

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 682 927**

51 Int. Cl.:

**F03G 7/06** (2006.01)

**A61B 17/66** (2006.01)

**A61B 17/72** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **18.02.2014 PCT/FI2014/050119**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **28.08.2014 WO14128349**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **18.02.2014 E 14708075 (8)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **11.07.2018 EP 2959163**

54 Título: **Actuador y método para mejorar un actuador**

30 Prioridad:

**22.02.2013 FI 20135175**

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

**24.09.2018**

73 Titular/es:

**SYNOSTE OY (100.0%)  
Spektri Business Park, Metsänneidonkuja 6  
02130 Espoo, FI**

72 Inventor/es:

**HALLILA, HARRI;  
HAAJA, JUHA y  
RITVANEN, ANTTI**

74 Agente/Representante:

**CAMPello ESTEBARANZ, Reyes**

ES 2 682 927 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

Actuador y método para mejorar un actuador

### 5 Aviso de financiación pública

Este documento puede contener resultados del trabajo financiado por Tekes (la Finnish Funding Agency for Technology and Innovation), la Universidad de Aalto y la Fundación Orton.

### 10 Campo de la invención

La invención se refiere a la construcción y uso de actuadores basados en aleaciones con memoria de forma.

#### Técnica antecedente

15

Se conocen actuadores que utilizan el cambio de forma de las aleaciones con memoria de forma o materiales magnetostrictivos a partir de las solicitudes de patente publicadas WO 2009/115645 A1 y WO 2011/148047 A1.

El Documento EP 2 133 566 A2 divulga un actuador de acuerdo con el preámbulo de la reivindicación 1.

20

El documento DE 10 2007 036 359 A1 divulga un actuador similar que tiene un apilamiento de resortes de compresión situada en torno a la varilla.

#### Objetivo de la invención

25

Es un objetivo mejorar los actuadores que utilizan el cambio de forma de las aleaciones con memoria de forma.

Este objetivo se puede cumplir con un actuador de acuerdo con la reivindicación 1, y con el método de acuerdo con la reivindicación 6.

30

Las reivindicaciones dependientes describen diversos aspectos ventajosos de los actuadores.

#### Ventajas de la invención

35 El actuador de la invención comprende al menos un convertidor basado en aleación con memoria de forma en un alojamiento y al menos un resorte de precarga. El actuador está configurado para provocar un movimiento de al menos un elemento móvil

40 - en una primera dirección, sobre el al menos un convertidor sometido a una transición de fase inducida térmicamente que lo hace contraerse, y

- en una segunda dirección que es opuesta a la primera dirección, sobre el al menos un convertidor que experimenta una transición de fase provocada por el cambio de temperatura y potenciada por el resorte de precarga que hace que el convertidor se alargue.

45 Además, el actuador comprende una varilla que se conecta a dicho elemento móvil y a un resorte, en el que el actuador está configurado para permitir que se tire de la varilla hasta un pretensado óptimo para el convertidor y una pieza de fijación a añadir para mantener el pretensado óptimo.

50 El actuador de la invención está caracterizado por que el resorte es uno de un apilamiento de resortes de compresión situado en torno a la varilla y un resorte de tensión que se conecta al extremo de la varilla. Además, el actuador de la invención está caracterizado por que el al menos un convertidor comprende al menos un haz de cables individuales o varillas fabricados o que consisten en aleación con memoria de forma de tal manera que en el haz los cables individuales están conectados eléctricamente entre sí en paralelo y dispuestos mecánicamente en paralelo; y opcionalmente, si hay más de un haz, los haces están conectados entre sí eléctricamente en serie o en  
55 paralelo y preferiblemente mecánicamente en paralelo.

Con los actuadores como se sugiere, la fuerza que puede ejercer el elemento móvil durante su movimiento en la segunda dirección puede aumentarse significativamente en comparación con la fuerza que se puede obtener por el actuador que no tiene precarga. Más precisamente, con este actuador, durante el movimiento en la segunda

dirección, la fuerza que puede ejercer el elemento móvil ya no es la fuerza del al menos un convertidor basado en aleación con memoria de forma, sino la fuerza de al menos un resorte de precarga.

Una ventaja que puede obtenerse con estos actuadores es que la cantidad de movimiento que puede causar el 5 actuador durante la fase de trabajo puede hacerse más predecible que en un actuador en el que se emplea al menos un convertidor basado en aleación con memoria de forma y un resorte de precarga, pero sin restringir la fuerza de precarga ejercida por el resorte de precarga, como se sugiere por los resultados mostrados en la Figura 6. Esto permite una construcción mucho más sencilla en comparación con el sistema de posicionamiento de un grado de libertad propuesto por Azfal Khan et al., en su cartel SHAPE MEMORY ALLOY WIRES FOR ACTUATING 10 POSITIONING SYSTEMS WITH ELASTIC BEARINGS, al momento de escribir electrónicamente recuperable en <http://www.aspe.net/publications/Annual 2005/POSTERS/2EQUIP/3DTE ST/1815.PDF>.

Otra ventaja que se considera potencialmente muy relevante para ciertos usos es que estos actuadores pueden tener más ciclos antes de fallar. El fin principal del restrictor es evitar que tal fuerza de precarga alta dañe el al 15 menos un convertidor basado en aleación con memoria de forma.

Si el actuador comprende además al menos un conector de transformador de compresión a tensión de precarga para pasar la fuerza ejercida por el al menos un resorte de precarga al convertidor, la configuración del actuador puede llevarse a cabo mediante una estructura mecánica relativamente sencilla.

20 Como en el actuador, el al menos un convertidor comprende al menos un haz de cables individuales o varillas fabricados de o que consiste en aleación con memoria de forma de tal manera que, en el haz, los cables individuales están conectados eléctricamente entre sí en serie o en paralelo y mecánicamente dispuestos en paralelo, se puede asegurar que la fuerza de contracción que se puede obtener del al menos un convertidor a través de su transición de 25 fase sea suficientemente alta ya que la disposición de cables o varillas en paralelo suma la fuerza de contracción de cada cable o varilla individual. Opcionalmente, si hay más de un haz, los haces pueden estar conectados entre sí eléctricamente en serie. De esta manera, se puede asegurar que el calentamiento de todos los cables o varillas en el haz se puede llevar a cabo simultáneamente para evitar dañar el actuador por una deformación no uniforme que podría dar como resultado la flexión del actuador, por ejemplo. Además, los haces se pueden conectar 30 preferiblemente en paralelo para aumentar la fuerza o para lograr la forma de movimiento deseada.

Si el actuador comprende además al menos dos conectores conectados eléctricamente a dicho haz para suministrar la energía eléctrica recibida desde una fuente de alimentación, tal como desde una batería conmutable de forma inalámbrica o a través de al menos una bobina inductiva en dicho actuador al haz, el actuador se puede usar de 35 manera inalámbrica. Esto es particularmente importante en dichas situaciones de uso del actuador cuando el actuador está diseñado como un actuador de un dispositivo de tratamiento ortopédico que se implementa en un paciente para un tratamiento de varios días, semanas o incluso meses, ya que gracias a la capacidad de uso inalámbrico, la energía puede suministrarse de manera inalámbrica al actuador y, por lo tanto, puede eliminarse la necesidad de tener heridas abiertas en el paciente durante el tratamiento.

40 Si en el actuador comprende al menos un haz de cables o varillas, la conexión eléctrica y mecánica entre los cables individuales del haz se implementa dentro de al menos una unidad de conexión, y en donde el restrictor está configurado para restringir la fuerza de tracción del haz restringiendo el movimiento de la al menos una unidad de conexión o una conexión a la transmisión de fuerza en la dirección de trabajo del al menos un resorte de precarga, la 45 al menos una unidad de conexión puede usarse para absorber gran parte o incluso toda la diferencia para cortar la mayor tensión de precarga del resorte de precarga con respecto a una fuerza inferior que actúa como la fuerza de tracción en al menos un convertidor.

Si en el actuador el resorte de precarga está dispuesto alrededor del convertidor de tal manera que la contracción 50 del convertidor tira del elemento móvil que comprime el resorte de precarga, el actuador puede hacerse más pequeño. Adicionalmente a esto, o como alternativa, se puede asegurar de una manera relativamente sencilla que la ubicación espacial relativa del resorte de precarga y el convertidor entre sí permanece prácticamente sin cambios durante el funcionamiento del actuador.

55 Si el alojamiento del actuador está encapsulado en un material biocompatible o consiste en un material biocompatible, el actuador puede usarse como un actuador en aparatos médicos o similares que pueden entrar en conexión con fluidos corporales o tejidos corporales.

Preferiblemente, el actuador está unido a un transformador que transforma el movimiento recíproco del elemento

móvil en un movimiento unidireccional. De esta manera, el actuador se puede usar como el actuador de un dispositivo que convierte el movimiento del actuador en un movimiento de distracción (extendiendo el movimiento o movimiento hacia fuera) o en un movimiento de contracción (acortando el movimiento o movimiento hacia afuera). Los dispositivos que producen movimientos de distracción o contracción se usan ampliamente en el campo de la medicina y, en particular, en ortopedia.

Preferiblemente, el convertidor basado en aleación con memoria de forma es o comprende uno o más elementos de NiTi. De forma particularmente ventajosa, la tensión impuesta sobre algunos o todos los elementos de NiTi por la fuerza de precarga está en el intervalo de 250 - 450 MPa durante la actuación y la tensión de tracción ejercida sobre los elementos de NiTi en su estado de martensítico es de 20 - 90 MPa. De esta manera, se puede asegurar que las fuerzas que puede producir el actuador sean lo suficientemente altas para muchos fines prácticos, en particular en el campo de la ortopedia y, en particular, para la osteodistracción o dispositivos de tratamiento de la escoliosis, tales como, pero sin limitación, los dispositivos utilizados en relación con la mandíbula, los metacarpianos, los metatarsos, la bóveda craneal, la zona media de la cara, los huesos tubulares largos u otros huesos. Dentro del intervalo presentado de las fuerzas de precarga y la tensión de tracción, la deformación de los elementos de NiTi se puede predecir mejor con una alta probabilidad. Además, el actuador puede tener una vida útil extendida, es decir, puede usarse para someterse a más ciclos bajo carga.

Preferiblemente, el actuador es adecuado para su uso como un actuador en un dispositivo de tratamiento implantable fijado o interconectado al hueso.

El actuador puede comprender en particular una pluralidad (es decir, al menos dos) actuadores ensamblados uno al lado del otro en el alojamiento. Este tipo de configuración es especialmente adecuada para un dispositivo de tratamiento de la escoliosis o un dispositivo interno de osteodistracción.

Como alternativa, el actuador puede comprender una serie de convertidores dispuestos en torno a un eje. Este tipo de configuración es especialmente adecuada para un actuador de distracción ósea de un dispositivo interno de osteodistracción.

