

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 865 673**

51 Int. Cl.:

G01N 3/32 (2006.01)

G01M 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **01.04.2014** **PCT/EP2014/056535**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.10.2014** **WO14161858**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **01.04.2014** **E 14715263 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.03.2021** **EP 2981803**

54 Título: **Ensayo de fatiga de una muestra de ensayo**

30 Prioridad:

03.04.2013 NL 2010556

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

15.10.2021

73 Titular/es:

**ONDERZOEKSCENTRUM VOOR AANWENDING
VAN STAAL N.V. (100.0%)
Pres. J.F. Kennedylaan 3
9060 Zelzate, BE**

72 Inventor/es:

**VAN WITTENBERGHE, JEROEN STIJN JULIAAN
y
THIBAU, PHILIPPE OCTAVE**

74 Agente/Representante:

PONTI & PARTNERS, S.L.P.

ES 2 865 673 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

Ensayo de fatiga de una muestra de ensayo

5 **[0001]** La invención se refiere al ensayo de fatiga de una muestra de ensayo.

[0002] En estructuras sometidas a cargas mecánicas variables, pueden producirse daños debido al agrietamiento por fatiga. Ya en la etapa de diseño de una estructura, la resistencia de la estructura al agrietamiento por fatiga debe evaluarse para que el diseño pueda optimizarse. Sin embargo, en la práctica es difícil obtener datos
10 confiables para evaluar la resistencia a la fatiga de una estructura, en particular cuando hay soldaduras u otros tipos de juntas presentes.

[0003] Las soldaduras se comportan de manera diferente del material de base no alterado. La resistencia a la fatiga de las soldaduras depende de varios parámetros, como la geometría de la soldadura, el procedimiento de soldadura que se ha aplicado, el material base y el material de relleno que se ha utilizado y el tipo y la dirección de las
15 cargas mecánicas a las que se someterá la soldadura.

[0004] Al evaluar la resistencia de una estructura a la fatiga, es práctica común calcular primero los niveles esperados de esfuerzo mecánico en la estructura. Estos niveles calculados de esfuerzo mecánico se comparan
20 entonces con las llamadas curvas S-N, que muestran la relación entre el nivel de esfuerzo mecánico y el número de ciclos de carga antes de la falla. Las curvas S-N están disponibles para situaciones estándar típicas, pero estas situaciones estándar muy a menudo difieren significativamente de la situación real en la estructura, por ejemplo, porque en la situación real se utilizan elementos de paredes gruesas que tienen un comportamiento material diferente que los elementos de paredes delgadas. Por lo tanto, la vida útil de una estructura es difícil de predecir de una manera
25 confiable, y a menudo se aplican factores de seguridad significativos en los cálculos. Sin embargo, esto puede conducir a estructuras que son innecesariamente pesadas y/o costosas.

[0005] Para poder hacer una mejor predicción de la vida útil esperada de una estructura, se pueden llevar a cabo ensayos de fatiga. A menudo, se realizan ensayos de fatiga en la estructura real (por ejemplo, la pala de un aerogenerador). En particular, cuando se van a poner a prueba grandes estructuras, esto es complicado y poco
30 práctico. Hay que manipular grandes objetos y aplicar grandes fuerzas alternas, lo que da lugar a grandes bancos de ensayo y a un elevado consumo de energía.

[0006] En el Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering de agosto de 2012, vol. 134, se publicó un artículo titulado "Resonant Bending Fatigue Test Setup for Pipes With Optical Displacement Measuring System". Este
35 artículo describe el ensayo de una muestra de ensayo que está formada por dos tuberías, cuyas tuberías están dispuestas con sus ejes longitudinales alineados entre sí, estando un extremo de una tubería conectado a un extremo de la otra tubería. La conexión entre las tuberías podría ser una soldadura (por ejemplo, una soldadura de circunferencia) o una conexión roscada. Esto hace que la muestra de ensayo sea una tubería larga con una conexión
40 de soldadura o roscada en el medio.

[0007] Esta muestra de ensayo conocida está dispuesta en soportes y un accionamiento con un peso excéntrico está conectado a uno de los extremos libres de la muestra de ensayo. El peso excéntrico se gira, lo que provoca fuerzas de desequilibrio que se ejercen sobre la muestra de ensayo a una frecuencia de excitación, causando
45 así vibración forzada de la muestra de ensayo. La frecuencia de excitación se elige de modo que esté cerca de una frecuencia natural que tiene una forma de modo asociada en forma de una onda estacionaria que gira a la frecuencia de excitación. Por lo tanto, la onda estacionaria induce la flexión rotacional de la muestra de ensayo. Los soportes de los bancos de ensayo están dispuestos de tal manera que soportan la muestra de ensayo en los nodos de la onda estacionaria.

50 **[0008]** Esta forma de modo particular se produce debido a que la muestra de ensayo tiene una forma axisimétrica.

[0009] Esta forma conocida de ensayo de fatiga no es adecuada para obtener datos que sean adecuados para
55 determinar la vida útil de las juntas entre elementos estructurales que no son coaxiales, es decir, juntas entre dos elementos estructurales que se encuentran en un ángulo relativo distinto de 0° o 180°. Por ejemplo, la geometría de soldadura y los procedimientos de soldadura que se utilizan para conectar elementos estructurales no coaxiales entre sí son demasiado diferentes de lo que se utiliza para conectar elementos estructurales coaxiales. También las cargas mecánicas en las juntas entre elementos estructurales que no son coaxiales y las juntas entre elementos estructurales
60 coaxiales son demasiado diferentes, por ejemplo, porque estas cargas mecánicas actúan en una dirección diferente.

[0010] Además, se sabe desde la técnica someter las palas de los aerogeneradores a ensayos de fatiga por flexión resonante biaxial. Esto se describe, por ejemplo, en los documentos US2011/0041617 y US2010/0263448. Sin embargo, las palas de los aerogeneradores son esencialmente de forma cilíndrica y, como tales, no contienen como
65 parte de su propia estructura un elemento que se extienda en un ángulo relativo distinto de 0° o 180° desde su dirección

longitudinal. A veces, partes de los bancos de ensayo están dispuestas en el aerogenerador que se va a poner a prueba, por ejemplo, para invocar la excitación de la pala del aerogenerador que se va a poner a prueba. Tales partes del banco de ensayo podrán extenderse en un ángulo relativo distinto de 0° o 180° desde la dirección longitudinal de la pala del aerogenerador, pero no forman parte de la muestra de ensayo, ya que la conexión de estas partes del banco de ensayo a las palas del aerogenerador no son conexiones que deban ponerse a prueba en el ensayo de fatiga de la pala del aerogenerador.

[0011] Las palas de los aerogeneradores que se utilizan como muestras de ensayo en los documentos US2011/0041617 y US2010/0263448 no contienen un elemento estructural que se extienda en un ángulo relativo distinto de 0° o 180° desde su dirección longitudinal ni una junta a dicho elemento estructural. Por lo tanto, la forma conocida de ensayo de fatiga como se describe en los documentos US2011/0041617 y US2010/0263448 tampoco es adecuada para obtener datos que sean adecuados para determinar la vida útil de las juntas entre elementos estructurales que no son coaxiales, es decir, juntas entre dos elementos estructurales que se encuentran en un ángulo relativo distinto de 0° o 180°.

[0012] El objeto de la invención es proporcionar una manera adecuada de realizar muestras de fatiga en una muestra de ensayo y proporcionar una combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo para hacerlo.

[0013] Este objeto se logra con la combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo según la reivindicación 1 y con el procedimiento según la reivindicación 11.

[0014] De acuerdo con la invención, se proporciona una combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo para realizar un ensayo de fatiga de dicha muestra de ensayo, donde la muestra de ensayo no es axisimétrica y comprende:

- un elemento central, dicho elemento central teniendo un eje longitudinal,
- un primer elemento de ramificación, dicho primer elemento de ramificación teniendo un eje longitudinal que se extiende en un ángulo con respecto al eje longitudinal del elemento central,
- una junta que conecta el primer elemento de ramificación al elemento central,

donde la muestra de ensayo no axisimétrica tiene una pluralidad de frecuencias de resonancia con formas de modo asociadas, cuya pluralidad de frecuencias de resonancia comprende una frecuencia de resonancia de flexión en plano con una forma en modo de flexión en plano asociada, y una frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano con una forma en modo de flexión fuera de plano asociada,

donde la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano son sustancialmente las mismas, y

donde la forma en modo de flexión en plano comprende un primer nodo, cuyo primer nodo está ubicado en el primer elemento de ramificación, y donde la forma en modo de flexión fuera de plano comprende un primer nodo, cuyo primer nodo está ubicado en el primer elemento de ramificación,

donde el primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y el primer nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el primer elemento de ramificación, y donde el banco de ensayo comprende:

- un primer soporte para soportar la muestra de ensayo, cuyo primer soporte soporta la muestra de ensayo en o adyacente al nodo de la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano,
- un excitador para someter la muestra de ensayo a vibración forzada a una frecuencia de excitación.

[0015] La muestra de ensayo según la invención tiene una forma no axisimétrica. Esto permite poner a prueba juntas que conectan elementos que se extienden bajo un ángulo distinto de 0° o 180° entre sí. Muchas estructuras que están sujetas a cargas variables, por ejemplo, chaquetas para aerogeneradores o plataformas de petróleo y gas, dependen de este tipo de juntas para su integridad estructural.

[0016] La muestra de ensayo según la invención está hecha preferentemente de metal. El metal puede ser, por ejemplo, acero. El acero puede estar recubierto o no recubierto y/o pintado o no pintado. Como alternativa, la muestra de ensayo puede estar hecha de plástico. Este plástico puede ser, por ejemplo, resina o un plástico termoplástico. La resina del material termoplástico se proporciona opcionalmente con fibras, por ejemplo, para refuerzo. Esas fibras pueden ser, por ejemplo, fibras de vidrio o fibras de carbono.

[0017] La muestra de ensayo comprende un elemento central. Este elemento central tiene un eje longitudinal. La muestra de ensayo comprende además un primer elemento de ramificación. Este primer elemento de ramificación tiene un eje longitudinal que se extiende en un ángulo distinto de 0° o 180° con respecto al eje longitudinal del elemento central. Una junta conecta el primer elemento de ramificación al elemento central. Esta junta será en general la parte de la muestra de ensayo en la que se enfoca la muestra de fatiga.

[0018] Opcionalmente, la muestra de ensayo se proporciona con un segundo elemento de ramificación.

[0019] La presencia del primer elemento de ramificación y opcionalmente un segundo elemento de ramificación hace que la muestra de ensayo no solo no sea axisimétrica, sino también no cilíndrica.

5 **[0020]** La junta entre el primer elemento de ramificación y el elemento central y/o la junta entre el segundo elemento de ramificación y el elemento central puede adoptar muchas formas. Puede ser, por ejemplo, una soldadura o una conexión roscada o una conexión de brida o una parte de un elemento estructural fundido o una conexión pegada. En el caso de una conexión de brida, las bridas se pueden conectar mediante pernos y tuercas o de cualquier otra manera adecuada, por ejemplo, mediante una soldadura o mediante pegamento.

10

[0021] La muestra de ensayo es la estructura que se va a poner a prueba mediante la muestra de fatiga. La muestra de ensayo debe o puede fallar durante el ensayo de fatiga, dependiendo de la configuración del ensayo de fatiga. El banco de ensayo aplica la carga de fatiga sobre la muestra de ensayo y soporta la muestra de ensayo durante el ensayo de fatiga. El banco de ensayo debe permanecer intacto durante el ensayo de fatiga. El ensayo de fatiga debe diseñarse, por ejemplo, en términos de frecuencia de excitación y cargas mecánicas esperadas en el banco de ensayo, para garantizar esto.

15

[0022] De acuerdo con la invención, el elemento central, el elemento de ramificación y la junta entre el elemento central y el elemento de ramificación forman parte de la muestra de ensayo. Opcionalmente, existe una interfaz entre la muestra de ensayo y el banco de ensayo, por ejemplo, para imponer físicamente la carga de fatiga sobre la muestra de ensayo. Dicha interfaz no es parte de la muestra de ensayo y no contiene el elemento de ramificación y/o junta de acuerdo con la invención, ya que la interfaz y la conexión de la interfaz a la muestra de ensayo no son las partes que se pondrán a prueba en el ensayo de fatiga. La interfaz y la conexión de la interfaz a la muestra de ensayo deben permanecer intactas durante el ensayo de fatiga, mientras que la muestra de ensayo debe o puede fallar durante el ensayo de fatiga.

20

[0023] La muestra de ensayo según la invención no necesariamente tiene las mismas dimensiones que la estructura real para la cual se tiene que determinar la resistencia a la fatiga. La muestra de ensayo según la invención puede ser un modelo para la estructura real. Por lo tanto, la invención no se limita a un ensayo de fatiga de tamaño completo de la estructura real a evaluar o una copia del mismo.

25

[0024] Como cualquier objeto estructural, la muestra de ensayo tiene una pluralidad de frecuencias de resonancia con formas de modo asociadas. Estos incluyen modos de cuerpo rígido y formas de modo que causan la deformación de la muestra de ensayo. Entre las formas de modo que causan la deformación de la muestra de ensayo, dos formas de modo son de particular interés en vista de la invención.

30

[0025] Una de estas dos formas de modo interesantes es lo que se llama la "forma en modo de flexión fuera de plano". Esta es la forma en modo en la que la muestra de ensayo se deforma de tal manera que el primer elemento de ramificación se desvía fuera del plano definido por el eje longitudinal del elemento central y el eje longitudinal del primer elemento de ramificación.

