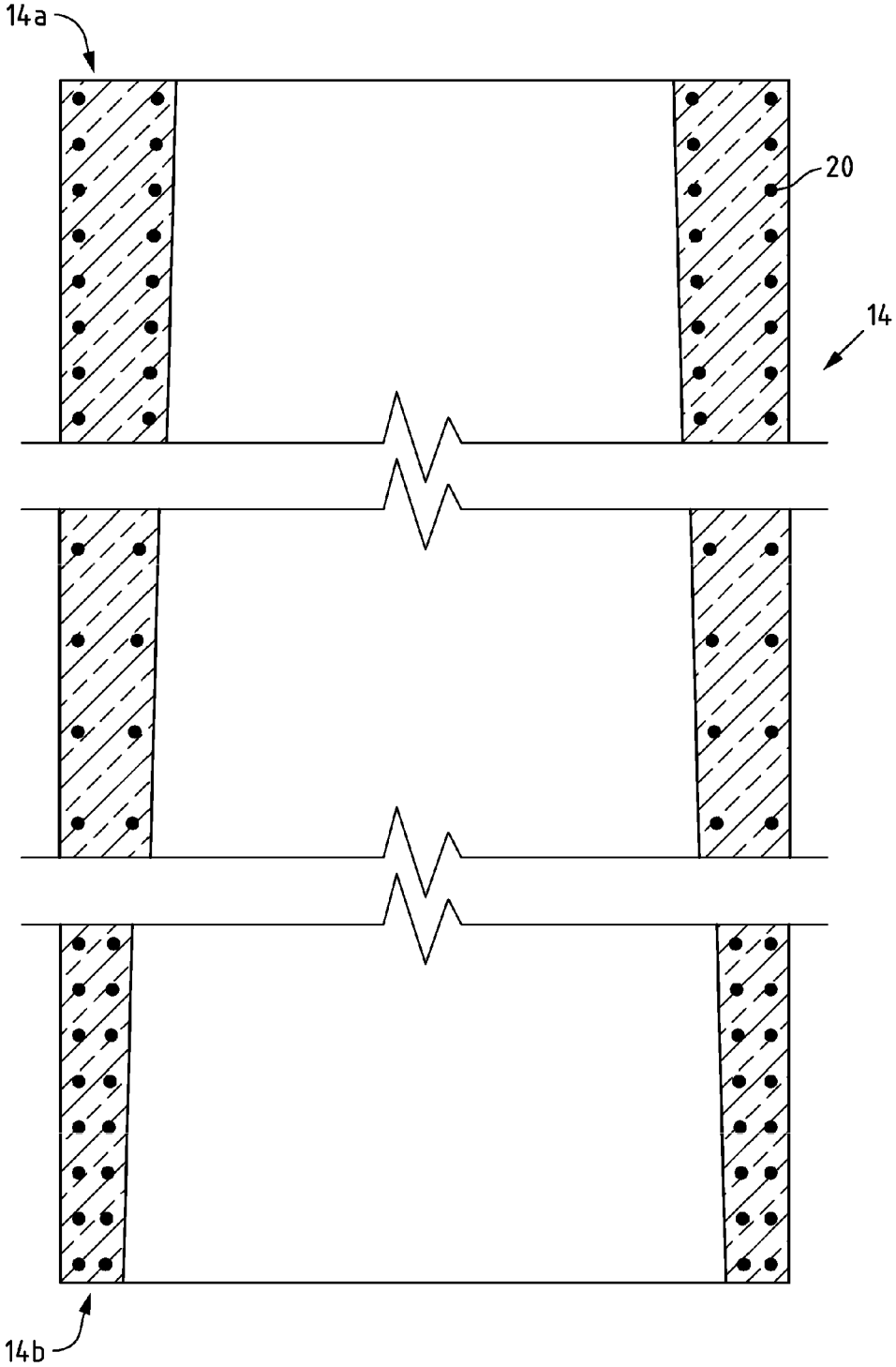

Fig.4

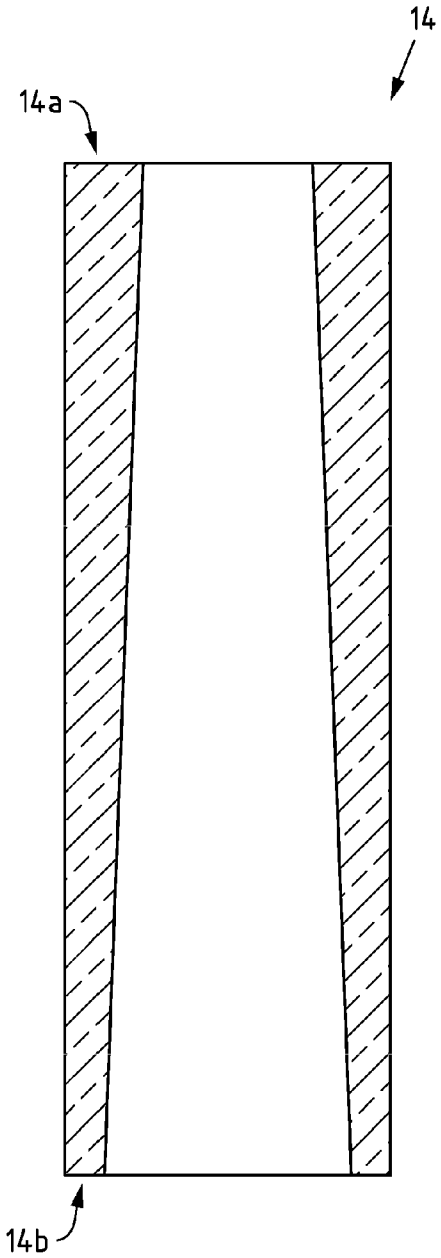

Fig.5a