### 30 Lista de dibujos

A continuación, los actuadores se describen con más detalle por referencia a los ejemplos mostrados en los dibujos adjuntos en las Figuras 1 a 28, en los que:

- |                    |  |
|--------------------|--|
| Figura 1           | ilustra el concepto de actuador basado en el sistema de prueba presentado;   |
| Figura 2           | ilustra el comportamiento de tensión-deformación teórico del actuador;   |
| Figura 3           | esquema del sistema de prueba y las muestras utilizadas;   |
| Figura 4(a) y (b)  | ilustra el comportamiento de tensión-deformación del alambre NiTi en el sistema de prueba, (a) muestra la prueba a 30 MPa y (b) la prueba a 69 MPa, el nivel de tensión más alto en cada curva se registra durante el calentamiento y el nivel inferior durante enfriamiento;  |
| Figura 5           | ilustra el comportamiento de deformación de NiTi durante la actuación a un pretensado de 69 MPa y un nivel de tensión de 250 MPa, la línea continua es la media de los ciclos de actuación de la prueba y los puntos representan las desviaciones estándar de la prueba;   |
| Figura 6           | ilustra la deformación frente al número de ciclos bajo una carga de 300 MPa;   |
| Figuras 7(a) y (b) | ilustran el comportamiento de deformación de los elementos de NiTi en diferentes condiciones de carga: (a) muestra el rendimiento a un pretensado de 30 MPa y (b) en un pretensado de 69 MPa;  |
| Figuras 8(a) y (b) | en (a) se ilustra la tensión neta ilustrada en función de la deformación alcanzada y en (b) la tensión neta lograda se ilustra en función de la resistencia a la fatiga lograda para todas las combinaciones de tensión-pretensado probadas: los símbolos de color negro representan un pretensado de 69 MPa y los símbolos de color blanco un pretensado de 30 MPa; |
| Figura 9           | dibujo esquemático de una segunda realización del actuador presentado;   |
| Figura 10          | dibujo esquemático de la primera realización del actuador presentado en la Figura 1;   |
| Figura 11          | una sección de un primer actuador de acuerdo con la segunda realización;   |
| Figura 12          | una sección de un segundo actuador de acuerdo con la segunda realización;  |

Figura 13	una sección de un segundo actuador de acuerdo con la segunda realización en un estado contraído;
Figura 14	una sección del actuador de acuerdo con la primera realización mostrada en la Figura 1 y 10;
Figura 15 - 17	ilustran el ciclo de un actuador de acuerdo con la segunda realización, desde la fase inicial del actuador, a través del movimiento en la primera dirección a la fase contraída y a través del movimiento en la segunda dirección de nuevo a la fase inicial;
Figura 18	ilustra ciertos componentes de un actuador de acuerdo con una tercera realización que es un actuador que comprende al menos dos actuadores ensamblados uno al lado del otro en el alojamiento;
Figura 19	ilustra ciertos componentes de un actuador de acuerdo con una cuarta realización que es un actuador que comprende una serie de convertidores dispuestos en torno a un eje;
Figuras 20, 23 y 24	ilustran un actuador de distracción ósea;
Figura 21	sección A-A del actuador de distracción ósea;
Figura 22	es una vista ampliada C del extremo de apilamiento de resortes del actuador de distracción ósea como se ilustra en la Figura 23; y
Figura 25	ilustra las secciones D-D y E-E en las ubicaciones ilustradas en la Figura 24.
Figura 26	ilustra las partes del actuador
Figura 27 (a)	ilustra la vista general del actuador
Figuras 27 (b) y (c)	ilustran las vistas en sección de los puntos críticos del actuador de la Figura 27 (a).
Figura 28	ilustra las posiciones de las partes del actuador

Los mismos números de referencia se refieren a las mismas características técnicas en todos los dibujos.

## Descripción detallada

5

### 1. Introducción

Se ha inventado un actuador de aleación con memoria de forma (SMA) que produce un rendimiento de salida predecible y se ha probado.

10

Hay varias áreas de aplicación para actuadores SMA con limitaciones de espacio reducido, donde el control del actuador utilizando sensores es difícil de realizar.

15

El sistema de prueba para el concepto de actuador permitió la evaluación del rendimiento de NiTi contra una carga constante con diferentes pretensados. Los elementos de NiTi comercialmente disponibles, los alambres Flexinol® (marca comercial de Dynalloy, Inc.), se probaron en este sistema contra altos niveles de carga constante de 250, 300, 350 y 400 MPa en dos valores de pretensado diferentes, 30 MPa y 69 MPa. Se midieron la deformación de salida y la resistencia a la fatiga de los alambres de NiTi en estas condiciones. Se encontró que aumentar el nivel de tensión disminuye la resistencia a la fatiga como se esperaba. Además, aumentar el pretensado de 30 MPa a 69 MPa mejoró la deformación de salida en todos los niveles de tensión. Se encontró que diferentes combinaciones de tensión-pretensado pueden conducir a la misma fuerza de salida neta del material, pero su deformación máxima de salida y resistencia a la fatiga son diferentes. De acuerdo con los resultados, el concepto de actuador es factible y se puede realizar con un rendimiento de salida predecible.

25

Las aleaciones con memoria de forma se utilizan en una amplia diversidad de aplicaciones que van desde dispositivos médicos e implantes (Aalsma 1997, Ryhänen 1999) hasta aplicaciones aeroespaciales (Chau 2006) y robótica (Kheirikhah 2011). La mayoría de estas aplicaciones utilizan aleaciones binarias de níquel-titanio debido a sus propiedades mecánicas y de memoria de forma superiores. Generalmente, en aplicaciones típicas de actuadores, los elementos de níquel-titanio (NiTi) están diseñados para durar cientos de miles de ciclos, lo que a su vez limita el nivel de tensión a menos de 200 MPa (Dynalloy 2012, Mertmann 2009).

30

Fumagalli et al. (2009) presentaron los mecanismos comunes de reajuste utilizados en las aplicaciones de actuadores SMA. En todos estos mecanismos de reajuste, el elemento de NiTi funciona directamente contra la carga externa. Se han propuesto diseños similares por otros (Aalsma 1998, Elwaleed 2007, Kim 2008). Sin embargo, se ha demostrado que el rendimiento de la deformación y de la resistencia a la fatiga de NiTi dependen en gran medida de

35

la tensión que se le impone (Lagoudas 2009, Mammano y Dragoni 2012, Bertacchini 2009). Esto conduce a un comportamiento de actuación impredecible, y un control preciso requiere sensores y circuitos de retroalimentación.

Las aleaciones de NiTi son particularmente lucrativas para su uso en implantes médicos debido a su biocompatibilidad establecida (Ryhanen 1999, Shabalovskaya 2002) y alta densidad de potencia (Reynaerts 1998). En muchas de estas aplicaciones, por ejemplo en el campo de la ortopedia, se necesitan grandes fuerzas pero el espacio es limitado. Las limitaciones de espacio también limitan la posibilidad de usar sensores para el control de actuación. Por lo tanto, sería una gran ventaja si un actuador pudiera construirse de tal manera que se comporte de forma predecible en diversas condiciones de carga. Además, la cantidad de ciclos de actuación necesarios en aplicaciones ortopédicas suele ser bastante baja. Esto permite la utilización de SMA en altos niveles de tensión, lo que no se ha estudiado ampliamente.

Las aleaciones con memoria de forma también se presentan en Dahlgren 2009. En la aplicación, los elementos de NiTi se pueden mover en cada impulso y cambiar su posición en el implante. Esto significa que la carga externa ejercida sobre los elementos de NiTi no es bien conocida y cambiará de acuerdo con la ubicación de los elementos.

Adicionalmente, se presenta un dispositivo para mover dos cuerpos uno con respecto al otro en Soubeiran 2003. La aplicación utiliza un resorte. La potencia del dispositivo se reduce aumentando el número de actuaciones, ya que la compresión del resorte disminuye. Esto, en la práctica, llevaría a que el dispositivo se atasque. No se da ninguna señal sobre la utilización de aleaciones con memoria de forma o cualquier otro material inteligente.

La Universidad Tecnológica de Helsinki 2009 presenta la aleación con memoria de forma pero no la aplicación de la misma. En la aplicación, el resorte es solo el resorte de precarga del material magnetoestrictivo y no aplica ningún trabajo externo.

Además, la publicación Olympus Corp. 2012 presenta un actuador que es un alambre de aleación con memoria de forma, que se contrae cuando se calienta y se expande cuando se enfría. El dispositivo consiste en un elemento hueco, un elemento móvil, un elemento elástico y un elemento de aislamiento. Se evita que el alambre de aleación con memoria de forma esté en contacto eléctrico con el elemento elástico. Por lo tanto, el elemento de NiTi está aislado del resorte de precarga. Sin embargo, los elementos de aislamiento también llevan la carga, lo que en la práctica causaría problemas, ya que los materiales típicos no son lo suficientemente fuertes.

Takahashi M 2009 describe un actuador SMA genérico, que permite el movimiento recíproco del elemento móvil en la cantidad de la capacidad de alargamiento del elemento SMA.

Stolz-Irion R 2009 describe un clavo intramedular alargado usando un actuador SMA para realizar el alargamiento gradual del dispositivo.

En esta comunicación, se presenta un concepto de actuador que utiliza NiTi para generar una deformación y fuerza de salida predecibles. El concepto se evalúa utilizando un sistema de prueba que simula el comportamiento de NiTi en condiciones de carga similares a las del actuador propuesto. El rendimiento de los alambres del actuador de NiTi se evalúa en diversos niveles de alta tensión con dos valores de pretensado diferentes. Particularmente, se estudian la evolución de la deformación en la fase martensítica y austenítica y la resistencia a la fatiga del material. Estos resultados se pueden utilizar para realizar el concepto de actuador propuesto y optimizarlo para diversos niveles de tensión.

Otra ventaja más del presente concepto de actuador es que los elementos de NiTi permanecen en una posición dentro del implante y, por lo tanto, las cargas externas pueden minimizarse debido a que el conocimiento de la posición exacta puede usarse para dirigir las cargas, por ejemplo, doblándose, lejos de esta área. Las ventajas se obtienen al estabilizar el trabajo externo del dispositivo, mediante la utilización de pequeños elementos aislantes que están libres de cargas.

Horst et.al. 2013 analizan el dispositivo médico que incluye una estructura contráctil artificial que tiene al menos dos elementos contráctiles adaptados para contraer un órgano. El elemento de NiTi de la publicación se utiliza para apretar una parte del cuerpo tubular. La publicación no da ningún dato sobre la separación de los extremos del elemento de NiTi de tal forma que la compresión del elemento de NiTi hará que las partes del dispositivo diverjan entre sí.