35

[0026] La otra forma en modo interesante es lo que se llama la "forma en modo de flexión en plano". En esta forma en modo, el primer elemento de ramificación se desvía en este plano que está definido por el eje longitudinal del elemento central y el eje longitudinal del primer elemento de ramificación, de tal manera que el elemento central se mueve en la dirección de su eje longitudinal.

40

[0027] Se encontró que en muestras de ensayo que tienen una cierta geometría, las frecuencias de resonancia y también la ubicación de los nodos de estas formas de modo son sustancialmente las mismas.

50 **[0028]** Esto es más prominente en una muestra de ensayo que comprende un elemento central tubular, un primer elemento de ramificación tubular y un segundo elemento de ramificación tubular. Los ejes longitudinales del elemento central, el primer elemento de ramificación y el segundo elemento de ramificación están todos en el mismo plano y los dos elementos de ramificación están conectados al elemento central en el mismo nivel, es decir, a la misma distancia del extremo superior o extremo inferior del elemento central, preferentemente a mitad del elemento central. El ángulo entre el eje longitudinal del elemento central y el eje longitudinal de cada elemento de ramificación está entre aproximadamente 45° y aproximadamente 135°, y preferentemente este ángulo es el mismo para ambos elementos de ramificación. Opcionalmente, el ángulo entre el eje longitudinal del elemento central y el eje longitudinal de cada elemento de ramificación está entre aproximadamente 30° y aproximadamente 150°, y preferentemente este ángulo es el mismo para ambos elementos de ramificación.

55

[0029] Sin embargo, las frecuencias de resonancia deseadas y las ubicaciones deseadas de los nodos de las formas de modo también se pueden lograr con muestras de ensayo que tienen una geometría que es una variante de esta geometría particular, por ejemplo, muestras de ensayo que tienen solo un elemento de ramificación, o el primer elemento de ramificación está conectado al elemento central a un nivel diferente del segundo elemento de ramificación, o dos elementos de ramificación que no se extienden en el mismo plano. Con este tipo de geometrías, generalmente

60

la distribución de peso dentro de la muestra de ensayo tendrá que optimizarse para crear la proximidad deseada de las frecuencias de resonancia y opcionalmente la ubicación deseada de los nodos. Esto puede lograrse, por ejemplo, proporcionando pesos de ensayo adicionales en ubicaciones estratégicas de la muestra de ensayo, y/o llenando al menos una parte de la muestra de ensayo con un líquido tal como agua, y/o variando localmente el espesor de pared de un elemento de ramificación y/o el elemento central. En caso de que se usen dos o más elementos de ramificación, la geometría de diferentes elementos de ramificación (por ejemplo, longitud, diámetro, espesor de pared) puede ser diferente. Es posible que la distribución de peso pueda ser no simétrica para obtener las frecuencias de resonancia y/o formas de modo deseadas. Por ejemplo, podría ser que se tenga que agregar un peso de ensayo adicional tanto al primer elemento de ramificación como al segundo elemento de ramificación, pero que el tamaño del peso de ensayo adicional en el primer elemento de ramificación es diferente del peso de ensayo adicional que se tiene que agregar al segundo elemento de ramificación, y/o que el peso de ensayo adicional en el primer elemento de ramificación tendría que estar dispuesto más cerca del elemento central que el peso de ensayo adicional en el segundo elemento de ramificación. De manera alternativa o adicional, es posible disponer uno o más pesos de ensayo adicionales no coaxiales con un elemento de ramificación, por ejemplo, disponiéndolo de manera que no sea axisimétrico con respecto al eje longitudinal de un elemento de ramificación. Esto se puede hacer, por ejemplo, disponiendo un peso de ensayo adicional en la parte superior o en la parte frontal del elemento de ramificación, y no disponiendo un peso de ensayo adicional diametralmente opuesto a este.

[0030] Sin embargo, en una estrategia diferente, en lugar de o además del cambio en la distribución de peso para obtener las frecuencias de resonancia deseadas y las ubicaciones deseadas de los nodos de las formas de modo, se unen refuerzos, por ejemplo, placas de refuerzo, al elemento de ramificación o elementos de ramificación. Opcionalmente, el refuerzo se une al elemento de ramificación o elemento central mediante soldadura.

[0031] Dicho refuerzo puede extenderse entre un elemento de ramificación y el elemento central, pero además o como alternativa, un refuerzo individual está unido a un único elemento de ramificación solamente, o al elemento central solamente. En realizaciones en las que dos o más elementos de ramificación están presentes, es posible que cada elemento de ramificación se proporcione con su propio refuerzo o refuerzos.

[0032] Los refuerzos cambian la rigidez en una o más direcciones del elemento de ramificación o elemento central al que están unidos. El refuerzo puede disponerse, por ejemplo, de manera que la rigidez de la muestra de ensayo en la dirección que es relevante para el modo de flexión en plano aumente, pero que la rigidez de la muestra de ensayo en la dirección que es relevante para el modo de flexión fuera de plano no cambie o apenas cambie. Por supuesto, también es posible que el refuerzo esté dispuesto de manera que aumente la rigidez de la muestra de ensayo en la dirección que es relevante para el modo de flexión fuera de plano, pero que la rigidez de la muestra de ensayo en la dirección que es relevante para el modo de flexión en plano no cambie o apenas cambie. El uso de dicho refuerzo permite cambiar selectivamente el comportamiento de resonancia de la muestra de ensayo en los diferentes modos de flexión.

[0033] En una posible realización, se une un refuerzo a un elemento de ramificación entre el área en la que el elemento de ramificación se acopla mediante el soporte del banco de ensayo y la junta que conecta dicho elemento de ramificación y el elemento central.

[0034] En una posible realización, se proporcionan múltiples refuerzos en un elemento de ramificación o en cada elemento de ramificación y/o en el elemento central.

[0035] En una posible realización, el refuerzo es una placa de refuerzo que está unida a un elemento de ramificación en la dirección longitudinal de dicho elemento de ramificación.

[0036] En una realización posible, al menos un refuerzo es una placa de refuerzo, cuya placa de refuerzo se extiende en la dirección longitudinal del elemento de ramificación al que está conectado, y en el plano de la forma del modo de flexión fuera de plano o en el plano de la forma del modo de flexión en plano.

[0037] En la muestra de ensayo, los factores de concentración de esfuerzos están asociados con la junta. Estos factores de concentración de esfuerzos son diferentes en diferentes ubicaciones dentro de la junta, dependiendo, por ejemplo, de los diámetros y espesores relativos de los elementos centrales y de ramificación, pero también de la dirección de las cargas mecánicas que se aplican a la muestra de ensayo. Esto significa que los niveles de esfuerzo serán diferentes en la junta en las ubicaciones que son sensibles al modo de flexión en plano que en las ubicaciones que son sensibles al modo de flexión fuera de plano, incluso si se aplican las mismas cargas mecánicas. La dirección de la deformación debido a la resonancia del modo de flexión en plano con respecto al plano en el que se extiende el refuerzo es diferente de la dirección de la deformación debido a la resonancia del modo de flexión fuera de plano con respecto al plano en el que se extiende el refuerzo, y con los diferentes factores de concentración de esfuerzos, causan diferentes amplitudes de esfuerzo en la junta en estas diferentes direcciones.

[0038] En una posible realización, la frecuencia de ensayo se selecciona más cerca de la frecuencia de resonancia del modo de flexión que se asocia con la concentración de esfuerzos más baja en la junta que de la

frecuencia de resonancia del modo de flexión que se asocia con la concentración de esfuerzos más alta en la junta. Esto hace que la muestra de ensayo, y en particular la junta o juntas entre el elemento central y un elemento de ramificación, aún reciba el nivel deseado de esfuerzos mecánicos en el modo de flexión que se asocia con las concentraciones de esfuerzos más bajas.

5

[0039] Cambiar la distribución de peso o aplicar refuerzos en uno o más elementos de ramificación y/o el elemento central también se puede aplicar en muestras de ensayo en las que las frecuencias de resonancia y las ubicaciones de los nodos de las formas de modo ya son sustancialmente las mismas. En esos casos, se puede aplicar cambiar la distribución de peso o aplicar refuerzos en uno o más elementos de ramificación y/o el elemento central para cambiar las frecuencias de resonancia hacia un valor deseado (por ejemplo, dentro del intervalo que el excitador puede aplicar) o para cambiar la posición de los nodos a una ubicación deseada.

10

[0040] "Sustancialmente las mismas frecuencias de resonancia" debe entenderse como que en caso de que la frecuencia de excitación se elija cerca de las dos frecuencias de resonancia, ambas formas de modo se excitan sin tener que aplicar grandes cantidades de energía para obtener suficiente deformación y esfuerzo mecánico en la junta para realizar el ensayo de fatiga. Se encontró que, si la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es aproximadamente 80 % o más de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, esto ya produce el efecto de acuerdo con la invención. Preferentemente, la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es aproximadamente 85 % o más de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano. Más preferentemente, la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es de alrededor de 90 % o más de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano.

25

[0041] Por lo tanto, cuando la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es aproximadamente 80 % o más de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano se consideran "sustancialmente las mismas".

30

[0042] Cabe señalar que generalmente no es deseable usar una frecuencia de excitación que sea exactamente la misma que una de las frecuencias de resonancia. En caso de que la muestra de ensayo se excite exactamente en una de sus frecuencias de resonancia, los niveles de vibración podrían salirse de control.

35

[0043] La ventaja de elegir una frecuencia de excitación cercana a la frecuencia de resonancia es que se necesita una cantidad relativamente pequeña de energía para crear y mantener la vibración en la muestra de ensayo. En general, una frecuencia de excitación dentro de un intervalo entre alrededor de 90 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano a alrededor de 110 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano produce buenos resultados. Tener una frecuencia de excitación dentro de un intervalo entre alrededor de 80 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano a alrededor de 120 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es generalmente aceptable. En el procedimiento de la invención, la frecuencia de excitación estará generalmente en el intervalo de alrededor de 80 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano a alrededor de 120 % de la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano. No es necesario que la frecuencia de excitación esté entre las dos frecuencias de resonancia. En particular, cuando las frecuencias de resonancia están muy cerca entre sí, por ejemplo, 2 Hz o menos separadas, a menudo será más práctico usar una frecuencia de excitación que esté por debajo de la frecuencia de resonancia más baja de las dos o por encima de la frecuencia de resonancia más alta de las dos.

50

[0044] De acuerdo con la invención, el primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y el primer nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el primer elemento de ramificación. El "primer nodo" es un nodo de una forma en modo que se encuentra en el primer elemento de ramificación. En caso de que la muestra de ensayo también tenga un segundo elemento de ramificación, el segundo nodo de la forma en modo de flexión en plano y el segundo nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el segundo elemento de ramificación. El "segundo nodo" es un nodo de una forma de modo que está ubicado en el segundo elemento de ramificación.

55

[0045] "Sustancialmente la misma posición" de los nodos de las dos formas de modo significa que hay un área en cada elemento de ramificación donde la deformación del elemento de ramificación es baja cuando se excitan tanto la forma en modo de flexión en plano como la forma en modo de flexión fuera de plano. La deformación en esta área es lo suficientemente baja como para que sea práctico que el soporte o los soportes del banco de ensayo acoplen la muestra de ensayo en esta área en particular. Cuando un soporte del banco de ensayo acopla la muestra de ensayo en o cerca de un nodo, el soporte no tiene que absorber grandes desviaciones de la muestra de ensayo durante el ensayo de fatiga. Esto también hace que las cargas mecánicas (fuerza, energía) que deben ser absorbidas por el

60

65

soporte durante el ensayo de fatiga sean relativamente bajas. En la práctica, "el primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y el primer nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el primer elemento de ramificación" significa que la distancia desde el nodo en el primer elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano al nodo en el primer elemento de ramificación en la forma en modo de flexión fuera de plano debe ser aproximadamente igual o menor que el diámetro del primer elemento de ramificación. Del mismo modo, si un segundo elemento de ramificación está presente, "el segundo nodo de la forma en modo de flexión en plano y el segundo nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el segundo elemento de ramificación" significa que la distancia desde el nodo en el segundo elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano al nodo en el segundo elemento de ramificación en la forma en modo de flexión fuera de plano debe ser aproximadamente igual o menor que el diámetro del segundo elemento de ramificación.

[0046] En la práctica, la distancia entre el primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y el primer nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano será generalmente de 200 mm o menos, preferentemente 100 mm o menos.

[0047] Es ventajoso si las otras frecuencias de resonancia de la muestra de ensayo están relativamente lejos de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano. Preferentemente, otras frecuencias de resonancia son al menos un 25 % más altas que la frecuencia de resonancia de flexión en plano más alta y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano o al menos un 25 % más baja que la frecuencia de resonancia de flexión en plano más baja y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano. De esta manera, el excitador excita principalmente (o solo) la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano durante el ensayo de fatiga.

[0048] Opcionalmente, la muestra de ensayo tiene al menos una cavidad que se puede llenar con un líquido (por ejemplo, agua) o un gas (por ejemplo, aire comprimido o helio). Si se utiliza un gas, preferentemente es un gas comprimido, por lo que es un gas a presión. Es posible que la muestra de ensayo sea completamente hueco, de modo que una sola cavidad esté presente en el interior que se extienda hacia el elemento central, así como hacia el primer elemento de ramificación y, si está presente, hacia el segundo elemento de ramificación. También es posible que la muestra de ensayo comprenda una cavidad en el elemento central y una cavidad separada en el primer elemento de ramificación, y si hay un segundo elemento de ramificación presente, una cavidad separada adicional en el segundo elemento de ramificación.