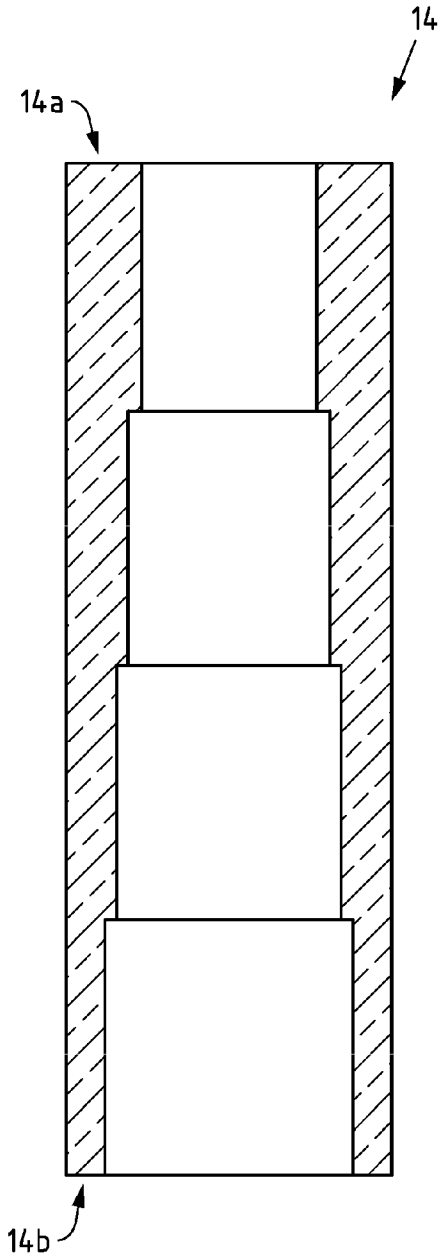

Fig.5b

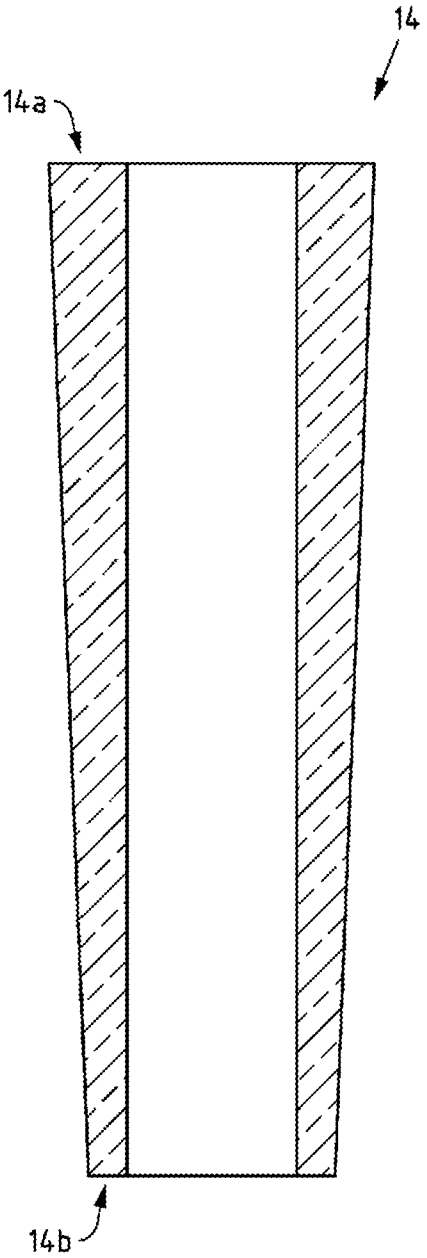

Fig.5c