Belson 2013 analiza un aparato y un método para colectomía endoscópica. La publicación no da ningún dato para

utilizar un resorte de precarga o transferir su carga a un elemento de NiTi. El elemento de NiTi se usa para girar en torno al extremo endoscópico del dispositivo. No da ningún dato para divergir partes del dispositivo entre sí.

Es una ventaja del otro actuador que se refiere a la invención que los elementos de NiTi se pueden usar para separar o divergir las partes del dispositivo entre sí.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Concepto de actuador

10

Una representación esquemática del actuador 10 que actúa contra una carga constante y conocida se presenta en la Figura 1. El actuador comprende un elemento de NiTi, un resorte y el alojamiento (un tubo, por ejemplo). El resorte está precargado al nivel de tensión que se espera que produzca el actuador. El elemento de NiTi debe montarse en el tubo de tal manera que su alargamiento en la fase martensítica cause el pretensado deseado sobre el mismo.

15

Ahora, cuando el elemento de NiTi comience a alargarse, funcionará contra la carga de resorte predeterminedada. Cuando se deja enfriar el NiTi, el resorte lo devuelve a la posición original mientras se genera una fuerza de salida neta. La fuerza de salida neta se puede definir como,

$$F_{\text{net}} = (\sigma_s - \sigma_p) A \quad (1)$$

20

donde  $\sigma_s$  es la tensión impuesta sobre el NiTi por el resorte al actuar,  $\sigma_p$  es la tensión que actúa sobre el NiTi en la fase martensítica, y A es el área del elemento de NiTi.

La deformación martensítica necesaria para provocar el pretensado deseado en el elemento de NiTi puede determinarse usando la ley de Hooke,

25

$$\varepsilon_M = \sigma_p / E \quad (2)$$

donde  $\varepsilon_M$  es la deformación requerida para causar el pretensado y E es el módulo de Young de NiTi en la fase martensítica. La deformación de memoria de forma del actuador se calcula a partir de la deformación martensítica,  $\varepsilon_M$ , y la deformación austenítica,  $\varepsilon_A$ . La deformación de memoria de forma es

30

$$\varepsilon_{\text{SME}} = \varepsilon_M - \varepsilon_A \quad (3)$$

La producción teórica de tensión-deformación del actuador 10 se muestra en la Figura 2. Cuando se ensambla el actuador 10, la deformación en la fase martensítica se determina mediante la Ecuación (2). Cuando el actuador 10 comienza a actuar, la tensión salta directamente al nivel de tensión  $\sigma_s$ . En este punto, el actuador 10 comienza a generar una deformación de salida, y la tensión máxima  $\sigma_m$  que actúa en contra de al menos un elemento de NiTi 11, se determina por la tensión precargada del resorte de precarga 12 y su factor de elasticidad k:

40

$$\sigma_m = \sigma_s + k \varepsilon_{\text{SME}} / A \quad (4)$$

Una vez que se deja enfriar al menos un elemento de NiTi 11, se libera la energía almacenada en el resorte de precarga 12 durante el calentamiento y se generan deformación y fuerza a partir de la producción del actuador que está configurada como el elemento móvil 13 (véase la Figura 14) y/o que puede transmitirse a través de la abertura 1113 para el elemento móvil.

45

Una ventaja de un actuador 10 es que el al menos un elemento de NiTi 11 siempre actúa contra una carga conocida. Siempre que la carga definida por el resorte de precarga 12 seleccionado no se exceda, el actuador 10 actúa de manera predecible. Sin embargo, debido a que el pretensado ejercido sobre al menos un elemento de NiTi 11 se determina por la unión del al menos un elemento de NiTi 11 en el actuador 10, es importante conocer la evolución de la deformación plástica en la fase martensítica. Si se acumula una cantidad excesiva de deformación plástica, el pretensado impuesto sobre el elemento cambia y conduce a cambios en el rendimiento.

50

### 55 2.2. Evaluación del concepto de actuador

Para evaluar la viabilidad del concepto de actuador, se diseñó y se construyó un sistema de prueba 30. Los alambres de NiTi 302 utilizados eran Flexinol® de calidad comercial adquiridos en Dynalloy, Inc. El diámetro nominal

de los alambres de NiTi 302 era de 0,381 mm. Los extremos de los alambres de NiTi 302 se ajustaron a presión con terminales de crimpado en barril de acero inoxidable 301 para permitir un montaje fácil en el sistema de prueba. La longitud del alambre de NiTi 302 entre los terminales de crimpado 301 se ajustó a  $20,0 \pm 0,1$  mm. Se muestra una ilustración esquemática de la muestra 300 en la parte inferior de la Figura 3.

5

El sistema de prueba 30 se muestra en la Figura 3. El lado derecho muestra el resorte de precarga 12, que tiene una pequeña constante elástica, dentro del alojamiento 14 (preferiblemente implementado como un tubo de acero inoxidable). La varilla 31 atraviesa el resorte de precarga 12 y está unida a la muestra 300, como se muestra a la izquierda en la Figura 3. El otro extremo de la varilla 31 está unido al bloque de acero 17 que comprime el resorte contra el lado izquierdo del alojamiento 14. Antes de unir la muestra 300 al sistema de prueba 30, el resorte de precarga 12 se apretó al nivel deseado utilizando una máquina de prueba de materiales (Sistema de mesa MTS® 858, equipado con el controlador FlexTest® y el software MTS TestSuite™ Multi Purpose Elite, todos marcas comerciales de MTS Systems Corporation). Al nivel de tensión deseado, la abrazadera de bloqueo 34 del resorte de precarga 12 se apretó en su lugar para mantener el resorte de precarga 12 en la carga. De esta manera, el alambre de NiTi 302 se sometió a la tensión máxima tan pronto como comenzó a actuar como en el concepto de actuador propuesto.

Después de la precarga del resorte, el alambre de NiTi 302 se unió a la varilla de compresión 31 del resorte de precarga 12. En este punto, el bloque de retención 39 de la muestra 300 mostrado a la izquierda en la Figura 3 se unió a la conexión de celda de carga 32 de la máquina de prueba de materiales y el valor de la celda de carga se puso a cero. Después del ajuste a cero de la celda de carga, la muestra 300 se unió al bloque de retención de muestra 39 y el extensómetro 37 se aseguró en su lugar para registrar la deformación.

Se usó corriente eléctrica para calentar de forma resistiva el alambre de NiTi 302. Antes de la activación de la corriente, el alambre de NiTi 302 se pretensó hasta un valor de pretensado deseado utilizando el actuador hidráulico de la máquina de prueba de materiales a través de la conexión 35 a la máquina hidráulica, para tirar del alambre de NiTi 302. Después de lograr el valor de pretensado deseado, el actuador hidráulico se mantuvo en su lugar en modo de control de desplazamiento mientras se aplicaba la corriente y el alambre de NiTi 302 comenzaba a actuar contra la carga del resorte de precarga 12.

30

La actuación se logró suministrando una corriente eléctrica de 2,25 a 3,5 A durante 2,25 a 5 segundos al alambre de NiTi 302. Esto se logró usando una fuente de alimentación en modo de control de tensión limitada de corriente, que se acopló al alambre de NiTi 302 a través de un relé de estado sólido. La operación de este relé se controló por un programa construido para máquina de prueba de materiales. La corriente y el tiempo de actuación óptimos se seleccionaron para lograr una transformación lo más completa posible en la fase austenítica. Esto se realizó observando el comportamiento de deformación del alambre de NiTi 302; y tan pronto como la deformación comenzó a nivelarse hasta la saturación, la corriente se desconectó. No se realizó ninguna medición directa de la temperatura del alambre de NiTi 302. Después de la actuación, las muestras 300 se enfriaron usando convección de aire forzado. Este ciclo de pretensado-actuación-enfriamiento se repitió hasta que las muestras fallaron.

40

Se registraron datos de fuerza y deformación máximas a 102,4 Hz de cada décimo ciclo. Los valores máximos y mínimos de fuerza y deformación se obtuvieron de los ciclos restantes. La deformación no se corrigió para la deformación causada por la tensión o por la expansión térmica debido a su efecto limitado en comparación con el efecto de memoria de forma.

45

### 3. Resultados

La Figura 4 muestra curvas de tensión-deformación para muestras de alambre de NiTi 302 a diferentes niveles de tensión y pretensado. Es evidente que la configuración de prueba se comporta como se desea y la muestra de alambre de NiTi 302 está sometida a la tensión máxima casi inmediatamente al inicio de la actuación. Sin embargo, el aumento de la tensión no es instantáneo, como se muestra en la actuación teórica mostrada en la Figura 2. Esto se debe a que la abrazadera de bloqueo de resorte 34 actúa también como un resorte, aunque con un coeficiente de resorte muy alto. Como se esperaba, el nivel de tensión no es completamente constante durante la actuación, sino que aumenta de acuerdo con la constante de resorte del resorte de carga, como se describe en la Ecuación 4. El área dentro del bucle de tensión-deformación en la parte superior de la Figura 4(a) muestra que hay algo de fricción en el sistema de prueba que hace que el nivel de tensión durante el calentamiento y el enfriamiento sea ligeramente diferente.

Sin embargo, en la mayoría de las pruebas realizadas, la fricción causada por el propio sistema de prueba es

mínima. Los resultados muestran que los niveles de tensión inferiores, en general, conducen a conseguir deformaciones más altas. En todos los niveles de tensión, los alambres de NiTi 302 lograron mayores deformaciones en el pretensado de 69 MPa.

5 La Figura 5 muestra el comportamiento de deformación típico de un alambre de NiTi 302 bajo actuación. La Figura 5 muestra la media de los ciclos de actuación y la desviación estándar a un nivel de confianza del 95 %. El ancho de la desviación estándar se debe a la disminución de la deformación a medida que el material realiza el ciclo.

La deformación se acumula rápidamente al comienzo de la actuación, pero se ralentiza cuando se aborda la transformación completa. El 80 % de la deformación máxima se logra durante los primeros 0,7 segundos de la actuación de 2,5 s. Los siguientes 1,8 segundos (o 72 %) del tiempo de actuación solo causan un 20 % adicional de deformación. Por lo tanto, la eficiencia energética del material se puede mejorar sacrificando parte de la deformación máxima. También se ha confirmado en múltiples estudios que la vida útil de las aleaciones de SMA aumenta si el material se transforma solo parcialmente (Lagoudas et al., 2009).

15 La Figura 6 muestra la deformación de las muestras en función del número de ciclos bajo un nivel de tensión de 300 MPa. El aumento del pretensado nominal de 30 MPa a 69 MPa aumenta significativamente la deformación. Se observó un comportamiento similar en todos los niveles de tensión probados. Sin embargo, parece que al aumentar el pretensado se reduce la cantidad máxima de ciclos antes del fallo. Se necesitarían más pruebas para confirmar este comportamiento, ya que no se realizaron pruebas repetidas en este estudio. La fuerza de salida neta es menor a una pretensión más alta debido al hecho de que se requiere una mayor porción de la fuerza para superar el pretensado.