[0049] La cavidad o cavidades se pueden usar para varios propósitos. Por ejemplo, llenar la cavidad o cavidades con una sustancia que tiene masa, tal como un líquido, puede cambiar la distribución del peso sobre la muestra de ensayo. Por lo tanto, puede ayudar a ajustar las frecuencias de resonancia de la muestra de ensayo, acercando la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano o generalmente reduciendo las frecuencias de resonancia. También puede ayudar a ajustar la posición de los nodos en la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano, acercándolos si se desea.

[0050] La cavidad o cavidades se pueden utilizar de manera alternativa o adicional para la detección de grietas. Si la junta o juntas a ensayar forman parte de la pared de la cavidad, y la cavidad se llena, por ejemplo, con un líquido o un gas, se producirá una fuga y una caída de presión una vez que una grieta haya crecido a través del espesor del material de la junta. Por ejemplo, cuando la junta es una soldadura, es probable que se formen grietas de fatiga en la soldadura antes de que se formen en el material base. En ese caso, tiene sentido que la soldadura forme parte de la pared de la cavidad cuando la cavidad se utiliza para la detección de grietas.

[0051] Cuando la cavidad o cavidades se llenan con un gas o líquido con el propósito de detectar grietas, es ventajoso medir la presión del gas o líquido en la cavidad, de modo que se pueda detectar una caída de presión rápidamente. Opcionalmente, la muestra de ensayo está equipada con uno o más soportes de sensor a los que, por ejemplo, se puede montar un sensor de presión.

[0052] En una posible realización, se aplica una presión negativa en la cavidad, de modo que la presión en la cavidad es inferior a la presión ambiente. Si la junta o juntas a ensayar forman parte de la pared de la cavidad, y se aplica una presión negativa en la cavidad, se producirá un cambio en la presión una vez que una grieta haya crecido a través del espesor del material de la junta. Por lo tanto, esta realización también permite la detección de grietas mediante la medición de la presión que está presente dentro de la cavidad. Opcionalmente, la muestra de ensayo está equipada con uno o más soportes de sensor a los que, por ejemplo, se puede montar un sensor de presión.

[0053] Otra forma de detección de grietas es monitorear los cambios en la forma del modo de la muestra de ensayo durante el ensayo. Como una grieta alterará la rigidez de la muestra de ensayo, al menos localmente, la forma del modo también cambiará un poco. Estos son generalmente cambios sutiles, en particular cuando la grieta sigue siendo pequeña. Sin embargo, es posible detectar dichos cambios midiendo el desplazamiento, la velocidad y/o la aceleración local de la muestra de ensayo. Preferentemente, el desplazamiento local, la velocidad local y/o la aceleración local se miden en una pluralidad de ubicaciones en la muestra de muestra. El desplazamiento, la velocidad

y/o la aceleración local se pueden medir, por ejemplo, mediante la disposición de sensores en la muestra de ensayo (opcionalmente, la muestra de ensayo se proporciona con soportes para hacerlo) o sin contacto, por ejemplo, de manera óptica.

5 **[0054]** Otra forma de detección de grietas sería usar galgas extensométricas, ya que la formación de una grieta conduce a la liberación de esfuerzo local cerca de la grieta.

[0055] Otras formas de detección de grietas son, por ejemplo, ensayos de tinte penetrante, ensayos de corriente parásita, ensayos ultrasónicos o imágenes de rayos X. Sin embargo, procedimientos como estos
10 generalmente requieren que el ensayo de fatiga se interrumpa o detenga para que se lleven a cabo los ensayos de grietas.

[0056] El excitador del banco de ensayo aplica una carga mecánica variable a la muestra de ensayo a una frecuencia de excitación, sometiendo la muestra de ensayo a vibración forzada a esta frecuencia de excitación.

15 **[0057]** Una forma adecuada de hacer esto implica el uso de un peso excéntrico giratorio en el excitador. El peso excéntrico giratorio causa fuerzas de desequilibrio, que se pueden aplicar a la muestra de ensayo para obtener vibración forzada de la muestra de ensayo. Las fuerzas de desequilibrio se pueden usar para excitar alternativamente el modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano.

20 **[0058]** En una posible realización, se conecta un peso excéntrico giratorio a un elemento de ramificación de la muestra de ensayo, por ejemplo, en el extremo libre del elemento de ramificación, de modo que en el extremo del elemento de ramificación este no está conectado al elemento central. El peso excéntrico giratorio es giratorio con respecto al elemento de ramificación; el elemento de ramificación no está girado. En dicha realización, el peso
25 excéntrico puede acoplarse a un motor eléctrico por medio de un eje cardán. Al seleccionar una velocidad de rotación del motor eléctrico, se puede configurar la frecuencia de excitación. Preferentemente, si se utiliza un motor eléctrico para accionar el excitador, el motor eléctrico está provisto de un sistema de control del motor que permite controlar, establecer y/o ajustar con precisión la velocidad de rotación del motor.

30 **[0059]** En general, preferentemente el excitador es ajustable, permitiendo que la frecuencia de excitación se establezca en un valor deseado.

[0060] En general, opcionalmente la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano se excitan de manera alterna por el excitador.

35 **[0061]** En casos prácticos, la frecuencia de excitación que se utiliza con el ensayo de fatiga de acuerdo con la invención podría estar entre 10 Hz y 60 Hz, por ejemplo. Esto es diferente de, por ejemplo, el ensayo de fatiga de palas de aerogeneradores, donde normalmente se utilizan frecuencias de excitación por debajo de 5 Hz.

40 **[0062]** El banco de ensayo comprende al menos un primer soporte para soportar la muestra de ensayo. Cuando la muestra de ensayo está dispuesta en o sobre el banco de ensayo, la muestra de ensayo está dispuesta de tal manera que el primer soporte del banco de ensayo soporta la muestra de ensayo en o adyacente al nodo de la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano. De esta manera, el banco de ensayo no
45 estará sujeto a grandes fuerzas dinámicas.

[0063] En una posible realización, el banco de ensayo se proporciona con un segundo soporte. En dicha realización, el primer soporte del banco de ensayo puede acoplar el primer elemento de ramificación y el segundo soporte puede acoplar el segundo elemento de ramificación.

50 **[0064]** Opcionalmente, al menos el primer soporte del banco de ensayo se puede mover de manera que su posición pueda coincidir con la ubicación del primer nodo del modo de flexión en plano y/o el modo de flexión fuera de plano. Opcionalmente, si también hay un segundo soporte en el banco de ensayo, el segundo soporte también es móvil. Sin embargo, esto no es necesario, porque si solo el primer soporte es móvil, todavía es posible soportar ambas
55 ramificaciones de la muestra de ensayo en o cerca de los primeros y los segundos nodos del modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano, en particular si el excitador también es flexible o móvil.

[0065] Opcionalmente, la muestra de ensayo se pone a prueba en condiciones de flotación libre. Sin embargo, también en dicha realización, se puede aplicar una correa o similar sobre la muestra de ensayo por razones de seguridad. Alternativamente, aunque lo más probable es que sea mucho menos común, la muestra de ensayo será
60 sujeta por los soportes del banco de ensayo más firmemente, de modo que no existan condiciones de flotación libre.

[0066] Opcionalmente, el banco de ensayo comprende disposiciones de seguridad para evitar la rotación de la muestra de ensayo. Estas disposiciones de seguridad, por ejemplo, comprenden una correa que se aplica sobre la muestra de ensayo, por ejemplo, en o cerca del soporte o soportes del banco de ensayo.

65

[0067] Los soportes del banco de ensayo están dispuestos en una base, por ejemplo, un piso o una estructura montada en un piso. En caso de que uno o más soportes sean móviles, generalmente son móviles con respecto a dicha base. El excitador generalmente también estará dispuesto en una base. Esta puede ser la misma base que la base sobre la que están dispuestos el soporte o soportes, pero también puede ser una base diferente. En ese caso, la base sobre la cual se disponen el soporte o soportes opcionalmente se aísla con respecto a la transferencia de vibración desde la base sobre la cual se dispone el excitador.

[0068] La combinación del banco de ensayo y la muestra de ensayo y el procedimiento para el ensayo de fatiga según la invención se puede usar para un amplio intervalo de tamaños de muestras de ensayo. También es adecuado para muestras de ensayo muy grandes, por ejemplo, muestras de ensayo que tienen un elemento central con un diámetro exterior de 500 a 2000 mm y un espesor de pared de 15 a 80 mm, y/o un elemento de ramificación de 200 a 1000 mm y un espesor de pared de 10 a 60 mm. Los elementos estructurales de tales tamaños se utilizan, por ejemplo, en camisas instaladas en el mar. Por lo tanto, la combinación del banco de ensayo y la muestra de ensayo y el procedimiento para realizar ensayos de fatiga de acuerdo con la invención es adecuada para evaluar la resistencia a la fatiga y/o la vida útil esperada de las juntas en este tipo de estructuras.

[0069] Es posible que la muestra de ensayo según la invención comprenda además uno o más refuerzos, puntales o similares. Dicho refuerzo o puntal podría, por ejemplo, extenderse entre el elemento central y el primer elemento de ramificación y/o, si un segundo elemento de ramificación está presente, entre el elemento central y el segundo elemento de ramificación.

[0070] La invención se refiere además a un procedimiento para realizar ensayos de fatiga en una muestra de ensayo, que comprende las siguientes etapas:

- proporcionar una combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo según la invención,
- disponer la muestra de ensayo en el banco de ensayo, de modo que el primer soporte del banco de ensayo soporte el primer elemento de ramificación en o adyacente al primer nodo tanto de la forma en modo de flexión en plano como de la forma en modo de flexión fuera de plano,
- someter la muestra de ensayo a vibración forzada por el excitador a una frecuencia de excitación cercana a la frecuencia de resonancia de flexión en plano y a la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, excitando así el modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano.

[0071] La invención se refiere además a un procedimiento para diseñar un ensayo de fatiga de una muestra de ensayo, en el que se utiliza una combinación de un banco de ensayo y una estructura de ensayo de acuerdo con la invención y cuyo ensayo de fatiga se lleva a cabo como se describió anteriormente.

[0072] Este procedimiento comprende las etapas siguientes:

- seleccionar una geometría de base para la muestra de ensayo, incluyendo la selección del número de elementos de ramificación que se conectarán al elemento central y la posición y dirección de estos elementos de ramificación,
- seleccionar la forma del elemento central y de cualquier elemento de ramificación,
- seleccionar la longitud y los tamaños de sección transversal (por ejemplo, el diámetro exterior y/o el espesor de pared) del elemento central y cualquier elemento de ramificación,
- calcular la frecuencia de resonancia de flexión en plano, la forma del modo de flexión en plano, la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, la forma del modo de flexión fuera de plano y opcionalmente cualquier frecuencia de resonancia adicional que puedan estar cerca de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y/o de la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano,
- determinar la diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano,
- evaluar si esta diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es lo suficientemente pequeña entre sí como para poder aplicar el procedimiento para realizar un ensayo de fatiga según la invención,
- determinar la diferencia en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma en modo de flexión fuera de plano,
- evaluar opcionalmente si esta diferencia en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma del modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma del modo de flexión fuera de plano es lo suficientemente pequeña entre sí como para poder aplicar el procedimiento para realizar un ensayo de fatiga según la invención,
- si la diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano o la diferencia opcionalmente calculada en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma en modo de flexión fuera de plano es demasiado grande, adaptar la distribución de peso en la muestra de ensayo y/o los tamaños de longitud y sección transversal del elemento central y cualquier elemento de ramificación y/o adaptar la rigidez de un elemento de ramificación y/o el elemento central en al menos una dirección mediante la unión de un refuerzo a dicho elemento de ramificación y/o elemento central con el fin de cambiar la ubicación de los nodos y/o las frecuencias de resonancia.

[0073] La invención se describirá con más detalle a continuación con referencia al dibujo, en el que de una manera no taxativa se mostrarán realizaciones ejemplares de la invención.

5 **[0074]** El dibujo se muestra en:

Fig. 1a: un primer ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista frontal,
 Fig. 1b: un primer ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista superior,
 Fig. 2a: un segundo ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista frontal,
 10 Fig. 2b: un segundo ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista superior,
 Fig. 3a: un tercer ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista frontal,
 Fig. 3b: un tercer ejemplo de una muestra de ensayo según la invención, en vista superior,
 Fig. 4: la forma en modo de flexión en plano, ilustrada en la muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1,
 Fig. 5: la forma del modo de flexión fuera de plano, ilustrada en la muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1,
 15 Fig. 6: un primer ejemplo de una combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo según la invención,
 Fig. 7: un segundo ejemplo de una combinación de un banco de ensayo y una muestra de ensayo según la invención,
 Fig. 8-16: ejemplos adicionales de muestras de ensayo según la invención,
 Fig. 17: un ejemplo adicional de una muestra de ensayo según la invención.
 20 La Fig. 1a muestra un primer ejemplo de una muestra de ensayo 1 según la invención, en vista frontal. La Fig. 1b muestra la misma muestra de ensayo 1 en la vista superior.

[0075] La muestra de ensayo 1 comprende un elemento central 2. El elemento central 2 está hecho de metal. Tiene un eje longitudinal 12. La muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1 comprende además un primer elemento
 25 de ramificación 3. El primer elemento de ramificación 3 también está hecho de metal y tiene un eje longitudinal 13. La muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1 comprende además un segundo elemento de ramificación 5. El segundo elemento de ramificación 5 también está hecho de metal y tiene un eje longitudinal 15.