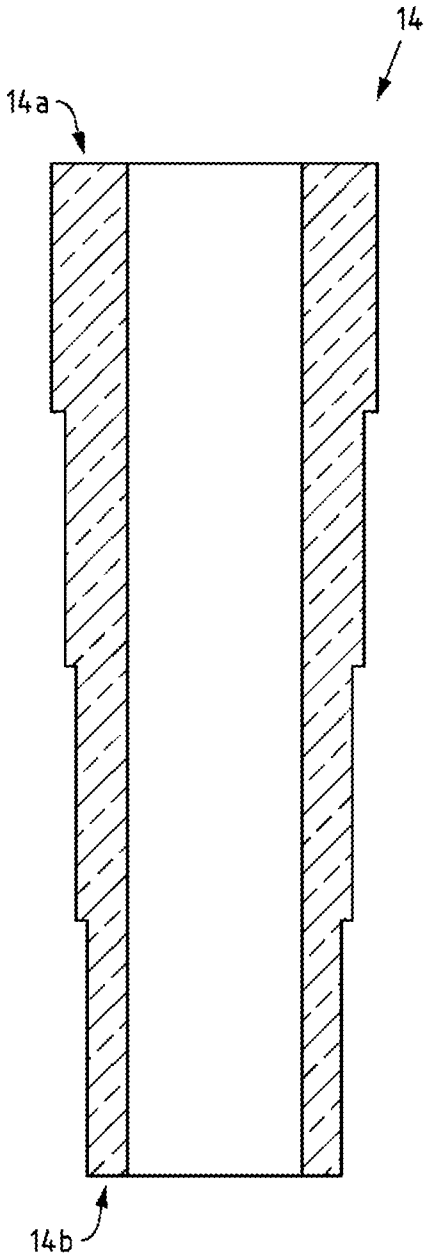

Fig.5d

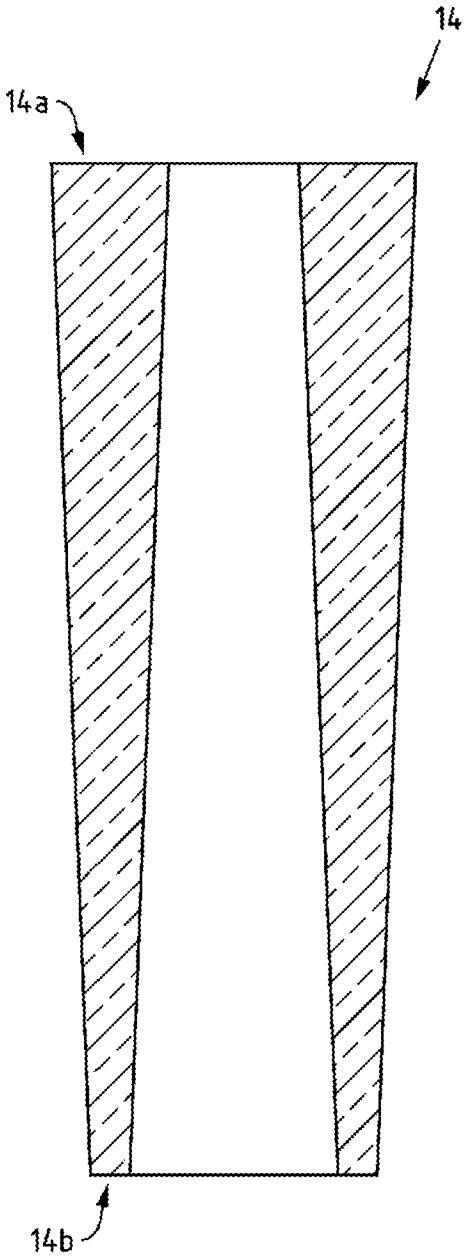

Fig.5e