20 La Figuras 7 (a) y (b) muestran el efecto de aumentar el nivel de tensión con el que tiene que trabajar el material mientras se mantiene constante la pretensión. Parece que al aumentar el nivel de tensión al que el alambre de NiTi 302 tiene que funcionar, disminuye la deformación de memoria de forma lograda. Esto se vuelve más claramente visible en la Figura 7 (b). De hecho, en las pruebas mostradas en la Figura 7 (a), la tensión de 250 MPa dio deformaciones inferiores a la prueba a 310 MPa. La cantidad de ciclos de actuación que el material puede presentar antes del fallo también parece disminuir con el aumento de la tensión. La prueba de 350 MPa a un pretensado de 69 MPa difiere de esta tendencia. Se necesitan más pruebas para concluir cómo la tensión creciente afecta la resistencia a la fatiga.

25 Es evidente que la deformación máxima alcanzable disminuye rápidamente durante los primeros ciclos de actuación. El efecto es más pronunciado a niveles de tensión más altos. Sin embargo, entre 1000 y 2000 ciclos, la deformación alcanzable se estabiliza y la velocidad a la que se pierde la capacidad de deformación disminuye. A partir de este punto, el material presenta una deformación estable, aunque disminuye lentamente, hasta el fallo.

30 La Tabla 1 resume todos los resultados en este estudio. Los valores en la Tabla 1 se han calculado a partir de los puntos marcados por símbolos en la Figura 7. El primer y el segundo punto en cada curva representan los puntos usados para el cálculo de la disminución de deformación de memoria de forma al comienzo de los ciclos de actuación. Los puntos tres y cuatro se usan para el cálculo de la disminución de la deformación,  $d_{\text{SME}}$ , en la región estable, y el último punto es también la deformación en el momento del fallo. De nuevo parece que la cantidad de ciclos que el material puede resistir disminuye a medida que aumenta el nivel de tensión. Aumentar el pretensado tiene un efecto similar. De manera similar, se puede observar la caída rápida de la deformación al comienzo de los ciclos de actuación y su aumento a niveles de tensión más altos. En todos los niveles de tensión, la deformación aumenta al pasar de 30 MPa a 69 MPa de pretensado. La velocidad a la que se pierde la deformación después de alcanzar la región de deformación estable en 2000 ciclos es despreciable y el comportamiento del material permanece predecible hasta el fallo.

50 **Tabla 1: Datos de rendimiento de las muestras de NiTi**

Tensión (MPa)	Pretensado (MPa)	Tensión neta (MPa)	$\epsilon_{\text{SME}}$ pérdida a 2000 Ciclos máx. (%)	$\epsilon_{\text{SME}}$ en el momento del fallo (%)	$d_{\text{SME}}$ (%)	
235	68	160	6151	0,37	4,63	0,06
249	30	215	7701	0,48	2,83	0,07
305	27	276	7091	0,65	3,13	0,10
316	67	195	6481	0,74	3,65	0,11
349	27	324	7371	0,67	2,67	0,08
350	65	282	7601	0,84	3,14	0,11

379	67	310	4961	0,98	3,01	0,10
401	29	342	6011	1,04	2,30	0,10

- La Figura 8(a) muestra la deformación y la tensión neta logradas para los diferentes niveles de tensión y pretensado. La correlación entre la tensión y la deformación de salida netas no es directa. Depende en gran medida de la combinación de la tensión y el pretensado que da como resultado la producción neta. Por ejemplo, se puede lograr una producción neta aproximada de 320 MPa utilizando dos combinaciones de las pruebas realizadas. Cuando se utiliza un pretensado de 27 MPa y un nivel de tensión de 349 MPa, la deformación producida es del 2,7 %. Casi la misma tensión de salida se puede lograr con un pretensado de 67 MPa y un nivel de tensión de 379 MPa, pero en este caso, se produce una deformación del 3 %.
- El efecto de la combinación correcta es aún más pronunciado cuando se comparan las dos combinaciones que producen una tensión de salida neta de aproximadamente 200 MPa. La combinación con el pretensado inferior produce una deformación inferior al 3 %, mientras que la combinación con el pretensado de 69 MPa produce una deformación de casi el 4 %. De nuevo entonces, a un nivel de tensión neta de 270 MPa, no se puede hacer una diferencia significativa entre la combinación con un pretensado inferior y la combinación con un pretensado superior.
- Por otro lado, la Figura 8(b) muestra que las combinaciones de tensión-pretensado más altas conducen a una menor resistencia a la fatiga.

#### 4. Análisis

- El sistema de prueba presentado en este trabajo representa una forma factible de probar el rendimiento del alambre de NiTi 302 bajo carga constante a la vez que permite el ajuste del pretensado como una variable independiente. Por lo tanto, el sistema de prueba 30 se puede usar para simular el rendimiento del concepto de actuador propuesto anteriormente en diversas configuraciones posibles. Se pueden realizar mejoras adicionales en el sistema de prueba 30 para minimizar la generación de fricción en el conjunto de resorte de carga. Todas las muestras 300 fallaron con una fractura en la longitud libre de los alambres de NiTi 302, lo que indica que la fijación de la muestra funcionó según lo previsto y no se generaron tensiones excesivas en los sitios de crimpado.

- Los resultados obtenidos con el sistema de prueba 30 se pueden comparar con estudios publicados que evalúan la resistencia a la fatiga de NiTi bajo carga constante. Aunque la aleación estudiada por Lagoudas et al. (2009) fue NiTiCu en lugar de NiTi binario, se puede hacer la comparación. Sus resultados mostraron una evolución similar de la deformación a medida que el material realiza el ciclo. Especialmente, la fuerte disminución de la deformación al comienzo del ciclo es evidente. Sus resultados también mostraron que al aumentar el nivel de tensión se reduce la resistencia a la fatiga de las muestras.

- Comparando los resultados con los de Mammano y Dragoni (2012), que estudiaron la fatiga funcional de NiTi en diversas condiciones de carga, su prueba de ciclado de esfuerzo constante no muestra una caída tan pronunciada al comienzo de la prueba. Sus resultados, sin embargo, confirman que al aumentar la tensión a la que está sometido el elemento de NiTi, disminuye la resistencia a la fatiga de las muestras. A un nivel de tensión de 200 MPa, Mammano y Dragoni observaron una resistencia a la fatiga de 3.509-4.940 ciclos, lo que es similar a los resultados actuales con un nivel de tensión de 400 MPa. Sin embargo, en su caso, la tensión máxima de 200 MPa también actuó como pretensado del material, y en el presente estudio el pretensado se ajustó por separado. Esto respalda la hipótesis de que aumentar el pretensado al que está sometido el NiTi disminuye la resistencia a la fatiga.

- Los resultados de este estudio tienen varias implicaciones para realizar el actuador como se analiza con más detalle a continuación. Para las aplicaciones en las que la eficiencia de calentamiento es importante, por ejemplo en dispositivos de implantes médicos, se prefiere el uso de la transformación parcial. Calentar el material hasta que se logre la transformación completa es ineficiente porque la acumulación de deformación se ralentiza considerablemente cuando se aproxima al punto de transformación completa. Esto conduce a la generación de exceso de calor al tiempo que se logra un pequeño cambio en la deformación máxima. Como se ha señalado anteriormente, también se ha encontrado que la transformación parcial aumenta la resistencia a la fatiga del material.

- La disminución rápida de la deformación durante el comienzo de los ciclos de actuación en un nuevo elemento de NiTi conduciría a una predecibilidad deficiente del comportamiento del actuador, a menos que se tenga en cuenta. Al construir un actuador, especialmente si se emplean altos niveles de tensión, es beneficioso envejecer los elementos por ciclado antes de su uso. Después de la fuerte caída inicial en la deformación alcanzada, el material se comporta de manera predecible. Esto es especialmente importante en la construcción de un actuador de acuerdo con el

concepto presentado, ya que la acumulación de deformación martensítica plástica provocaría un cambio en el pretensado al que está sometido el NiTi. Si la acumulación de esta deformación plástica es suficientemente grande, el actuador funcionará.

5 Hay muchas combinaciones de niveles de pretensado y tensión que pueden lograr la misma fuerza de salida de NiTi. Resulta evidente que la selección de la combinación afecta al rendimiento alcanzado. A partir de los valores de pretensado probados de 69 MPa y 30 MPa, el pretensado de 69 MPa condujo a una mayor deformación de salida en todos los niveles de tensión. Es posible alcanzar deformaciones más altas a un cierto nivel de fuerza de salida utilizando una mayor tensión y pretensado. Sin embargo, al mismo tiempo, se debe sacrificar el ciclo de vida máximo del material.

Se pueden necesitar más estudios para probar el rendimiento del NiTi a diferentes valores de tensión y pretensado a fin de encontrar las combinaciones de tensión-pretensado óptimas para diferentes aplicaciones.

## 15 5. Conclusiones

Se ha implementado un sistema de prueba 30 que permite la prueba del alambre de NiTi 302 bajo tensión constante con el ajuste libre del pretensado como una variable independiente. Después, se ha usado el sistema de prueba 30 para estudiar el rendimiento de los alambres de NiTi 302 a altos niveles de tensión de 250 MPa a 400 MPa en dos valores de pretensado diferentes de 30 MPa y 69 MPa. A partir de los resultados, se ha concluido que un pretensado de 69 MPa conduce a mayores deformaciones en todos los niveles de tensión en comparación con el pretensado de 30 MPa. Además, se puede demostrar que la utilización de una transformación parcial puede aumentar la eficiencia energética del material si se puede sacrificar parte de la deformación máxima. También se ha encontrado que para generar una fuerza de salida predefinida del material, se pueden usar varias combinaciones diferentes de tensión-pretensado. La selección de la combinación tiene implicaciones profundas sobre la deformación máxima y la resistencia a la fatiga logradas. Se pueden realizar estudios adicionales para encontrar las combinaciones óptimas para los diferentes requisitos de deformación y resistencia a la fatiga.

El concepto de actuador presentado es beneficioso en muchas aplicaciones, donde se necesita una fuerza salida alta y una deformación de salida predecible. Los resultados de la prueba muestran que NiTi podría utilizarse de la manera que describe el concepto. Sin embargo, para evaluar completamente el concepto, el actuador debe realizarse y probarse por separado. Esto se debe principalmente al hecho de que el concepto propuesto no permite el ajuste del pretensado durante la prueba, a diferencia del sistema de prueba utilizado en este trabajo.