[0076] En la muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1, una junta 4, por ejemplo, una soldadura, conecta el
 30 primer elemento de ramificación 3 al elemento central 2. Una junta 6, por ejemplo, una soldadura, conecta el segundo elemento de ramificación 5 al elemento central 2. El eje longitudinal 13 del primer elemento de ramificación 3 se encuentra en un ángulo relativo α_1 con respecto al eje longitudinal 12 del elemento central 2.

[0077] El eje longitudinal 15 del segundo elemento de ramificación 5 se encuentra en un ángulo relativo α_2 con
 35 respecto al eje longitudinal 12 del elemento central 2. En el ejemplo de la fig. 1, ambos ángulos α_1 y 2 son de 90° .

[0078] Como se puede observar en la fig. 1a, el primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de
 ramificación 5 están conectados al elemento central 2 en el mismo nivel, es decir, a la misma distancia del extremo
 superior o extremo inferior del elemento central. En el ejemplo de la fig. 1, los elementos de ramificación 3,5 están
 40 conectados al elemento central 2 a mitad del elemento central, tan lejos del extremo superior como del extremo inferior del elemento central 2.

[0079] Como se puede desprender de la fig. 1a y la fig. 1b, el eje longitudinal 12 del elemento central 2, el eje
 longitudinal 13 del primer elemento de ramificación 3 y el eje longitudinal 15 del segundo elemento de ramificación 5
 45 se encuentran en el mismo plano. El primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5 están dispuestos en lados opuestos del elemento central 2 y son coaxiales entre sí.

[0080] En el ejemplo de la fig. 1, el elemento central 2 y ambos elementos de ramificación 3, 5 son tubulares.

50 **[0081]** En la muestra de ensayo 1 de la fig. 1, la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano ya están cerca, sin necesidad de, por ejemplo, aplicar pesos adicionales o variar localmente el espesor de la pared del elemento central y/o los elementos de ramificación.

[0082] Por ejemplo, si el elemento central 2 tiene 4 metros de largo, tiene un diámetro exterior de 900 mm y un
 55 espesor de pared de 60 mm, y la distancia desde el centro del elemento central 2 hasta el extremo libre de cada uno de los elementos de ramificación es de 4 metros, y los elementos de ramificación tienen un diámetro exterior de 600 mm y un espesor de pared de 15 mm, entonces la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es de 37,9 Hz y la frecuencia de flexión en plano es de 38,9 Hz. Esto es lo suficientemente cercano como para decir que la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano son sustancialmente las
 60 mismas en el sentido de esta invención.

[0083] La siguiente frecuencia de resonancia es de 55,8 Hz, por lo que es más del 25 % más alta que la
 frecuencia de resonancia de flexión en plano (que es en este ejemplo más alta que la frecuencia de resonancia de
 flexión fuera de plano). Esto está suficientemente lejos de la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la
 65 frecuencia de resonancia de flexión en plano. Cuando la frecuencia de excitación se selecciona cerca de la frecuencia

de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano, digamos en algún lugar en el intervalo de 35 Hz a 42 Hz, el modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano se excitarán, pero el siguiente modo de vibración (que tiene la frecuencia de resonancia de 55,8 Hz) no se excitará.

5 **[0084]** Los nodos del modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano para esta muestra de ensayo 1, con las dimensiones indicadas anteriormente, en cada uno de los elementos de ramificación 3, 5 también están ya cercanos entre sí. En ambas formas de modo, la distancia entre el primer y el segundo nodo es de aproximadamente 2,12 m. La posición del primer nodo en la forma del modo de flexión en plano y la posición del primer nodo en la forma del modo de flexión fuera de plano es inferior a 0,01 m, lo que es insignificante cuando se observa en relación con el tamaño de la muestra de ensayo. Lo mismo se aplica a la posición del segundo nodo en la forma del modo de flexión en plano y la posición del segundo nodo en la forma del modo de flexión fuera de plano. Por lo tanto, tampoco es necesario, por ejemplo, aplicar pesos adicionales o variar localmente el espesor de la pared del elemento central y/o los elementos de ramificación para mover los nodos más cerca.

15 **[0085]** La Fig. 2a muestra un segundo ejemplo de una muestra de ensayo 1 según la invención, en vista frontal. La Fig. 2b muestra la misma muestra de ensayo 1 en la vista superior.

[0086] La muestra de ensayo 1 de la fig. 2 es una variante de la muestra de ensayo 1 de la fig. 1. La geometría es la misma, excepto que en la realización de la muestra de ensayo 1 de la fig. 2, los ángulos α_1 (entre el eje longitudinal 12 del elemento central 2 y el eje longitudinal 13 del primer elemento de ramificación 3) y α_2 (entre el eje longitudinal 12 del elemento central 2 y el eje longitudinal 15 del segundo elemento de ramificación 5) son de 45° en lugar de 90°.

[0087] La Fig. 3a muestra un tercer ejemplo de una muestra de ensayo 1 según la invención, en vista frontal. La Fig. 3b muestra la misma muestra de ensayo 1 en la vista superior.

[0088] La muestra de ensayo 1 de la fig. 3 es una variante de la muestra de ensayo 1 de la fig. 1 y de la fig. 2. La geometría es la misma, excepto que en la realización de la muestra de ensayo 1 de la fig. 3, los ángulos α_1 (entre el eje longitudinal 12 del elemento central 2 y el eje longitudinal 13 del primer elemento de ramificación 3) y α_2 (entre el eje longitudinal 12 del elemento central 2 y el eje longitudinal 15 del segundo elemento de ramificación 5) son de 60° en lugar de 90° o 45°, respectivamente.

[0089] En las muestras de ensayo 1 de la fig. 2 y la fig. 3, la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano están algo más separadas que en la muestra de ensayo 1 de la fig. 1. También los nodos en los elementos de ramificación del modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano estarán un poco más separados. Si se deben tomar medidas para cambiar la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano o la posición de los nodos del modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano más cerca entre sí (por ejemplo, aplicando pesos adicionales o variando localmente el espesor de la pared del elemento central y/o los elementos de ramificación) dependerá de la geometría real de la muestra de ensayo 1.

[0090] Por ejemplo, una muestra de ensayo 1 con la forma como se muestra en las figs. 3a y 3b, y el elemento central 2 tiene 4 metros de largo, tiene un diámetro exterior de 900 mm y un espesor de pared de 60 mm, y la distancia desde el centro del elemento central 2 hasta el extremo libre de cada uno de los elementos de ramificación es de 4 metros, y los elementos de ramificación tienen un diámetro exterior de 600 mm y un espesor de pared de 15 mm, todavía tendrán los nodos del modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano en cada uno de los elementos de ramificación lo suficientemente cerca entre sí. Además, la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano todavía están lo suficientemente cerca como para considerarse "sustancialmente las mismas" en el sentido de la invención: 40,0 Hz para el modo de flexión en plano y 44,0 Hz para el modo de flexión fuera de plano.

[0091] La siguiente frecuencia de resonancia es de 57,6 Hz, por lo que está más del 25 % por encima de la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano (que en este ejemplo es más alta que la frecuencia de resonancia de flexión en plano). Esto está suficientemente lejos de la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano y la frecuencia de resonancia de flexión en plano.

[0092] La Fig. 4 muestra la forma en modo de flexión en plano, ilustrada en la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1.

[0093] La línea discontinua 21 en la fig. 4 indica la dirección del eje longitudinal del elemento central 2 cuando la muestra de ensayo 1 no está vibrando o sometida a una carga mecánica. La línea discontinua 20 en la fig. 4 indica la dirección del eje longitudinal de los elementos de ramificación 3,5 cuando la muestra de ensayo 1 no está vibrando o sometida a una carga mecánica. Las líneas sólidas en la fig. 4 muestran la forma del modo de flexión en plano de la muestra de ensayo 1.

[0094] Se puede observar que el elemento central 2 no se deforma significativamente en comparación con los elementos de ramificación 3, 5 en esta forma de modo. Se mueve hacia adelante y hacia atrás en la dirección de su eje longitudinal. Los elementos de ramificación 3,5 se desvían en el plano definido por el eje longitudinal del elemento central 2 y los ejes longitudinales de los elementos de ramificación en su estado no desviado.

[0095] La forma en modo de flexión en plano tiene dos nodos, uno en el primer elemento de ramificación 3 y uno en el segundo elemento de ramificación 5. El primer nodo, en el primer elemento de ramificación 3, está ubicado en el área sombreada 23 que se muestra en la fig. 4. El segundo nodo, en el segundo elemento de ramificación 5, se ubica en el área sombreada 25 que se muestra en la fig. 4.

[0096] La Fig. 5 muestra la forma del modo de flexión fuera de plano, ilustrada en la muestra de ensayo de acuerdo con la fig. 1.

[0097] La línea discontinua 20 en la fig. 5 indica la dirección del eje longitudinal de los elementos de ramificación 3,5 cuando la muestra de ensayo 1 no está vibrando o sometida a una carga mecánica. Las líneas sólidas en la fig. 5 muestran la forma del modo de flexión fuera de plano de la muestra de ensayo 1.

[0098] Se puede ver que el elemento central 2 se mueve hacia adelante y hacia atrás en la dirección de la línea discontinua 22. Los elementos de ramificación 3, 5 se desvían del plano definido por el eje longitudinal del elemento central 2 y los ejes longitudinales de los elementos de ramificación en su estado no desviado.

[0099] La forma del modo de flexión fuera de plano tiene dos nodos, uno en el primer elemento de ramificación 3 y uno en el segundo elemento de ramificación 5. El primer nodo, en el primer elemento de ramificación 3, está ubicado en el área sombreada 23 que se muestra en la fig. 5. El segundo nodo, en el segundo elemento de ramificación 5, se ubica en el área sombreada 25 que se muestra en la fig. 5.

[0100] Al comparar las figs. 4 y 5, se puede ver que el primer nodo, que está ubicado en el primer elemento de ramificación 3, de la forma en modo de flexión en plano está situado sustancialmente en la misma ubicación en el primer elemento de ramificación 3 que el primer nodo (ubicado en el primer elemento de ramificación 3) en la forma en modo de flexión fuera de plano. Lo mismo se aplica para el segundo nodo, que está ubicado en el segundo elemento de ramificación 5. El segundo nodo de la forma en modo de flexión en plano se encuentra sustancialmente en la misma ubicación en el segundo elemento de ramificación 3 que el segundo nodo en la forma en modo en flexión fuera de plano.

[0101] Por lo tanto, según la invención, durante el ensayo, la muestra de ensayo 1 se sostendrá en los elementos de ramificación 3, 5, en la posición indicada por las áreas sombreadas 23, 25 o adyacente a esta.

[0102] La Fig. 6 muestra un primer ejemplo de una combinación de un banco de ensayo 30 y una muestra de ensayo 1 según la invención.

[0103] En el ejemplo de la fig. 6, se muestra una muestra de ensayo 1 generalmente de acuerdo con la fig. 1. Sin embargo, en el ejemplo de la fig. 6, esta muestra de ensayo 1 se ha proporcionado con pesos de ensayo adicionales 16 en el extremo libre de cada elemento de ramificación 3, 5. El extremo libre de un elemento de ramificación 3, 5 es el extremo que no está conectado al elemento central 2.

[0104] Los pesos de ensayo adicionales 16 pueden tener la misma masa, pero alternativamente tienen una masa diferente. Por ejemplo, el peso de ensayo adicional 16 que está dispuesto en el extremo libre del primer elemento de ramificación 3 puede ser más pesado que el peso de ensayo adicional 16 que está dispuesto en el extremo libre del segundo elemento de ramificación 5 para compensar cualquier peso adicional que esté presente debido al accionamiento 41 que también está conectada al extremo libre del segundo elemento de ramificación 5.

[0105] En lugar de la muestra de ensayo 1 que se muestra en el ejemplo de la fig. 6, las muestras de ensayo 1 según la invención que tienen una geometría diferente (por ejemplo, las que se muestran en la fig. 2, fig. 3, fig. 8, fig. 9, fig. 10) se pueden usar en combinación con el banco de ensayo 30 que se muestra.

[0106] El banco de ensayo 30 que se muestra en la fig. 6 está dispuesto en una base 50. Esta base es preferentemente plana, lisa y resistente. En el ejemplo de la fig. 6, la base es un piso, por ejemplo, un piso de hormigón, pero alternativamente la base puede ser, por ejemplo, una estructura montada en un piso. En realizaciones ventajosas del banco de ensayo 30, se han tomado medidas para reducir las cargas mecánicas dinámicas que se ejercen en la base 50 tanto como sea posible. Sin embargo, la invención permite el ensayo de muestras de ensayo grandes y pesadas. Si se van a poner a prueba muestras de ensayo tan grandes y pesadas, la base aún tendrá que ser fuerte.

[0107] El banco de ensayo 30 de la fig. 6 comprende un primer soporte 33 y un segundo soporte 35. El primer soporte 33 soporta el primer elemento de ramificación 3 y el segundo soporte 35 soporta el segundo elemento de ramificación 5. El primer soporte 33 está dispuesto de manera que acopla el primer elemento de ramificación 3,

preferentemente en o adyacente al nodo en el primer elemento de ramificación 3 de la forma en modo de flexión en plano y en o adyacente al nodo en el primer elemento de ramificación 3 de la forma en modo de flexión fuera de plano. El segundo soporte 35 está dispuesto de manera que acopla el segundo elemento de ramificación 5, preferentemente en o adyacente al nodo en el segundo elemento de ramificación 5 de la forma en modo de flexión en plano y en o adyacente al nodo en el segundo elemento de ramificación 5 de la forma en modo de flexión fuera de plano.