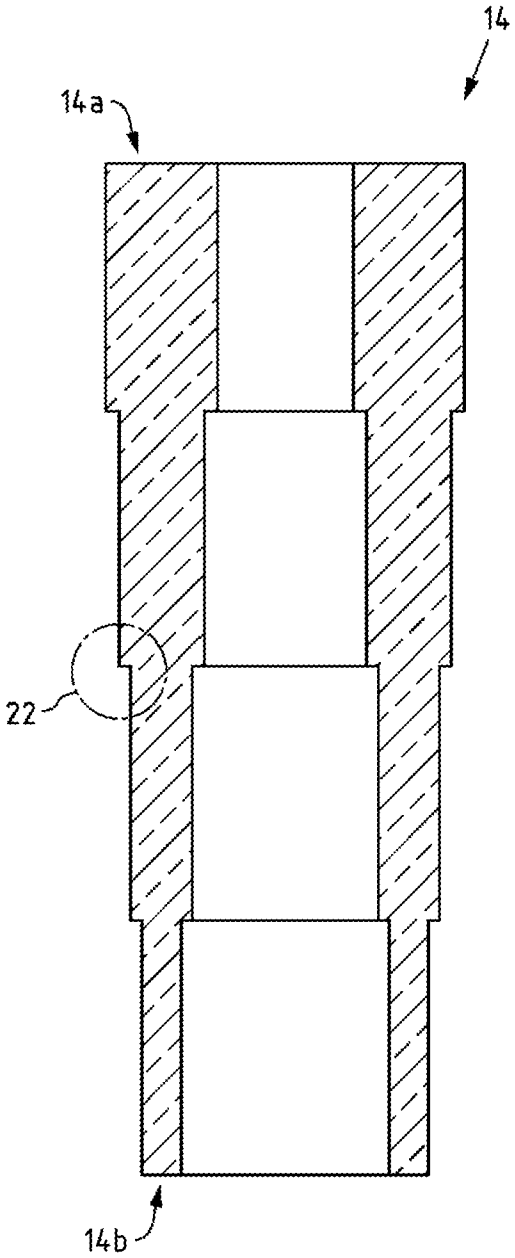

Fig.5f

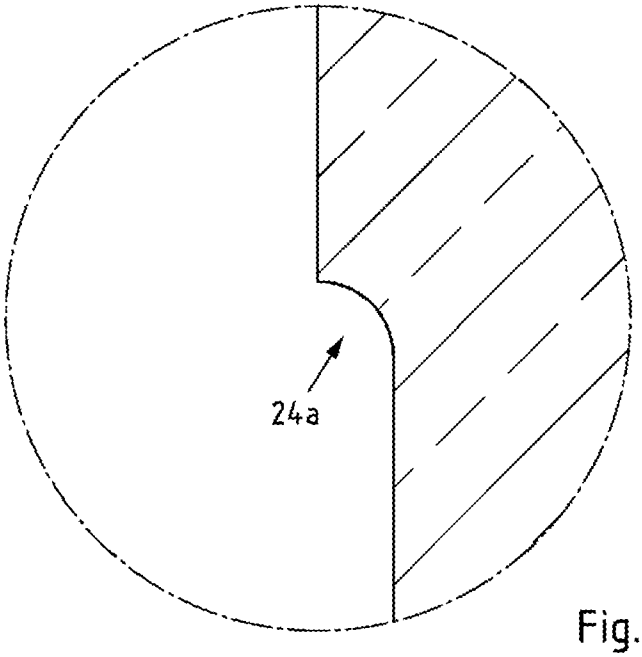

Fig.6a