## 35 Realizaciones ejemplares de los presentes actuadores

### 1) Primera realización (Figuras 1, 10 y 14):

Ciertos detalles del actuador 10 ilustrado en la sección en la Figura 1 y la Figura 14 y esquemáticamente en la Figura 10 ya se han analizado anteriormente. El elemento de NiTi 11 que comprende terminales de crimpado 161, 162 en ambos de sus extremos se dispone para pasar a través de un resorte de precarga 12. Los terminales de crimpado 161, 162 pueden presionarse en torno al elemento de NiTi 11, o pueden formarse integralmente, especialmente mediante un procesamiento adecuado, por ejemplo, girando o fresando o utilizando un proceso de eliminación de virutas adecuado. De acuerdo con la invención, el elemento (11) comprende al menos un haz de alambres o varillas individuales que se fabrican de o que consisten en aleación con memoria de forma de tal manera que en el haz los alambres individuales están conectados eléctricamente entre sí en paralelo y dispuestos mecánicamente en paralelo. El resorte de precarga 12 actúa como un transformador de tracción-tensión 18. El resorte de precarga 12 y el elemento de NiTi 11 están confinados en el alojamiento 14 que tiene como salida del actuador uno o al menos un elemento móvil 13. En la Figura 1, solo se muestra la abertura 1113 para el elemento móvil 13, el elemento móvil 13 está en su lugar en la Figura 14.

En lugar del elemento de NiTi 11 que es preferiblemente de Flexinol®, pero que, en general, puede reemplazarse por uno o más convertidores de material que presenta un rendimiento de aleación con memoria de forma, aquí se analiza el presente actuador 10 con la ayuda del elemento de NiTi ejemplar 11 para mayor claridad.

55 El elemento de NiTi 11 está configurado para provocar un movimiento del al menos un elemento móvil 13 en una primera dirección, sometiendo al elemento de NiTi 11 a una transición de fase inducida térmicamente desde el estado martensítico al estado austenítico que hace que se contraiga, y en una segunda dirección que es opuesta a la primera dirección, sometiendo al elemento de NiTi 11 a una transición de fase desde el estado austenítico al

estado martensítico provocado por el cambio de temperatura y potenciado por el resorte de precarga 12 que alarga el elemento de NiTi 11.

Debe entenderse que el alojamiento 14 del actuador 10 actúa como restrictor que se ha configurado para restringir el movimiento del elemento de NiTi 11.

El resorte de precarga 12 en su estado inicial está precargado con una fuerza de precarga que se encuentra preferiblemente en el intervalo de 250 a 450 MPa (en particular, en el intervalo entre 300 y 350 MPa) durante la actuación y la tensión de tracción causada en los elementos NiTi en su estado martensítico está en el intervalo de 20 a 90 MPa (en particular, en el intervalo entre 67 a 71 MPa), y se limita por el alojamiento 14 (más generalmente, se puede usar cualquier disposición restrictiva) de tal manera que la tensión resultante de la fuerza de tracción en el elemento de NiTi 11 es menor que la fuerza de precarga del resorte de precarga 12.

## 2) Segunda realización (Figuras 9, 11, 12, 13, y 15 a 17):

La Figura 9 es un dibujo esquemático del actuador 110, 120 de acuerdo con la segunda realización del presente actuador.

La Figura 11 muestra una sección de un primer actuador 110 de acuerdo con la segunda realización y la Figura 12 una sección de un segundo actuador 120 de acuerdo con la segunda realización. La Figura 13 muestra una sección de un actuador adicional 130 e ilustra cómo puede ubicarse el restrictor de tal manera que limite el movimiento del resorte y no el movimiento del elemento de NiTi 11. De acuerdo con la invención, el elemento (11) comprende al menos un haz de alambres o varillas individuales que se fabrican de o que consisten en aleación con memoria de forma de tal manera que en el haz los alambres individuales están conectados eléctricamente entre sí en paralelo y dispuestos mecánicamente en paralelo. Las Figuras 15 a 17 ilustran el ciclo desde la fase inicial del actuador 120, a través del movimiento en la primera dirección hasta la fase contraída y a través del movimiento en la segunda dirección de nuevo hasta la fase inicial. Debe entenderse que el ciclo de movimiento del actuador 110 es el mismo que el del actuador 120.

En la Figura 11, se observa que el actuador 110 comprende un elemento de NiTi 11 que está confinado en el alojamiento 14. Debe entenderse que el alojamiento 14 continúa más allá del primer terminal de crimpado 161, pero esa parte del alojamiento 14 se ha omitido para mejorar la claridad.

El actuador 110 tiene en el alojamiento 14, alrededor del elemento de NiTi 11, un tubo de pretensado 112 que está conectado al restrictor 111 que funciona como unidad de inhibición.

El actuador 110 comprende además un elemento móvil 13 que está configurado para funcionar como un transformador de compresión de precarga-tensión dispuesto para transformar la fuerza de precarga del resorte de precarga 12 en fuerza de tracción del elemento de NiTi 11. Como elemento móvil 13 se ha usado una barra que se extiende a través del resorte de precarga 12.

Se observa en la Figura 11 y 12 que, mientras que en el actuador 10 de acuerdo con la primera realización, el resorte de precarga 12 se configuró para transformar la fuerza de precarga del resorte de precarga 12 en fuerza de tracción del elemento de NiTi 11, en el actuador 110, 120 se realiza la transformación por el transformador de compresión de precarga-tensión (elemento móvil 13) que conecta el resorte de precarga 12 y el terminal de crimpado 162 del elemento de NiTi 11.

También se observa en la Figura 11 y 12 que, mientras que en el actuador 10 de acuerdo con la primera realización, el alojamiento 14 se configuró para restringir el alargamiento del elemento de NiTi 11 y de esta manera restringir la tensión causada por la fuerza de tracción, en el actuador 110, 120 la restricción se implementa mediante el restrictor 111 o mediante el restrictor 121 que es una pared intermedia.

La Figura 13 ilustra el actuador 130. Ahora, en lugar de usar la pared intermedia 1319 como restrictor, el extremo del alojamiento 14 actúa como restrictor 19. En otras palabras, el restrictor 19 está ubicado de tal manera que limita el movimiento del resorte 12 y no el movimiento del elemento de NiTi 11.

En la Figura 15, el actuador 120 se muestra en su estado inicial. Esto significa que el resorte de precarga 12 también se encuentra en su estado inicial.

La Figura 16 ilustra el actuador 120 después de la primera transición de fase del elemento de NiTi 11, es decir, después de que el elemento móvil 13 haya sido arrastrado en una primera dirección. Entre las Figuras 15 y 16 se ha producido la transición de fase del elemento de NiTi 11: el elemento de NiTi 11 se ha calentado, lo que ha provocado una transición de fase inducida térmicamente desde el estado martensítico al estado austenítico que ha hecho que el elemento de NiTi 11 se contraiga.

El elemento de NiTi 11 se ha contraído por la distancia  $\Delta k$  y el elemento móvil 13 se ha desplazado por la distancia  $\Delta m$ . Normalmente,  $\Delta k = \Delta m$  pero esto no es necesario. Si  $\Delta k \neq \Delta m$ , esto se refiere a las condiciones de carga del actuador 120 al que puede estar expuesto el elemento móvil 13.

En la Figura 17, el actuador 120 ha vuelto del estado ilustrado en la Figura 16 a su estado inicial. Esto significa que el elemento móvil 13 ha sido empujado en una segunda dirección que es opuesta a la primera dirección. El elemento de NiTi 11 ha experimentado una transición de fase desde el estado austenítico al estado martensítico causada por el cambio de temperatura y potenciada por el resorte de precarga 12 que hace que el elemento de NiTi 11 se alargue.

Se observa que el trabajo realizado por el actuador 120 a través del elemento móvil 13 en la segunda transición (es decir, entre la Figura 16 y 17) es realizado, en condiciones de carga, por el elemento móvil 13 que ejerce una fuerza que al comienzo es efectivamente la fuerza de precarga del resorte de precarga 12 menos la fuerza de tensión del elemento de NiTi 11. Durante la transición, la fuerza de precarga se reduce ligeramente (dependiendo de  $\Delta m$  en cada caso) y la fuerza de tensión también se reduce ligeramente (dependiendo de  $\Delta k$  en cada caso).

Seleccionando adecuadamente la fuerza de precarga y la fuerza de tensión, básicamente se puede obtener cualquier fuerza de salida deseada del actuador 10, 110, 120.

Sin embargo, se ha encontrado que los elementos de NiTi 11 se comportan individualmente. Además, el material del resorte de precarga 12 que se ha usado parece presentar grandes variaciones en su elasticidad y, por lo tanto, se ha observado que la constante de resorte de los resortes de precarga 12 varía mucho incluso entre unidades individuales de actuadores 10, 110, 120 que se han intentado fabricar en serie.

Por lo tanto, se ha inventado un método para compensar las tolerancias de fabricación o del material de los actuadores 10, 110, 120, y se han mejorado los presentes actuadores 10, 110, 120 de manera que las tolerancias de fabricación o del material puedan compensarse en una unidad ensamblada.

Se pueden utilizar los restrictores 121, 111 para emparejar o compensar las tolerancias de fabricación.

El restrictor 121, como se muestra en el actuador 120, se puede ensamblar en el alojamiento 14 después de que se hayan medido las características del resorte de precarga 12 y/o el elemento de NiTi 11. Más fácil, el restrictor 121 se implementa mediante un punto de soldadura que se suelda en el alojamiento a una distancia apropiada para producir una combinación adecuada de fuerza de precarga del resorte de precarga 12 y fuerza de tracción en el elemento de NiTi 11. Si la tensión de precarga es demasiado pequeña, el punto 121 se coloca desde un punto de referencia hacia el extremo del actuador 120 que aumenta la tensión de precarga, y en el caso opuesto, el punto se coloca desde el punto de referencia a la dirección opuesta.

El ensamblaje 110 es incluso más fácil de fabricar. El restrictor 111 que puede implementarse como unidad de inhibición, tal como una placa, se coloca en su lugar y se fija al tubo de pretensado 112. Se puede suministrar el tubo de pretensado 112 con una rosca. Si el restrictor 111 está roscado, se puede ajustar al girar la tensión de precarga (y simultáneamente la fuerza de tracción). La rosca asegura que el restrictor 111 se mantiene en su lugar mediante un mecanismo de bloqueo de forma.

Puede ser posible retrasar el esfuerzo de la fuerza de empuje por el actuador 10, 110, 120 disponiendo el elemento móvil 13 de tal manera que al comienzo de la segunda transición (es decir, situación de acuerdo con la Figura 16) el elemento móvil 13 se retrae en el alojamiento 14. Durante la transición, el elemento móvil 13 sobresale del alojamiento en una distancia  $\Delta l$ . La diferencia  $\Delta m - \Delta l$  se puede ajustar cambiando la longitud o el posicionamiento del elemento móvil 13 con respecto a las dimensiones del alojamiento 14.