[0108] En el ejemplo de la fig. 6, tanto el primer como el segundo soporte 33, 35 son móviles con respecto a la base 50. En este ejemplo, los soportes 33, 35 se proporcionan con ruedas 32, 36. Las ruedas 32, 36 están opcionalmente provistas de neumáticos de goma, para reducir el impacto de las vibraciones impuestas en la muestra de ensayo 1 sobre el banco de ensayo 30 y la base 50.

[0109] El banco de ensayo 30 comprende adicionalmente un excitador 40. El excitador 40 en este ejemplo comprende un accionamiento 41 y un motor eléctrico 42, y están acoplados por un eje cardán 43.

[0110] El accionamiento 41 comprende al menos un peso excéntrico giratorio. El motor eléctrico 42 acciona la rotación del peso excéntrico a través del eje cardán 42. La rotación del peso excéntrico del accionamiento 41 produce fuerzas de desequilibrio que someten la muestra de ensayo 1 a una vibración forzada a una frecuencia de excitación. En casos prácticos, la frecuencia de excitación podría estar entre 10 Hz y 60 Hz, por ejemplo.

[0111] El motor eléctrico 42 se proporciona preferentemente con un sistema de control del motor, que permite establecer y/o ajustar la velocidad de rotación del motor 42, y con ello la frecuencia de excitación del excitador. Preferentemente, el sistema de control del motor es tal que permite un control preciso de la velocidad del motor y con ello de la frecuencia de excitación.

[0112] Debido a la naturaleza giratoria de las fuerzas de desequilibrio, la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano se excitan de manera alterna.

[0113] La frecuencia de excitación se establece cerca de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, de modo que tanto el modo de flexión en plano como el modo de flexión fuera de plano se excitan por las fuerzas de desequilibrio.

[0114] En el ejemplo de la fig. 6, la muestra de ensayo 1 se ha instrumentado con una cantidad de sensores 60. Opcionalmente, la muestra de ensayo 1 está provista de una cantidad de soportes para sostener estos sensores 60. Los sensores 60 son, por ejemplo, transductores de desplazamiento, transductores de velocidad o transductores de aceleración. Estos transductores se pueden usar, por ejemplo, para monitorear cualquier cambio en la forma del modo que podría ser indicativo de la presencia de una grieta de fatiga. Es posible que, como alternativa o además, esté presente un sensor 60 en forma de un transductor de presión.

[0115] El uso de un transductor de presión es útil cuando la muestra de ensayo 1 comprende una cavidad que se llena, por ejemplo, con un gas o un líquido. Si una o ambas de las juntas 4,6 forman parte de la pared de esa cavidad, y aparece una grieta de fatiga que se extiende a través de todo el espesor de la junta, la presión en la cavidad disminuirá. El transductor de presión debe estar dispuesto de manera que detecte dicha caída de presión. Por lo tanto, si se mide una caída de presión mediante este transductor de presión, esto indica que se ha formado una grieta. En caso de que las juntas 4, 6 sean soldaduras, tienen una menor resistencia a la fatiga que el material base del elemento central 2 y los elementos de ramificación 3, 5, es probable que esta grieta esté presente en una de las juntas 4, 6.

[0116] La fig. 7 muestra un segundo ejemplo de una combinación de un banco de ensayo 30 y una muestra de ensayo 1 según la invención.

[0117] El banco de ensayo 30 en este ejemplo es similar al que se muestra en la fig. 6. Se ha modificado para que sea adecuado para muestras de ensayo 1 que tienen un elemento central 2 y solo un elemento de ramificación 3. Por lo tanto, el banco de ensayo 30 de la fig. 7 tiene solo un soporte 33. Este soporte 33 en el ejemplo de la fig. 7 es móvil, de modo que pueda disponerse de tal manera que se acople al elemento de ramificación 3 en o adyacente al nodo en el primer elemento de ramificación 3 de la forma en modo de flexión en plano y en o adyacente al nodo en el primer elemento de ramificación 3 de la forma en modo de flexión fuera de plano.

[0118] Opcionalmente, la geometría de la muestra de ensayo se ajusta de manera que el centro de gravedad de la muestra de ensayo esté cerca de los nodos y/o cerca del soporte 33. Opcionalmente, se toman disposiciones adicionales para estabilizar la muestra de ensayo durante el ensayo. Estas disposiciones podrían incluir, por ejemplo, resortes o correas.

[0119] En el ejemplo de la fig. 7, una correa 34 está presente para mantener la muestra de ensayo 1 en su lugar con respecto al soporte 33. La correa 34 es meramente una medida de seguridad, ya que el soporte 33 acopla el primer elemento de ramificación 3 en o adyacente a un nodo de ambas formas de modo excitado. La correa 34 ayuda a evitar la rotación no deseada de la muestra de ensayo con respecto al banco de ensayo.

[0120] Las correas 34 también se pueden usar en el banco de ensayo 30 que se muestra en la fig. 6.

[0121] El excitador 40 y los sensores 60 en el ejemplo de la fig. 7 son los mismos que en el ejemplo de la fig. 6.

[0122] Las figs. 8 a 16 muestran ejemplos adicionales de muestras de ensayo según la invención.

[0123] La fig. 8 muestra una variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 8a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 8b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0124] En la variante de la fig. 8, el primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5 no están dispuestos a medio camino del elemento central 2. En su ejemplo, los elementos de ramificación 3, 5 están dispuestos más cerca de la parte superior del elemento central 2. Esto hace que cuando la muestra de ensayo 1 está dispuesta en un banco de ensayo de acuerdo con la invención, por ejemplo, el banco de ensayo de la fig. 6, la gravedad sostendrá la muestra de ensayo 1 en su lugar de una manera más estable, con la parte más larga, y por lo tanto más pesada, del elemento central apuntando hacia abajo. Esto reduce el riesgo de rotación no deseada de la muestra de ensayo en relación con el banco de ensayo.

[0125] Las muestras de ensayo 1 de los tipos que se muestran en la fig. 2 y la fig. 3 se pueden modificar de la misma manera, al igual que las otras muestras de ensayo según la invención, de modo que tengan sus elementos de ramificación 3,5 no a la mitad del elemento central 2.

[0126] Otra variante (no mostrada) es disponer los elementos de ramificación 3, 5 a la mitad del elemento central, pero agregar peso adicional a la parte inferior del elemento central 2, en el extremo inferior o entre el extremo inferior y el medio del elemento central 2. Esto se puede hacer añadiendo pesos de prueba adicionales o llenando una cavidad en la parte inferior del elemento central con, por ejemplo, un líquido (por ejemplo, agua). Esto se puede hacer en cualquiera de las muestras de ensayo que se muestran en las figuras 1-3 y 8-16.

[0127] La fig. 9 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 9a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 9b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0128] En la variante de la fig. 9, los primer y segundo elementos de ramificación 3, 5 se extienden bajo un ángulo con respecto del otro. Esto causará un cambio en la posición de los nodos de la forma del modo de flexión en plano y/o la forma del modo de flexión fuera de plano, y probablemente también un cambio en la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano. Esta variante de la muestra de ensayo se puede utilizar para adaptar las frecuencias de resonancia y/o la posición de los nodos en caso de que el resto de la geometría de la muestra de ensayo lo requiera.

[0129] En la realización de la fig. 9, los ejes longitudinales del elemento central y los elementos de ramificación ya no se encuentran en un plano horizontal. El "plano" en "flexión en plano" y "flexión fuera de plano" ahora se refiere al plano curvado que se extiende a través de los ejes longitudinales del elemento central y los elementos de ramificación. Esto significa que, en el modo de flexión en plano, el elemento central todavía vibra en la dirección indicada por la flecha A en la fig. 9a, y en el modo de flexión fuera de plano en la dirección indicada por la flecha B en la fig. 9b. Los elementos de ramificación 3, 5 se desvían en consecuencia.

[0130] Esta variante también es posible en combinación con las muestras de ensayo como se muestra en la fig. 2 y la fig. 3. En esas situaciones, los ejes longitudinales 13, 15 de los elementos de ramificación 3, 5 se extienden bajo un ángulo con respecto al eje longitudinal 12 del elemento central y los ejes longitudinales 13, 15 de los elementos de ramificación 3,5 se extienden bajo un ángulo entre sí. También las otras muestras de ensayo según la invención se pueden modificar de esta manera.

[0131] La fig. 10 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 10a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 10b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0132] En la variante de la fig. 10, se proporcionan pilares o refuerzos 10 entre los elementos de ramificación 3, 5 y el elemento central 2. Esto cambia a la distribución de carga en la muestra de ensayo 1. El uso de esta variante de la muestra de ensayo 1 puede ser útil si la estructura real también contiene dichos pilares o refuerzos.

[0133] Los pilares y/o refuerzos 10 como se muestra en la fig. 10 también se pueden aplicar en las otras muestras de ensayo según la invención.

[0134] La fig. 11 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 11a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 11b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0135] La muestra de ensayo 1 de la fig. 11 es similar a la muestra de ensayo 1 de la fig. 1, solo tiene un elemento de ramificación 3. Como resultado, la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano están más separadas que en la muestra de ensayo 1 de la fig. 1. También los nodos en el elemento de ramificación 3 para la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano están más separados. Por lo tanto, para la muestra de ensayo 1 de la fig. 11, la distribución de peso tiene que optimizarse para obtener los valores deseados de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano y la posición del nodo en el elemento de ramificación 3 para la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano.

10 **[0136]** La fig. 12 muestra una variante de la muestra de ensayo 1 según la fig. 2. La fig. 12a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 12b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0137] La muestra de ensayo 1 de la fig. 12 es similar a la muestra de ensayo 1 de la fig. 2, solo tiene un elemento de ramificación 3. Como resultado, la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano están más separadas que en la muestra de ensayo 1 de la fig. 1. También los nodos en el elemento de ramificación 3 para la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano están más separados. Por lo tanto, para la muestra de ensayo 1 de la fig. 11, la distribución de peso tiene que optimizarse para obtener los valores deseados de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano y la posición del nodo en el elemento de ramificación 3 para la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano.

[0138] La fig. 13 muestra una variante de la muestra de ensayo 1 según la fig. 3. La fig. 13a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 13b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

25 **[0139]** La muestra de ensayo 1 de la fig. 13 es similar a la muestra de ensayo 1 de la fig. 3, solo tiene un elemento de ramificación 3. Como resultado, la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano están más separadas que en la muestra de ensayo 1 de la fig. 1. También los nodos en el elemento de ramificación 3 para la forma del modo de flexión en plano y la forma del modo de flexión fuera de plano están más separados. Por lo tanto, para la muestra de ensayo 1 de la fig. 11, la distribución de peso tiene que optimizarse para obtener los valores deseados de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano y la posición del nodo en el elemento de ramificación 3 para la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano.

35 **[0140]** La fig. 14 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 14a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 14b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0141] En la realización, el primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5 tienen una geometría diferente. El primer elemento de ramificación 3 tiene un diámetro mayor que el segundo elemento de ramificación 5 y el segundo elemento de ramificación 5 es más largo que el primer elemento de ramificación 3.

40 **[0142]** Esta geometría diferente de los dos elementos de ramificación también puede ocurrir en las realizaciones mostradas en las figuras 2, 3, 8, 9 y 10.

[0143] La fig. 15 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 15a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 15b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0144] En la realización de la fig. 15, la muestra de ensayo 1 ha sido provista de bridas 4*a, 4*b y 6*a, 6*b para conectar el primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5, respectivamente, al elemento central 2. El elemento central tiene dos zonas de transición 4** y 6** que están presentes de manera adyacente a las bridas 4*b y 6*b del elemento central 2.

50 **[0145]** La brida 4*a del elemento central 2 y la brida 4*b del primer elemento 3 están, por ejemplo, conectadas entre sí mediante pernos y tuercas, mediante una soldadura o mediante pegamento. La brida 6*a del elemento central 2 y la brida 6*b del segundo elemento 5 también están, por ejemplo, conectadas entre sí mediante pernos y tuercas, mediante una soldadura o mediante pegamento.

[0146] También puede producirse una junta con bridas en las realizaciones de las figuras 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

60 **[0147]** La fig. 16 muestra otra variante de la muestra de ensayo 1 de acuerdo con la fig. 1. La fig. 16a muestra la muestra de ensayo 1 en vista frontal, la fig. 16b muestra la muestra de ensayo 1 en vista superior.

[0148] En la realización de la fig. 16, el elemento central 2, el primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5 se fabrican como una sola parte, por ejemplo, mediante fundición o como una sola parte de resina reforzada con fibra. En esta realización, la junta 4 está formada por la conexión entre el elemento central 2

y el primer elemento de ramificación 3. La junta 6 está formada por la conexión entre el elemento central 2 y el segundo elemento de ramificación 5.

5 [0149] Una junta de este tipo también puede ocurrir en las realizaciones de las figuras 2, 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

10 [0150] La fig. 17 muestra un ejemplo adicional de una muestra de ensayo 1 según la invención. En esta realización, hay dos elementos de ramificación 3, 5 presentes que están provistos de refuerzos en forma de placas de refuerzo 11.

15 [0151] En la realización de la fig. 17, la muestra de ensayo 1 comprende un elemento central 2, un primer elemento de ramificación 3 y un segundo elemento de ramificación 5. El primer elemento de ramificación 3 y el segundo elemento de ramificación 5 se extienden coaxialmente entre sí, ambos en un ángulo de 90° con respecto al elemento central 2. Sin embargo, las placas de refuerzo 11 como se muestra en esta realización también se pueden usar en realizaciones que tienen una geometría diferente a la geometría que se muestra en la fig. 17, por ejemplo, en muestras de ensayo en las que está presente un número diferente de elementos de ramificación, en las que el elemento de ramificación o los elementos de ramificación se extienden en un ángulo diferente del elemento central y/o en las que los elementos de ramificación no se extienden coaxialmente entre sí.