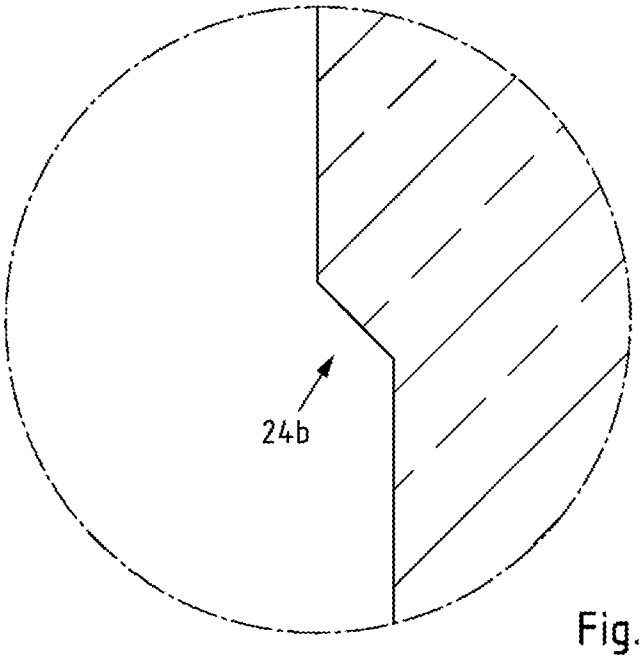

Fig.6b

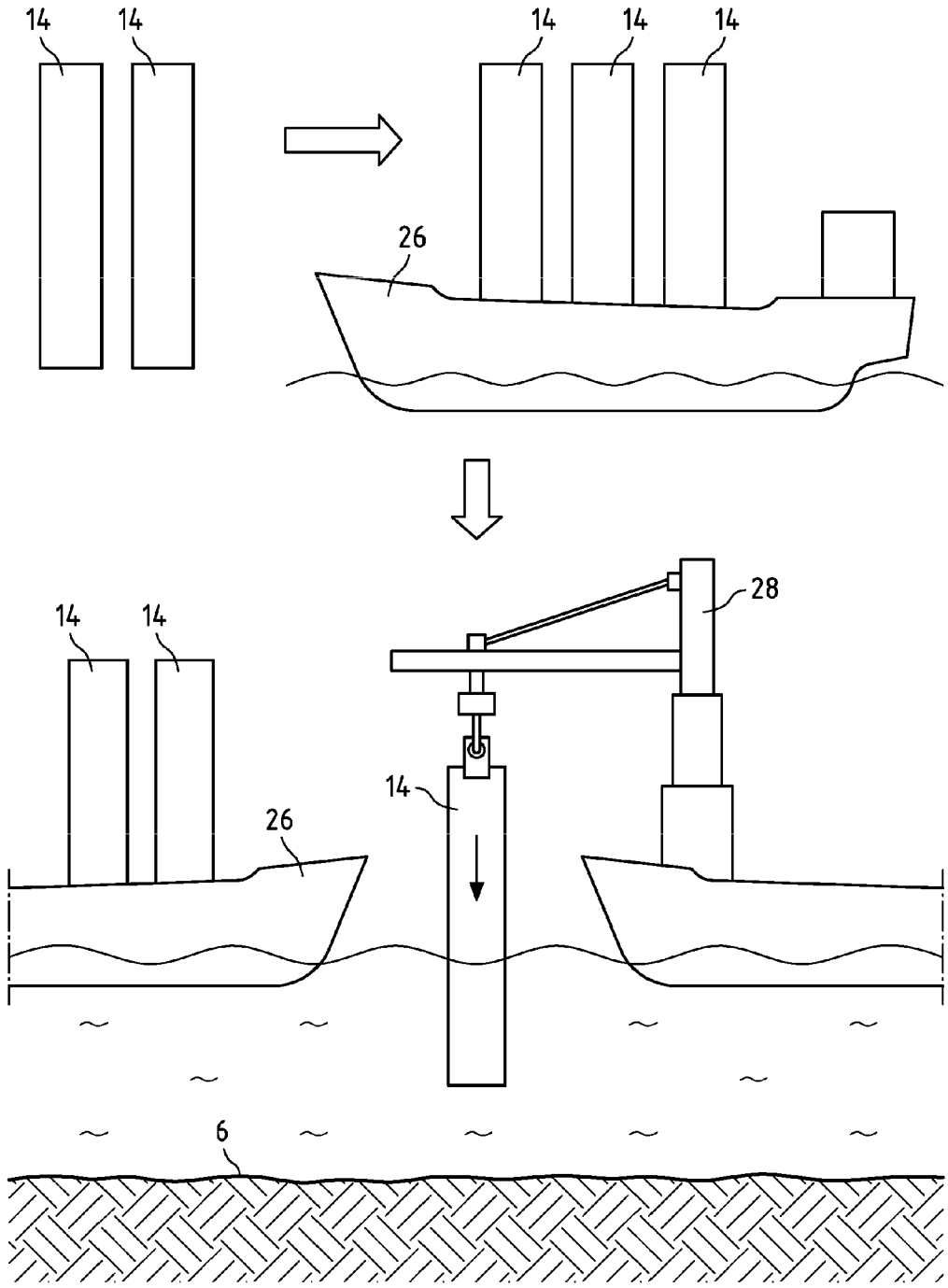

Fig.7