Común a los actuadores 10, 110, 120, 130 de acuerdo con la primera y la segunda realización es que el elemento de NiTi 11 se ha fijado al alojamiento 14 también desde el extremo del alojamiento 14 que está opuesto al lado del elemento móvil 13, o restringido de tal manera desde el lado opuesto que cuando el elemento de NiTi 11 se contrae,

su lado opuesto al lado del elemento móvil 13 no puede moverse sustancialmente.

El propósito de la fijación o la restricción es asegurar que cuando el elemento de NiTi 11 se contrae, el elemento de NiTi 11 se mueva sustancialmente solo desde el lado del elemento móvil 13. La fijación se puede llevar a cabo soldando el elemento de NiTi 11 y/o el terminal de crimpado 161 al alojamiento 14, o como alternativa o además de la soldadura mediante encolado, mediante acuíamiento, por compresión o mediante cualquier otro medio adecuado. La restricción, que puede estar en su lugar además de o en lugar de la fijación, puede realizarse con el restrictor 183, por ejemplo.

10 En la primera y segunda realizaciones, se usa un haz de alambres individuales de NiTi o varillas, en donde, en el haz, los alambres individuales están conectados eléctricamente entre sí en paralelo y dispuestos mecánicamente en paralelo. Entonces, los terminales de crimpado 161, 162 se disponen más preferiblemente dentro de las unidades de conexión 1818, 1819, cuya estructura se analiza a continuación.

15 3) Tercera realización (Figura 18):

La Figura 18 ilustra ciertos componentes del actuador 180 que comprende dos actuadores individuales ensamblados uno al lado del otro en el alojamiento. Generalmente, la cantidad de actuadores individuales también puede ser mayor de dos.

20 El actuador 180 mostrado en la Figura 18 se ha implementado usando los actuadores 130 previamente analizados. Sin embargo, solo con modificaciones menores, los actuadores 130 pueden reemplazarse por cualquiera de los actuadores 10, 110, 120.

25 El actuador 180 se puede usar en particular como actuador de un dispositivo de tratamiento de la escoliosis. De acuerdo con la invención, el convertidor (11) comprende al menos un haz (1811) de alambres individuales o varillas que se fabrican de o que consiste en aleación con memoria de forma. Los elementos individuales en el haz 1811 están conectados eléctricamente entre sí en serie o en paralelo y están se disponen mecánicamente en paralelo como el haz 1811. Este es exactamente el mismo enfoque que el elegido en la variante de la primera y segunda realizaciones tratadas anteriormente donde se usa un haz que comprende una serie de elementos de NiTi 11.

30 Con el haz 1811, se pueden ejercer fuerzas de contracción mecánicas mucho mayores que con un elemento individual solo. Un "elemento individual" mencionado aquí puede, por supuesto, incluir una serie de alambres de NiTi que están en paralelo tanto mecánica como eléctricamente. Los haces 1811 están conectados más preferiblemente eléctricamente en serie, como alternativa, se pueden conectar eléctricamente en paralelo.

35 La conexión eléctrica entre los elementos en el haz 1811 se implementa mediante unidades de conexión 1818, 1819 ubicadas en el respectivo terminal de crimpado 162, 161. Los restrictores 121 están configurados para restringir la fuerza de tracción del haz 1811 al restringir el movimiento de la unidad de conexión 1818, 1819 en la dirección de trabajo del resorte de precarga 12. Los restrictores 121 pueden estar en pares, de manera que el elemento móvil 13 puede ir entre los limitadores individuales 182. Los restrictores 183 mantienen los haces 1811 en su lugar.

40 Los actuadores individuales 130 en el actuador 180 están eléctricamente conectados de forma cruzada entre sí a través del elemento de conexión cruzada 181 que es mucho más preferiblemente de material biocompatible. De esta manera, los haces 1811 se pueden conectar eléctricamente en serie, o si se desea, en paralelo.

45 Además, el actuador 180 comprende al menos dos terminales de conexión 186 conectados eléctricamente al haz 1811 para suministrar la energía eléctrica recibida por al menos una bobina inductiva en el actuador 180 al haz 1811. Entonces, cuando la bobina (no mostrada en la Figura 18) se alimenta, todos los elementos en ambos haces 50 1811 se calientan y la transición de fase tiene lugar como ya se ha explicado.

55 Preferiblemente, los restrictores 121 se implementan por parejas de tal manera que el elemento móvil 13 se confina entre los restrictores 182. Las copas 184, 185 se implementan preferiblemente como una parte que ventajosamente los une a través de la parte base 1899.

4) Cuarta realización (Figuras 19 - 25):

La Figura 19 ilustra el actuador 190 que comprende una serie de convertidores en torno a un eje. También aquí, los convertidores se han implementado mediante el uso de actuadores 130 previamente analizados. Sin embargo, solo

con modificaciones menores, los actuadores 130 pueden reemplazarse por cualquiera de los actuadores 10, 110, 120.

El actuador 190 es particularmente ventajoso como actuador de un actuador de distracción ósea, es decir, como un dispositivo interno de osteodistracción.

El actuador 190 puede comprender cualquier número de convertidores, más preferiblemente, hay entre 2 y 8 de tales convertidores.

10 Los haces 1811 se conectan de nuevo de forma cruzada de la manera explicada con referencia al actuador 180, excepto que ahora, la conexión entre los haces de los actuadores individuales superior e inferior se conectan de forma cruzada eléctricamente mediante placas conductoras 2013, 2014 y conectores en serie 2018, 2019 que son mucho más preferiblemente de material biocompatible.

15 El restrictor 111 tiene preferiblemente al menos una abertura en el medio, de tal forma que el elemento móvil 13 puede moverse hacia atrás y adelante a través de la abertura.

El cable de conexión de la bobina inductiva (como se explica con referencia a la Figura 18 ya) se alimenta mucho más preferiblemente a través del rebaje de cable 1992. El rebaje de cable 1992 se puede ubicar en la parte 199 del actuador 190 que se va a conectar a la carcasa externa de los implantes 197. La carcasa externa 197 se requiere en la implementación actual porque el restrictor 111 es parte de ella. Sin embargo, se puede reemplazar esta construcción por cualquier otra forma previamente implementada para mover el restrictor.

20 El actuador 190 puede estar conectado a la transmisión de fuerza a través de la conexión 198 a la transmisión de fuerza, en particular a través de una rosca, y puede conectarse desde su otro extremo a través de la rosca de conexión 1991.

Las Figuras 20, 23 y 24 ilustran el actuador de distracción ósea 190 y la Figura 21 la sección A-A de éste. La Figura 22 es una vista ampliada C del extremo del apilamiento de resortes 3 del actuador de distracción 190. La Figura 25 ilustra las secciones D-D y E-E en las ubicaciones ilustradas en la Figura 24.

30 Cuando el actuador de distracción ósea 190 está montado, el soporte de NiTi inferior 6 está unido al bloque terminal 5 de tal manera que están aislados galvánicamente entre sí. El bloque terminal 5 se une a la carcasa externa 197 que puede ser un tubo de tal manera que forman un cuerpo no separable. Una o más partes aislantes 8, 9, 10 están unidas al soporte de NiTi inferior 6. La función de las partes aislantes 8, 9, 10 es aislar los haces de NiTi 102, 103 del soporte de NiTi 6. Dos placas conductoras 2013, 2014 están en contacto con el soporte de NiTi inferior 6. La función de las placas conductoras 2013, 2014 es conectar los haces de NiTi 100, 101 al soporte 6 de tal forma que la corriente eléctrica pueda fluir entre los haces de NiTi 100, 101 y el soporte de NiTi 6.

40 Los haces de NiTi 102, 103 están unidos a los conectores de bobina 2011, 2012 que se utilizan para conectar los haces de NiTi 102, 103 al conjunto de bobina de recepción 2. El conjunto de bobina de recepción 2 comprende un alojamiento de bobina 21, alambre de bobina 23 y ferrita 22 o cualquier otro material adecuado para centrar el campo magnético externo. Sin embargo, no es necesario que el conjunto de bobina de recepción 2 contenga todas estas partes, y solo se necesita el alambre de bobina 23 en el caso más básico. El conjunto de bobina de recepción 45 2 puede reemplazarse con una batería y un conmutador controlable a distancia, por ejemplo.

El otro extremo de los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 está conectado al soporte de NiTi superior 7. Entre los extremos de los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 están los conectores en serie 2018, 2019 (por ejemplo, placas de conexión) que forman la conexión eléctrica entre los haces adyacentes. Debajo de los conectores en serie 2018, 50 2019 hay de nuevo aislamientos 2015, 2016 que aíslan galvánicamente el soporte de NiTi superior 7 de los haces de NiTi 100, 101, 102, 103. La parte aislante 17 también se usa para este propósito.

La conexión eléctrica se implementa de la siguiente manera: El alambre de bobina 23 se conecta desde un extremo al conector de bobina 2011. El conector de bobina 2011 se conecta al haz de NiTi 103. El haz de NiTi 103 se conecta al conector en serie 2019. El conector de serie 2019 se conecta al haz de NiTi 100. El haz NiTi 100 se conecta a la placa conductora 2013. La placa conductora 2013 se conecta al soporte de NiTi inferior 6. El soporte de NiTi inferior 6 se conecta a la placa conductora 2014. La placa conductora 2014 se conecta al haz de NiTi 101. El haz de NiTi 101 se conecta al conector en serie 2018. El conector en serie 2018 se conecta al haz de NiTi 102. El haz de NiTi 102 se conecta al conector de bobina 2012. El conector de bobina 2012 se conecta al otro extremo del

alambre de bobina 23 y la trayectoria de conexión para la conexión en serie completa de los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 está completa.

5 El soporte de NiTi superior 7 está conectado a una guía de resorte 4 a través de medios adecuados, por ejemplo, rosca o soldadura para lograr una construcción rígida, o más preferiblemente, una construcción de bloqueo de forma. El extremo de la guía de resorte 4 no conectada al soporte de NiTi inferior 7 comprime el apilamiento de resortes 3 contra la carcasa externa 197. El apilamiento de resortes 3 puede consistir en resortes de disco o puede ser un resorte de compresión o cualquier otra construcción, ensamblaje o material que proporcione funciones similares a un resorte.

10

Al ensamblar el actuador de distracción ósea 190, cuando los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 no están en tensión, existe un pequeño espacio entre el restrictor 111 (que preferiblemente se implementa como pared central de la carcasa externa 197, especialmente si la carcasa externa 197 se implementa como un tubo o estructura de tipo tubo) y el soporte de NiTi superior 7. Cuando se tensan los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 colocando el apilamiento de resortes 3 en el actuador de distracción ósea 190 y tensando el apilamiento de resortes 3, los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 entran en tensión de acuerdo con la ley de Hooke. La longitud del espacio en el estado no tensado determina, por lo tanto, la cantidad de esfuerzo (tensión) a la que estará cada haz de NiTi 100, 101, 102, 103 cuando se ensamble el actuador de distracción ósea 190.