20 [0152] En la realización de la fig. 17, cada elemento de ramificación 3, 5 está provisto de dos placas de refuerzo 11 en lados diametralmente opuestos de dicho elemento de ramificación 3, 5. Las placas de refuerzo 11 están unidas a cada elemento de ramificación 3, 5 entre la junta 4, 6 que conecta el elemento de ramificación respectivo 3, 5 con el elemento central 2 y el área en la que la muestra de ensayo está acoplada por los soportes del banco de ensayo, por ejemplo, en o cerca de las bridas 17.

25 [0153] En la realización de la fig. 17, las placas de refuerzo 11 se extienden en el plano del modo de flexión fuera de plano. Las placas de refuerzo 11 aumentan la rigidez de la muestra de ensayo, en particular la rigidez de los elementos de ramificación 3, 5 en la dirección en la que se produce la deformación de la muestra de ensayo en el modo de flexión fuera de plano. Esto desplaza la frecuencia de resonancia del modo de flexión fuera de plano hacia
30 arriba.

[0154] Las juntas entre el elemento central 2 y los respectivos elementos de ramificación 3, 5 tienen diferentes factores de concentración de esfuerzos asociados con ellos para el modo de flexión en plano por un lado y el modo de flexión fuera de plano por el otro. En esta realización, el factor de concentración de esfuerzos que está asociado
35 con el modo de flexión en plano es inferior al factor de concentración de esfuerzos que está asociado con el modo de flexión fuera de plano.

[0155] En la realización de la fig. 17, la frecuencia de ensayo se selecciona preferentemente más cerca de la frecuencia de resonancia del modo de flexión en plano, ya que este modo de flexión induce las concentraciones de
40 esfuerzos más bajas en las juntas 4, 6 que el modo de flexión fuera de plano. Esto hace que la muestra de ensayo aún reciba el nivel deseado de cargas mecánicas en el modo de flexión en plano, a pesar de que ese modo de flexión está asociado con concentraciones de esfuerzos más bajas.

REIVINDICACIONES

1. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) para realizar un ensayo de fatiga de dicha muestra de ensayo (1), donde la muestra de ensayo (1) no es axisimétrica y comprende:

- un elemento central (2), teniendo dicho elemento central (2) un eje longitudinal (12),
- un primer elemento de ramificación (3), teniendo dicho primer elemento de ramificación (3) un eje longitudinal (13) que se extiende en un ángulo con respecto al eje longitudinal (12) del elemento central (2),
- una junta (4) que conecta el primer elemento de ramificación (3) al elemento central (2),

donde la muestra de ensayo no axisimétrica (1) tiene una pluralidad de frecuencias de resonancia con formas de modo asociadas,

cuya pluralidad de frecuencias de resonancia comprende una frecuencia de resonancia de flexión en plano con una forma en modo de flexión en plano asociada, y una frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano con una forma en modo de flexión fuera de plano asociada,

donde la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de flexión fuera de plano son sustancialmente las mismas, y

donde la forma en modo de flexión en plano comprende un primer nodo, cuyo primer nodo está ubicado en el primer elemento de ramificación (3), y donde la forma en modo de flexión fuera de plano comprende un primer nodo, cuyo

primer nodo está ubicado en el primer elemento de ramificación (3), donde el primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y el primer nodo de la forma en modo de flexión fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el primer elemento de ramificación (3),

y donde el banco de ensayo (30) comprende:

- un primer soporte (33) para soportar la muestra de ensayo (1), cuyo primer soporte (33) soporta la muestra de ensayo (1) en o adyacente al nodo de la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano,
- un excitador (40) para someter la muestra de ensayo (1) a vibración forzada a una frecuencia de excitación.

2. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la muestra de ensayo (1) comprende, además:

- un segundo elemento de ramificación (5), teniendo dicho segundo elemento de ramificación (5) un eje longitudinal (15) que se extiende en un ángulo con respecto al eje longitudinal (12) del elemento central (2),
- una junta (6) que conecta el segundo elemento de ramificación (5) al elemento central (2),

y donde el banco de ensayo (30) comprende además un segundo soporte (35) para soportar la muestra de ensayo (1) en el segundo elemento de ramificación (5).

3. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 2, donde la forma en modo de flexión en plano comprende además un segundo nodo, cuyo segundo nodo está ubicado en el segundo elemento de ramificación (5), y donde la forma en modo de flexión fuera de plano comprende además un segundo nodo, cuyo segundo nodo está ubicado en el segundo elemento de ramificación (5),

donde el segundo nodo de la forma en modo de flexión en plano y el segundo nodo de la forma en modo de flexión

fuera de plano están sustancialmente en la misma posición en el segundo elemento de ramificación (5), donde el segundo soporte (35) del banco de ensayo (30) soporta el segundo elemento de ramificación (5) en o adyacente al segundo nodo de la forma en modo de flexión en plano y la forma en modo de flexión fuera de plano.

4. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la junta (4) entre el primer elemento de ramificación (3) y el elemento central (2) y/o la junta (6) entre el segundo elemento de ramificación (5) y el elemento central (2) es una soldadura o una conexión roscada o una conexión de brida o una parte de un elemento estructural fundido o una conexión pegada, y/o

donde el elemento central (2) y/o al menos un elemento de ramificación de la muestra de ensayo (1) es tubular, donde opcionalmente el elemento central (2) y todos los elementos de ramificación (3, 5) son tubulares, y/o

donde en la muestra de ensayo (1), el ángulo entre el eje longitudinal (12) del elemento central (2) y el eje longitudinal (13, 15) de al menos un elemento de ramificación está entre 30° y 150°, opcionalmente entre 45° y 135°.

5. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 2, donde en la muestra de ensayo (1), el ángulo entre el eje longitudinal (13) del primer elemento de ramificación (3) y el eje longitudinal (12) del elemento central (2) es sustancialmente el mismo que el ángulo entre el eje longitudinal (15) del segundo elemento de ramificación (5) y el eje longitudinal (12) del elemento central (2), y/o

donde en la muestra de ensayo (1), el primer elemento de ramificación (3) y el segundo elemento de ramificación (5) son coaxiales entre sí, y/o

donde el primer elemento de ramificación (3) y el segundo elemento de ramificación (5) se encuentran en lados opuestos del elemento central (2), y/o

donde el primer elemento de ramificación (3) y el segundo elemento de ramificación (5) están conectados al elemento central (2) en el mismo nivel, opcionalmente a mitad de camino entre los extremos del elemento central (2), y/o donde el eje longitudinal (13) del primer elemento de ramificación (3), el eje longitudinal (15) del segundo elemento de ramificación (5) y el eje longitudinal (12) del elemento central (2) están en el mismo plano.

5
6. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la muestra de ensayo (1) comprende al menos una cavidad, cuya cavidad se llena con un líquido o un gas, opcionalmente un gas comprimido, y/o cuya cavidad está preferentemente limitada al menos parcialmente por al
10 menos una junta (4, 6) entre el elemento central (2) y un elemento de ramificación.

7. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la muestra de ensayo (1) se proporciona con un peso de ensayo adicional (16) en el elemento central (2) y/o al
15 menos un elemento de ramificación (3, 5), donde opcionalmente el peso de ensayo adicional (16) está dispuesto de manera no coaxial con el elemento de ramificación (3, 5).

8. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según las reivindicaciones 2 y
20 7, donde el primer elemento de ramificación (3) de la muestra de ensayo (1) se proporciona con un primer peso de ensayo adicional y el segundo elemento de ramificación (5) de la muestra de ensayo (1) se proporciona con un segundo peso de adición adicional, donde opcionalmente el primer peso de ensayo adicional es diferente del segundo peso de ensayo adicional y/o donde la ubicación en la que el primer peso de ensayo adicional está dispuesto en el primer elemento de ramificación (3) es
25 diferente de la ubicación en la que el segundo peso de ensayo adicional está dispuesto en el segundo elemento de ramificación (5).

9. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde al menos el primer soporte (33) del banco de ensayo (30) se puede mover de
30 manera que su posición se pueda emparejar con la posición del primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y/o de la forma en modo de flexión fuera de plano.

10. Combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde al menos un elemento de ramificación está provisto de un refuerzo (10), cuyo
35 refuerzo (10) está unido a dicho elemento de ramificación (3, 5) entre la junta (4, 6) que conecta dicho elemento de ramificación (3, 5) al elemento central (2) y la ubicación donde el soporte del banco de ensayo (30) se acopla a dicho elemento de ramificación (3, 5).

11. Procedimiento para realizar un ensayo de fatiga en una muestra de ensayo (1),
40 cuyo procedimiento comprende las etapas siguientes:

- proporcionar una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
- disponer la muestra de ensayo (1) en el banco de ensayo (30), de modo que el primer soporte (33) del banco de
45 ensayo (30) soporte el primer elemento de ramificación (3) en o adyacente al primer nodo de la forma en modo de flexión en plano y de la forma en modo de flexión fuera de plano,
- someter la muestra de ensayo (1) a vibración forzada por el excitador (40) a una frecuencia de excitación cercana a la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano, excitando así el modo de flexión en plano y el modo de flexión fuera de plano.

50
12. Procedimiento según la reivindicación 11, donde se proporciona una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 3, y donde la muestra de ensayo (1) está dispuesta en el banco de ensayo (30) de modo que el segundo soporte (35)
55 del banco de ensayo (30) soporta el segundo elemento de ramificación (5) en o adyacente al segundo nodo tanto de la forma en modo de flexión en plano como de la forma en modo de flexión fuera de plano, y/o donde se proporciona una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 9, y donde antes o durante la disposición de la muestra de ensayo (1) en el banco de ensayo (30), se ajusta la posición
60 del primer y/o segundo soporte (35) del banco de ensayo (30), y/o donde se proporciona una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 6 9, y donde el procedimiento comprende además la etapa de llenado de dicha cavidad de la muestra de ensayo (1) con un
65 líquido o un gas, opcionalmente un gas comprimido, y donde la presión del líquido o gas se mide durante el ensayo.

13. Procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 11-12, donde preferentemente se proporciona una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo (1) según la reivindicación 10,

5 donde la excitación de la muestra de ensayo (1) en el modo de flexión en plano provoca una primera concentración de esfuerzos en la junta (4, 6) y donde la excitación de la muestra de ensayo (1) en el modo de flexión fuera de plano provoca una segunda concentración de esfuerzos en la junta (4, 6),
 donde la frecuencia de ensayo se selecciona más cerca de la frecuencia de resonancia asociada con el modo de flexión que se asocia con la menor de la primera concentración de esfuerzos y la segunda concentración de esfuerzos
 10 que con la frecuencia de resonancia asociada con el modo de flexión que se asocia con la mayor de la primera concentración de esfuerzos y la segunda concentración de esfuerzos.

14. Procedimiento para diseñar un ensayo de fatiga de una muestra de ensayo (1), en el que se utiliza una combinación de un banco de ensayo (30) y una muestra de ensayo según cualquiera de las reivindicaciones 1-10 y
 15 qué ensayo de fatiga se lleva a cabo según cualquiera de las reivindicaciones 11-13, cuyo procedimiento comprende las siguientes etapas:

- seleccionar una geometría de base para la muestra de ensayo (1), incluyendo la selección del número de elementos de ramificación que deben conectarse al elemento central (2) y la posición y dirección de estos
 20 elementos de ramificación,
- seleccionar la forma del elemento central (2) y cualesquiera elementos de ramificación,
- seleccionar la longitud y los tamaños de sección transversal del elemento central (2) y cualesquiera elementos de ramificación,
- calcular la frecuencia de resonancia de flexión en plano, la forma del modo de flexión en plano, la frecuencia de
 25 resonancia de flexión fuera de plano, la forma del modo de flexión fuera de plano y opcionalmente cualquier frecuencia de resonancia adicional que puedan estar cerca de la frecuencia de resonancia de flexión en plano y/o de la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano,
- determinar la diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano,
- 30 - evaluar si esta diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera de plano es lo suficientemente pequeña entre sí para poder aplicar el procedimiento para realizar un ensayo de fatiga según cualquiera de las reivindicaciones 11-13
- determinar la diferencia en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma en modo de flexión fuera de plano,
- 35 - evaluar opcionalmente si esta diferencia en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma en modo de flexión fuera de plano es lo suficientemente pequeña entre sí para poder aplicar el procedimiento para realizar un ensayo de fatiga según cualquiera de las reivindicaciones 11-13,
- si la diferencia entre la frecuencia de resonancia de flexión en plano y la frecuencia de resonancia de flexión fuera
 40 de plano o la diferencia opcionalmente calculada en la ubicación del nodo de cada elemento de ramificación en la forma en modo de flexión en plano y la ubicación de este nodo en la forma en modo de flexión fuera de plano es demasiado grande, adaptar la distribución de peso en la muestra de ensayo (1) y/o los tamaños de longitud y sección transversal del elemento central (2) y cualquier elemento de ramificación y/o adaptar la rigidez de un elemento de ramificación y/o el elemento central (2) en al menos una dirección mediante la unión de un refuerzo a
 45 dicho elemento de ramificación y/o elemento central (2) con el fin de cambiar la ubicación de los nodos y/o las frecuencias de resonancia.

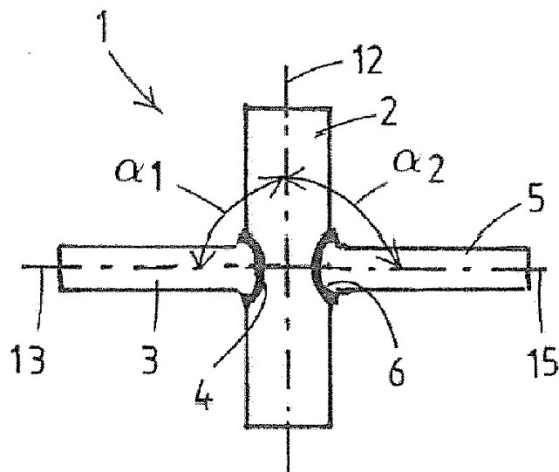


Fig.1a

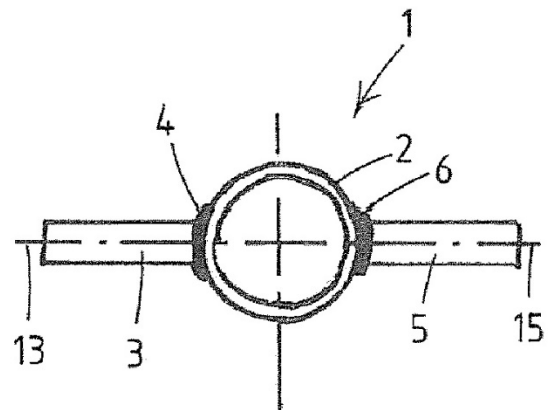


Fig.1b

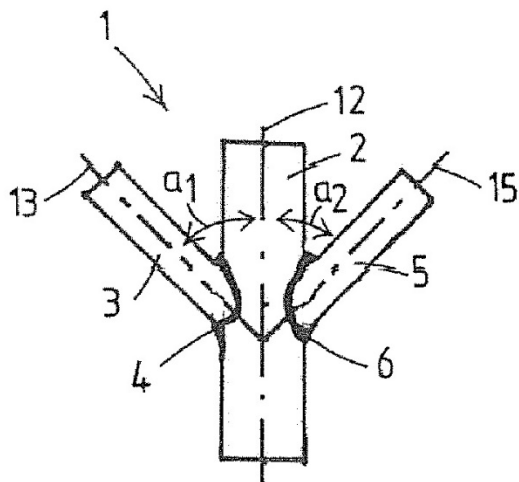


Fig.2a

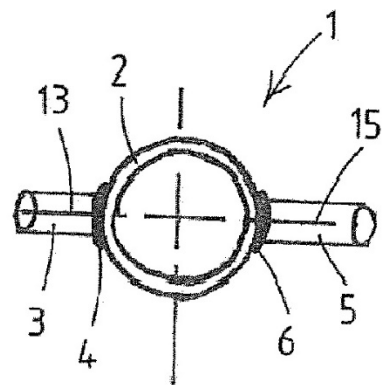


Fig.2b

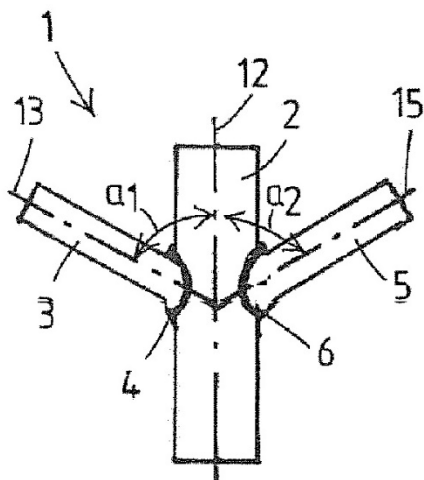


Fig.3a

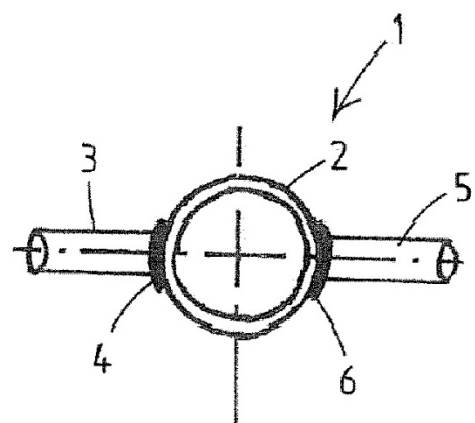


Fig.3b

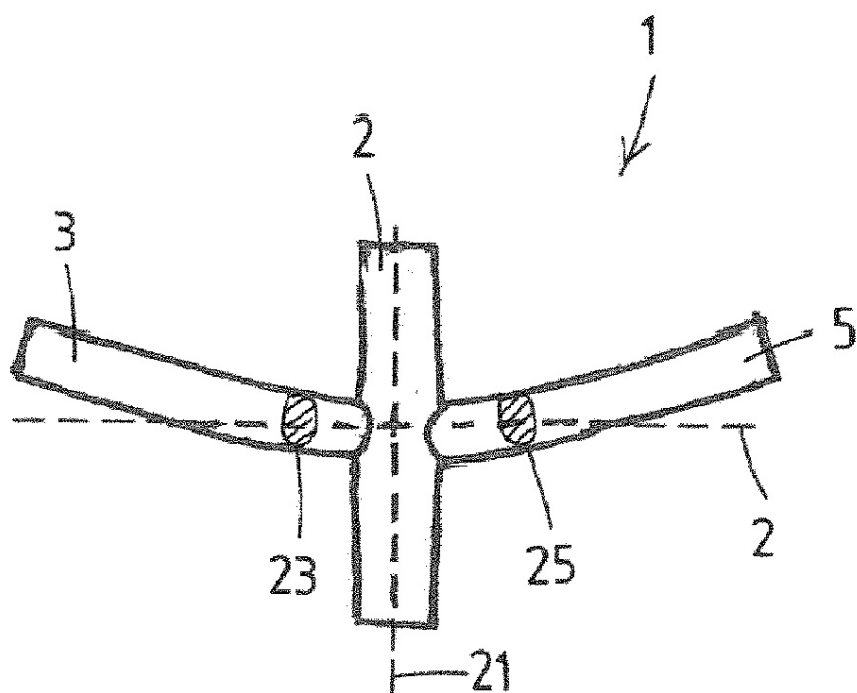


Fig.4

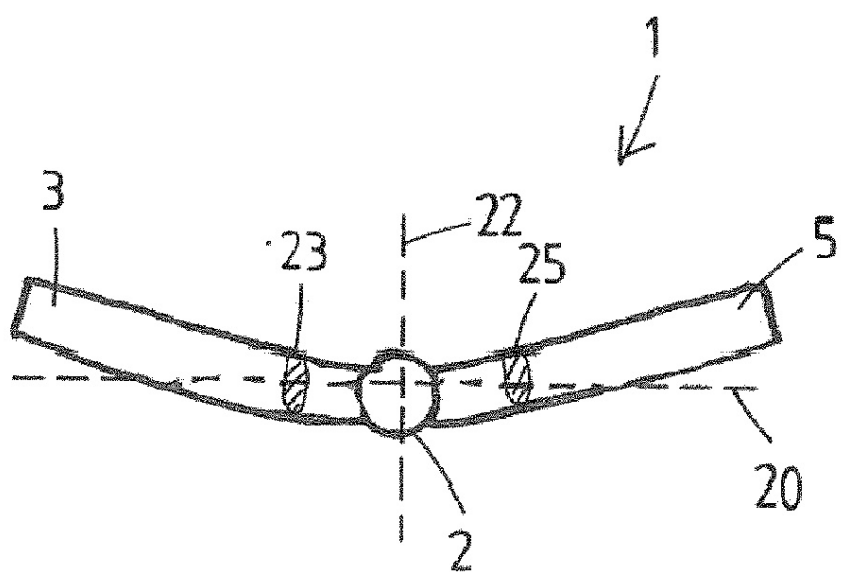


Fig.5

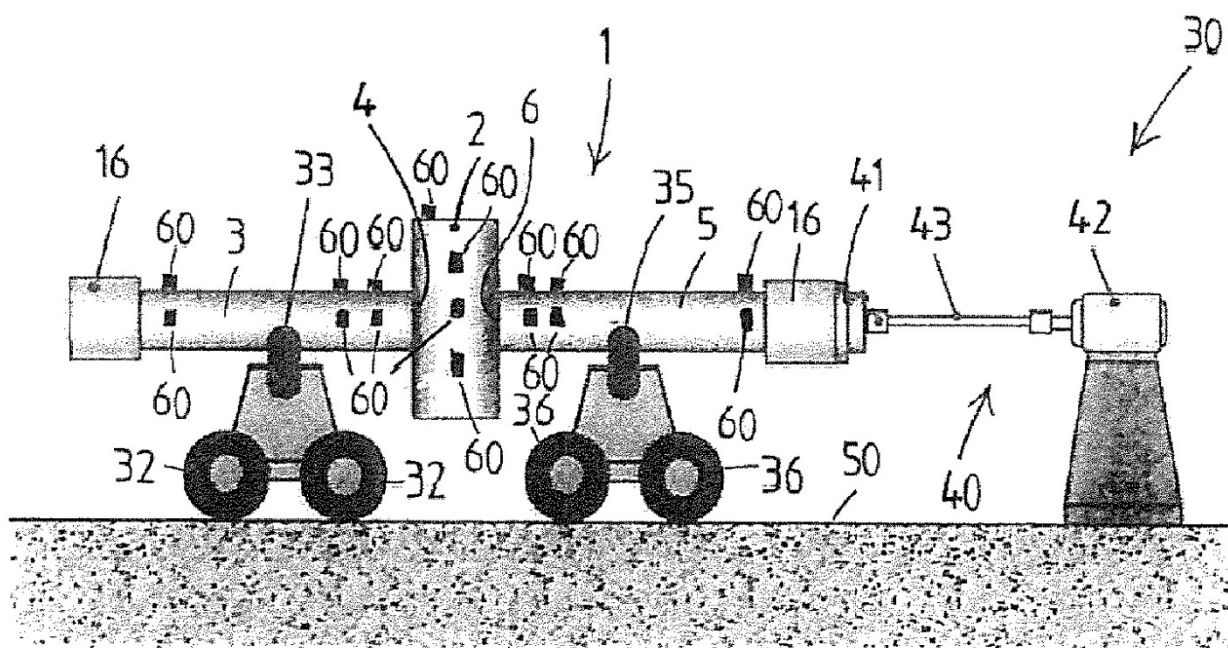


Fig. 6

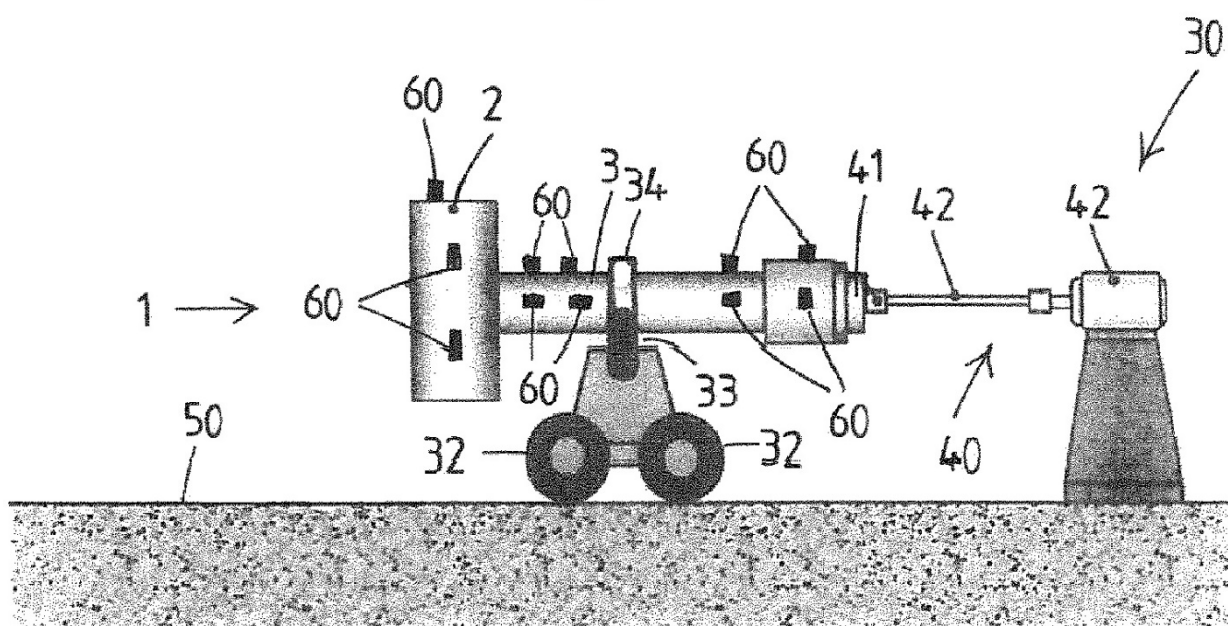


Fig. 7

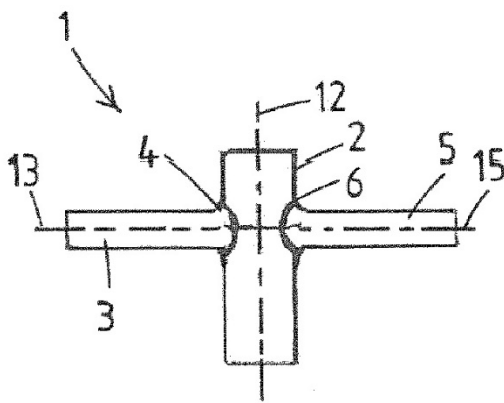


Fig. 8a

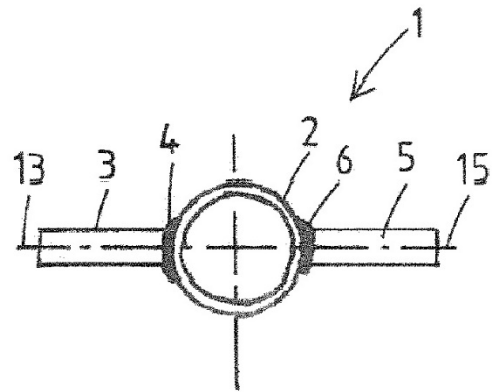


Fig. 8b

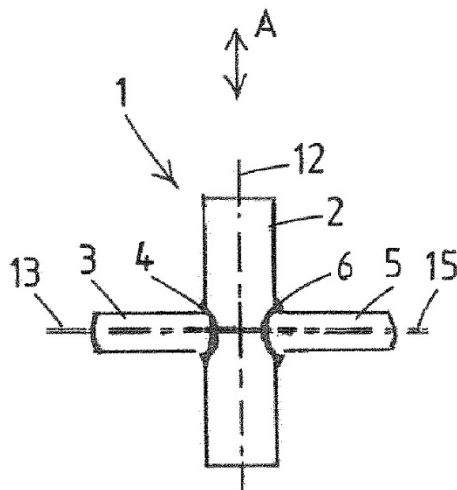


Fig. 9a