20 Debe observarse que no importa a qué carga se tense el apilamiento de resortes 3, los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 solo se tensarán a la cantidad definida por el espacio. Por lo tanto, es posible diseñar el actuador de distracción ósea 190 de manera que los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 estén siempre bajo tensión óptima (o al menos cerca de ésta) antes de la actuación y una vez que comiencen a actuar (se separa el soporte de NiTi inferior 7 del restrictor 111), comenzará a generar alguna otra fuerza predeterminada, preferiblemente más alta.

25

El ciclo de actuación del actuador de distracción ósea 190 se desarrolla de la siguiente manera: un campo magnético externo induce una tensión en el alambre de bobina 23, o, como alternativa, si no se utiliza ningún conjunto de bobina de recepción 2, la batería se enciende.

30 Esta tensión se aplica sobre los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 como se ha descrito anteriormente en la trayectoria de conexión eléctrica. Esta tensión genera una corriente de acuerdo con la ley de Ohm que transcurrirá a través de los haces de NiTi 100, 101, 102, 103. La potencia disipada en los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 calienta entonces los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 de forma resistiva. El calentamiento provoca una transición de fase desde la fase martensítica a la fase austenítica en los haces de NiTi 100, 101, 102, 103. La transición de fase hace que los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 se contraigan (su longitud se acorta). Cuando esto sucede, los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 tiran del soporte de NiTi superior 7 hacia el soporte de NiTi inferior 6 y el soporte superior 7 se separa del restrictor 111. Esto a su vez tirará de la guía de resorte 4 hacia el soporte de NiTi inferior 6. Esto hará que el apilamiento de resortes 3 se comprima (su longitud se acorta) porque el espacio entre la carcasa externa 197 y la guía de resorte 4 se acorta.

40

Ahora, cuando el campo magnético externo se apaga (o, como alternativa, la batería se apaga), no hay corriente fluyendo en los haces de NiTi 100, 101, 102, 103. Esto permite que los haces de NiTi 100, 101, 102, 103 se enfríen y se transformen desde la fase austenítica de nuevo a la fase martensítica, asistido por el apilamiento de resortes 3. Al mismo tiempo, la guía de resorte 4 vuelve a su posición original y la compresión del apilamiento de resortes regresa al nivel original. Al mismo tiempo, el actuador de distracción ósea 190 proporciona una fuerza de salida si se mide desde el extremo izquierdo de la guía de resorte 4 en la Figura 20, es decir, en la conexión 198 con respecto a la transmisión de fuerza. La guía de resorte 4 se puede conectar desde la conexión 198 a la transmisión de fuerza con respecto a métodos de transmisión de potencia adecuados con el fin de generar movimiento a partir de los pulsos de contracción de repetición del mecanismo de transferencia de potencia. En particular, éste puede ser cualquiera de dichos mecanismos de transferencia de potencia divulgados en los documentos 2009/115645 A1 y WO 2011/148047 A1. Especialmente aquí se hace referencia a los mecanismos descritos en cualquiera de los documentos de referencia para convertir un movimiento recíproco en un movimiento de extensión en una dirección.

Las muchas características y ventajas de la presente invención son evidentes a partir de la descripción escrita. Además, dado que numerosas modificaciones y cambios serán evidentes para los expertos en la técnica, la invención no debería limitarse a la construcción y operación exactas como se ilustra y se describe. Por lo tanto, puede recurrirse a todas las modificaciones y equivalentes que sean adecuados que estén dentro del alcance de la invención.

55

5) Una construcción alternativa del actuador (Figuras 26-28):

Las Figuras 26 y 27 muestran una construcción alternativa del actuador. El actuador contiene cuatro haces de alambres de NiTi (3001) que están conectados eléctricamente en serie con un alambre de transferencia de potencia de recepción (3017), que puede ser una bobina receptora a través de cable. El circuito eléctrico del actuador se completa con varios elementos, que se describen a continuación.

El alambre de transferencia de potencia inductiva (3017) se conecta a la bobina de transferencia de potencia inductiva (no mostrada).

El otro extremo del cable (3017) se conecta al elemento de NiTi (3111). El contacto se puede hacer por crimpado. El contacto también puede hacerse mediante soldadura indirecta. Además, el contacto puede realizarse mediante soldadura directa. El elemento de NiTi (3111) descansa sobre una placa de elevación (3015) cuya función es hacer que los elementos de NiTi (3111-3114) reposen en alturas iguales de forma que distribuyan la carga en el pequeño terminal de crimpado sobre el aislamiento subyacente de manera más pareja.

El elemento de NiTi (3111) se conecta al elemento de NiTi (3112) a través de la placa de conexión en serie (3014).

El elemento de NiTi (3112) se conecta además al elemento de NiTi (3113) a través de la placa de conexión en serie (3016).

El elemento de NiTi (3113) se conecta además al elemento de NiTi (3114) a través de la placa de conexión en serie (3141).

El elemento de NiTi (3114) se conecta además al otro polo de la bobina de transferencia de potencia inductiva a través de alambres idénticos a los del cable de transferencia de potencia (3017).

Las partes (3010), (3011), (3012) y (3013) actúan como aislantes que aíslan las partes metálicas de la fuente de alimentación del circuito eléctrico. También sirven para prevenir los cortocircuitos. El aislamiento puede estar hecho de cualquier material eléctricamente aislante. El aislamiento puede ser, por ejemplo, de un material polimérico o cerámico. El aislamiento (3013) actúa además como una barrera de calor que ralentiza la transmisión de calor desde el interior de la fuente de alimentación al tubo de alojamiento de la fuente de alimentación (3004).

Los elementos de NiTi (3111-3114) se colocan entre el elemento móvil (3002) y una estructura de soporte fija (3003). La fijación de la estructura de soporte (3003) se logra a través del tubo de alojamiento de los actuadores (3004), la placa de soporte de resorte (3005) y el tubo de soporte de actuador (3006). El extremo libre (lado izquierdo en la Figura 26) del tubo de soporte (3006) se fija en su lugar. Una varilla de compresión de resorte (3007) que también se puede denominar más generalmente como varilla, se conecta al elemento móvil (3002). Estos también se pueden fabricar como una sola pieza. Se coloca un apilamiento de resortes de compresión (3009) en torno a la barra de compresión de resorte (3007) de manera que descansen contra la placa de soporte de resorte (3005). La barra de compresión de resorte (3007) se estira al pretensado óptimo para los elementos de NiTi y se añade una parte de fijación (3008). La parte de fijación añadida (3008) mantiene preferiblemente entonces la pretensión óptima. Esto puede ajustarse por cualquier medio, por ejemplo, por rosca o soldadura, etc.

Como alternativa, en lugar de fijar el tubo de soporte (3006) en su lugar, se puede excluir el tubo de soporte 3006. En ese caso, el actuador se debe fijar con la estructura de soporte (3003), el tubo de alojamiento (3004) o la placa de soporte de resorte (3005).

A medida que el apilamiento de resortes de compresión (3009) intenta alargarse y se bloquea por la parte de fijación (3008), la fuerza se transfiere a través de la varilla de compresión de resorte (3007) al elemento móvil (3002). El elemento móvil (3002) intenta además moverse hacia la izquierda en la Figura 26 haciendo que la fuerza se transfiera a los elementos de NiTi (3111-3114). El otro extremo de los elementos de NiTi (3111-3114) descansa sobre la estructura de soporte (3003) que toma la carga y la transfiere a través de los tubos (3004, 3006) y la placa de soporte de resorte (3005) al punto de fijación del extremo izquierdo de la parte (3006) en la Figura 26.

Como alternativa, en lugar de un apilamiento de resortes de compresión (3009) se puede usar un resorte de compresión normal. Como alternativa, en lugar de un apilamiento de resortes de compresión (3009) o un resorte de compresión, se puede usar un resorte de tensión. Cuando se usa un resorte de tensión, el resorte de tensión se conecta al extremo de la varilla (3007). Al tirar del resorte de tensión desde el otro extremo, el resorte hace que la

varilla (3009) se mueva y ejerza tensión sobre los elementos de NiTi (3111-3114). Cuando el resorte de tensión se estira para obtener un pretensado óptimo, se puede fijar a la parte (3006) utilizando cualquier tipo de medio de fijación.

- 5 El ciclo operativo del actuador se explica por la Figura 28. En estado de reposo, la medida L<sub>1</sub> puede ser, por ejemplo, 19,70-19,90 cm, preferiblemente 19,80 cm, la medida L<sub>2</sub> puede ser, por ejemplo, 19,90-20,10 cm, preferiblemente 20,00 cm, y la medida L<sub>3</sub> puede ser, por ejemplo, 22,90-23,10 cm, preferiblemente 23,00 cm.

10 Cuando se activa el campo magnético externo, se induce una tensión en la bobina de transferencia de potencia inductiva. La bobina de transferencia de potencia conduce además a una corriente que pasa a través de los cables de transferencia de potencia inductiva (3017) y el circuito eléctrico en serie del actuador que contiene elementos de NiTi (3111-3114). Los elementos de NiTi se calientan aún más a través del calentamiento resistivo. Esto hace que los elementos de NiTi pasen por un cambio de fase desde la fase martensítica a la fase austenítica. Esto hace que los elementos de NiTi se contraigan. La contracción mueve el elemento móvil (3002) hacia la derecha por la cantidad  
15 de contracción. La contracción puede restarse por cualquier deformación elástica en las estructuras. La contracción también hace que la varilla de compresión de resorte (3007) se mueva hacia la derecha en la misma cantidad. Esto a su vez hace que el apilamiento de resortes de compresión (9) se comprima aún más.

20 Ahora, el actuador ha cumplido su etapa de actuación. Ahora, la medida L<sub>1</sub> puede ser, por ejemplo, 18,70-18,90 cm, preferiblemente 18,80 cm, la medida L<sub>2</sub> puede ser, por ejemplo, 18,90-19,10 cm, preferiblemente 19,00 cm, y la medida L<sub>3</sub> puede ser, por ejemplo, 23,90-24,10 cm, preferiblemente 24,00 cm.

25 A medida que el lado izquierdo del tubo de soporte (3006) se fija, el actuador puede producir un desplazamiento y una fuerza de salida a través del extremo derecho del elemento móvil (3002). Posteriormente, el campo magnético se apaga y los elementos de NiTi (3111-3114) se enfrían. Como consecuencia, el apilamiento de resortes de compresión (3009) arrastra a los elementos de NiTi a la posición original. Además, el elemento móvil (3002) retrocede a la posición original. El actuador está listo para un nuevo ciclo de actuación.

30 Conectando el actuador a un elemento que permita un movimiento unidireccional se puede realizar un dispositivo de osteogénesis de distracción extensible con la ayuda de los campos magnéticos.