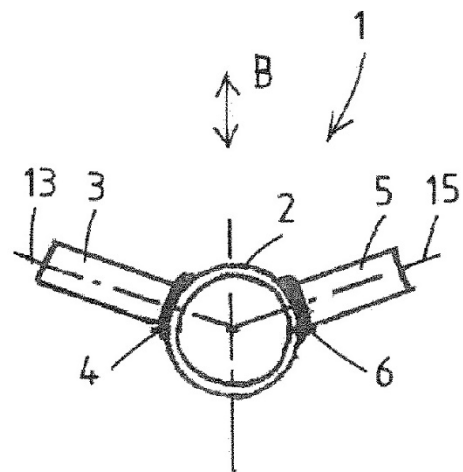


Fig. 9b

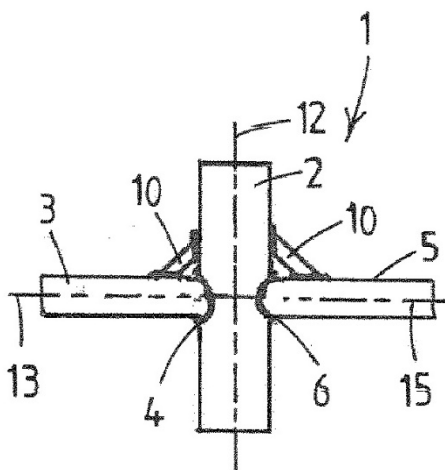


Fig. 10a

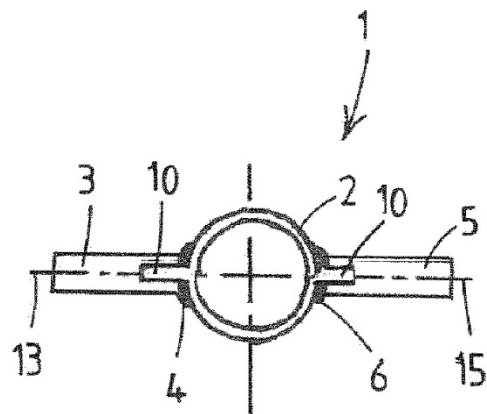


Fig. 10b

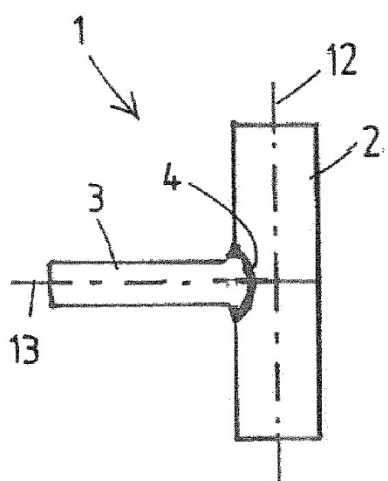


Fig.11a

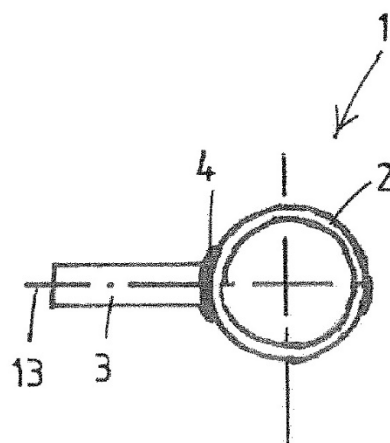


Fig.11b

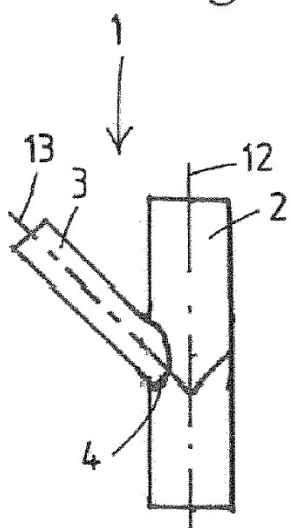


Fig.12a

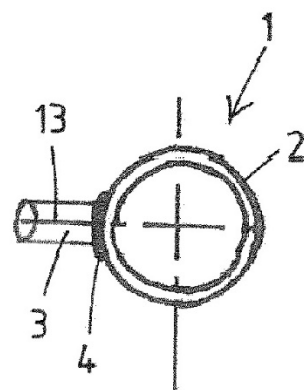


Fig.12b

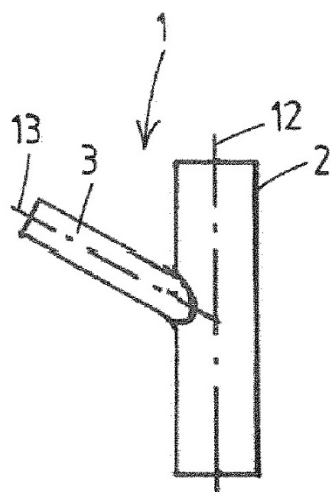


Fig.13a

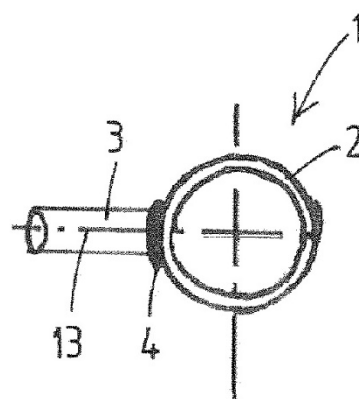


Fig.13b

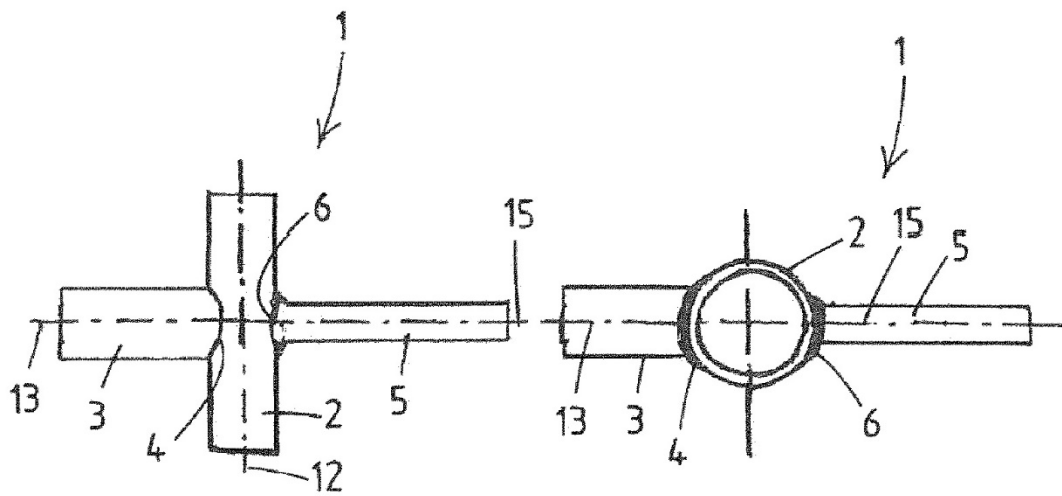


Fig.14a

Fig.14b

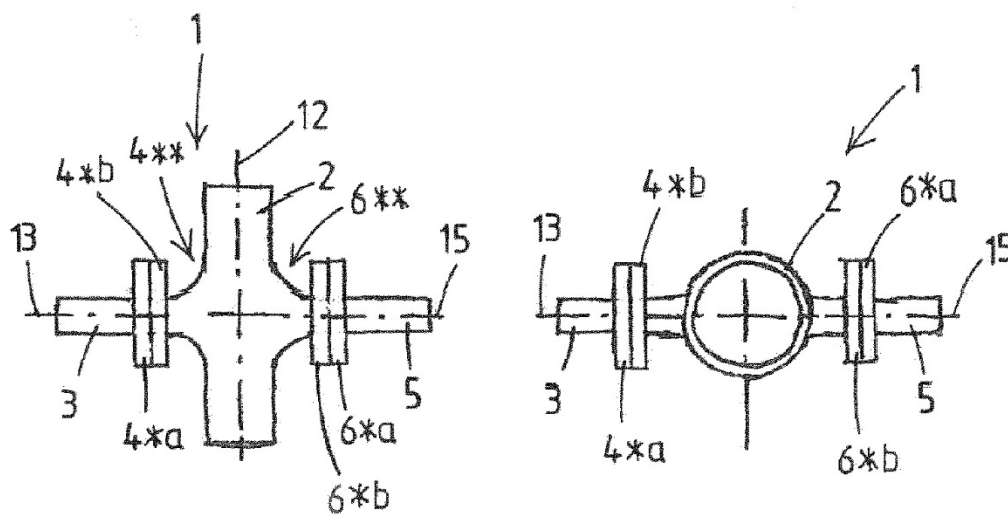


Fig.15a

Fig.15b

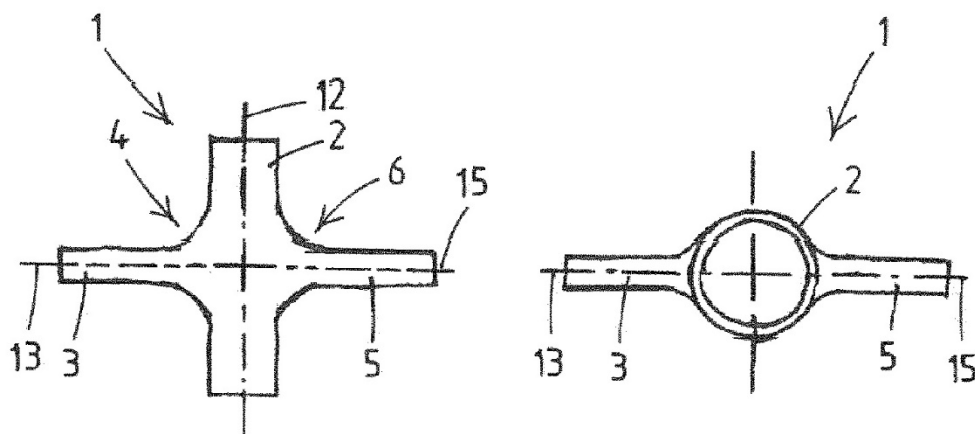


Fig.16a

Fig.16b

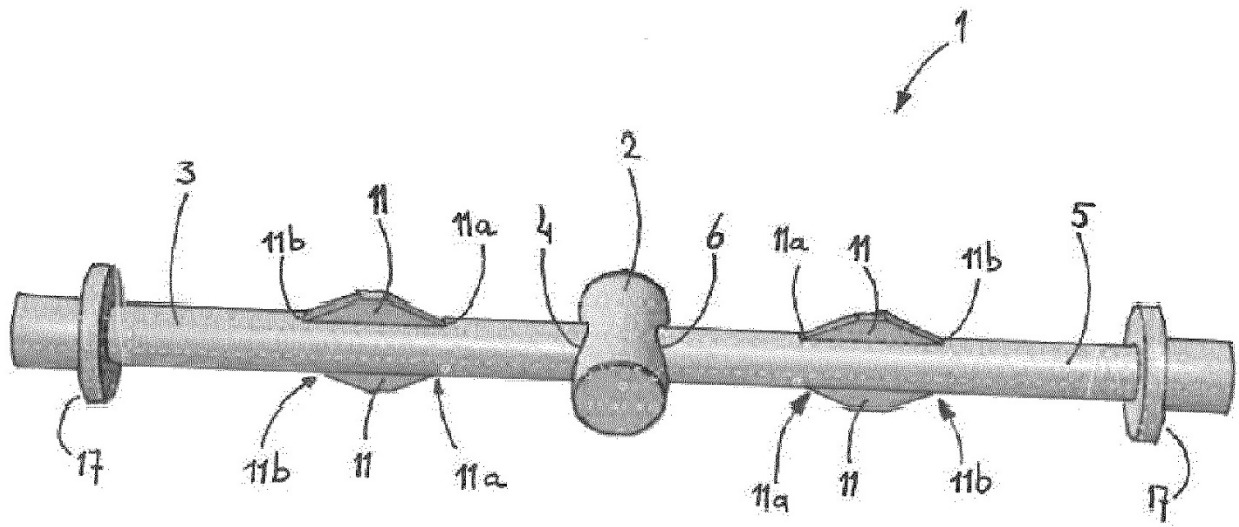


Fig. 17