**Lista de números de referencia usados:**

2	conjunto de bobina de recepción
3	apilamiento de resortes
4	guía de resorte (actúa como el elemento móvil 13)
5	bloque final
6	soporte de NiTi
7	soporte de NiTi
8, 9, 10	parte aislante
10	actuador
11	elemento de NiTi
12	resorte de precarga
13	elemento móvil
14	alojamiento
16	volumen vacío
17	parte aislante
18	transformador de fuerza de precarga-tensión
19	restringidor (pared final)
21	alojamiento de bobina
22	ferrita
23	alambre de bobina
30	sistema de pruebas
31	varilla de compresión
32	conexión a celda de carga
33	conexión eléctrica
34	abrazadera de bloqueo de resorte
35	conexión al actuador hidráulico
37	extensómetro para medición de deformación

100, 101, 102, 103	haces de NiTi
110	actuador
111	restringidor (unidad de inhibición)
112	tubo de pretensado
120	actuador
121	restringidor (pared intermedia)
130	actuador
161	terminal de crimpado
162	terminal de crimpado
180	actuador de tratamiento de la escoliosis
181	elemento de conexión cruzada
183	restringidor
184, 185	copa en la que se fija el terminal de crimpado durante el ensamblaje
186	terminal de conexión
190	actuador de distracción ósea
195	conector
197	carcasa externa del implante, parte opcional del actuador 190
198	conexión a la transmisión de fuerza
199	parte del actuador que se va a conectar a la carcasa externa del implante
300	muestra de prueba
301	terminal de crimpado
302	alambre de NiTi
1113	abertura para elemento móvil
1811	haz
1818	unidad de conexión
1819	unidad de conexión
1840	pieza de conexión mecánica
1899	parte base
1991	rosca de conexión
1992	rebaje de cable
2011, 2012	conectores de bobina
2013, 2014	placa conductora
2015, 2016	aislamiento
2018	conectores en serie
2019	conectores en serie
3000	actuador
3001	alambre de NiTi
3002	elemento móvil
3003	estructura de soporte
3004	tubo de alojamiento
3005	placa de soporte de resorte
3006	tubo de soporte de actuador
3007	varilla
3008	parte de fijación
3009	apilamiento de resortes de compresión
3010, 3011, 3012, 3013	partes aislantes
3014, 3016	placas de conexión en serie
3015	placa de elevación
3017	cable de transferencia de potencia
3111, 3112, 3113, 3114	elementos de NiTi
3141	placa de conexión en serie
L <sub>1</sub>	longitud del apilamiento de resortes
L <sub>2</sub>	parámetro de dislocación de la varilla de compresión
L <sub>3</sub>	parámetro de dislocación del elemento móvil

**Bibliografía citada:**

- 5 Aalsma A M M, Hekman E E G, Stapert, J W J L, Grootenboer H J 1997 The Design of A TiNi actuator in an intramedullary leg lengthening device J. PHYS. IV FRANCE 7 C5 627 - 631

- Aalsma A M M, Hekman E E G, Staper J, Grootenboer H 1998 A completely intramedullary leg lengthening device Proc. of the 20th Ann. Int. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society 20-5 2710-2713
- 5 Belson A 2013, patent publication US 8361090 B2, Apparatus and method for endoscopic colectomy
- Bertacchini O W, Lagouds D C, Patoor E 2009 Thermomechanical transformation fatigue of TiNiCu SMA actuators under a corrosive environment - Part I: Experimental results Int J Fatigue 1571-1578
- Chau E T F, Friend C M, Allen D M, Hora J, Webster J R 2006 A technical and economic appraisal of shape memory alloys for aerospace applications Mater. Sci. Eng., A 438-440 589-592
- 10 Dynalloy Inc. 2012 Technical characteristics of Flexinol® actuator wires manufacturers datasheet, retrieved online 2012-10-12 from <http://www.dynalloy.com/pdfs/TCF1140.pdf>
- Dahlgren J M 2009, patent application publication US 2009076597 A1, System for mechanical adjustment of medical implants
- Elwaleed A K, Mohamed N A, Nor M J, Mustafa M M 2007 A new concept of a linear smart actuator Sens. Actuators, A 135 244-249
- 15 Fumagalli L, Butera F, Coda A 2009 SmartFlex NiTi wires for shape memory actuators J. Mater. Eng. Perform. 18 691-695
- Helsinki University of Technology 2009, patent application publication WO 2009115645 A1, Internal osteodistractor device Horst M, Hayoz D, Borghi E, Tozzi P 2013, patent application publication US 20130096586 A1, Medical device comprising an artificial contractile structure
- 20 Kheirikhah M M, Rabiee S, Edalata M E 2011 A Review of shape memory alloy actuators in robotics Lecture Notes in Computer Science 6556 206-217
- Kim H, Yoo Y, Lee J 2008 Development of a NiTi actuator using a two-way shape memory effect induced by compressive loading cycles Sens. Actuators, A 148 437-442
- 25 Lagoudas D C, Miller D A, Rong L, Kumar P K 2009 Thermomechanical fatigue of shape memory alloys Smart Mater. Struct. 18
- Mammano G S, Dragoni E 2012 Functional fatigue of Ni-Ti shape memory wires under various loading conditions Int J Fatigue <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.03.004>
- Mertmann M, Vergani G 2008 Design and application of shape memory actuators Eur. Phys. J. Special Topics 158 221-230
- 30 Olympus Corp. 2012, patent application publication EP 2133566 A2, Shape memory alloy actuator
- Takahashi M 2009 patent application publication US 2009013684 A1, Shape memory alloy actuator
- Ryhänen J 1999 Biocompatibility evaluation of nickel-titanium shape memory alloy Dissertation for University of Oulu ISBN 951-42-5221-7
- 35 Soubeiran A A 2003, patent application publication US 2003032958 A1, Device for relative displacement of two bodies
- Stolz-Irion R 2009, patent application publication DE 102007036359 A1, Implantatvorrichtung zur Gewebe- und/oder Knochendistraktion sowie Verfahren zum Betreiben einer solchen

REIVINDICACIONES

1. Actuador (10; 110; 120; 130; 180; 190; 3000):
- 5 - que comprende al menos un convertidor basado en aleación con memoria de forma (11; 1811; 100, 101, 102, 103) en un alojamiento (14; 197; 3004) y al menos un resorte de precarga (12; 3; 3009);  
 - configurado para provocar un movimiento de al menos un elemento móvil (13; 198; 3002)
- 10 - en una primera dirección, sobre el al menos un convertidor (11; 1811; 100, 101, 102, 103) sometido a una transición de fase inducida térmicamente que lo hace contraerse, y  
 - en una segunda dirección que es opuesta a la primera dirección, sobre el al menos un convertidor (11; 1811; 100, 101, 102, 103) que experimenta una transición de fase provocada por el cambio de temperatura y potenciada por el resorte de precarga (12; 3; 3009) que hace que el convertidor (11; 1811; 100, 101, 102, 103) se alargue; y
- 15 - que comprende una varilla (3007) que se conecta a dicho elemento móvil (3002) y a un resorte (3009), en el que el actuador está configurado para permitir que se tire de la varilla (3007) hasta un pretensado óptimo para el convertidor y una pieza de fijación (3008) a añadir para mantener el pretensado óptimo;
- 20 **caracterizado por que** el resorte es uno de un apilamiento de resortes de compresión (3009) situado en torno a la varilla (3007) y un resorte de tensión que se conecta al extremo de la varilla; y  
**por que** el al menos un convertidor (11; 1811; 100, 101, 102, 103) comprende al menos un haz (1811; 100, 101, 102, 103) de cables individuales o varillas fabricados o que consisten en aleación con memoria de forma de tal manera que en el haz (1811; 100, 101, 102, 103) los cables individuales están conectados eléctricamente entre sí en
- 25 paralelo y dispuestos mecánicamente en paralelo; y opcionalmente, si hay más de un haz (1811; 100, 101, 102, 103), los haces (1811; 100, 101, 102, 103) están conectados entre sí eléctricamente en serie o en paralelo y preferiblemente mecánicamente en paralelo.
2. Actuador (180; 190) de acuerdo con la reivindicación 1, que comprende además al menos dos
- 30 conectores (186; 195) conectados eléctricamente a dicho haz (1811; 100, 101, 102, 103) para suministrar la energía eléctrica recibida de una fuente de alimentación, tal como desde una batería conmutable de forma inalámbrica o a través de al menos una bobina inductiva (23), en dicho actuador (180; 190) al haz (1811; 100, 101, 102, 103).
3. Actuador (180; 190) de acuerdo con la reivindicación 2, en el que: la conexión eléctrica y mecánica
- 35 entre los cables individuales del haz (1811; 100, 101, 102, 103) se implementa en al menos una unidad de conexión (1818, 1819).
4. Actuador (180; 190; 3000) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el movimiento de al menos un
- 40 elemento móvil se logra con la ayuda de una estructura de soporte fija (3003), un tubo de alojamiento (3004), una placa de soporte de resorte (3005) y opcionalmente con un tubo de soporte (3006).
5. Actuador (180; 190; 3000) de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los convertidores están
- 45 basados en elementos de NiTi (3111; 3112; 3113; 3114) conectados a través de las placas de conexión en serie (3014; 3016; 3141).
6. Método para preparar un actuador de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores,
- caracterizado por que** el método comprende las etapas del método para proporcionar al actuador que tira de la
- 50 varilla (3007) hasta un pretensado óptimo para el convertidor, y añadir la parte de fijación (3008) para mantener el pretensado óptimo.

FIG 1

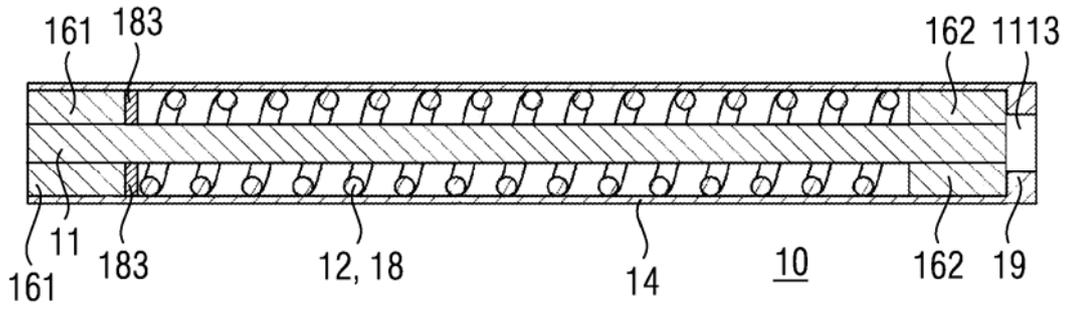


FIG 2

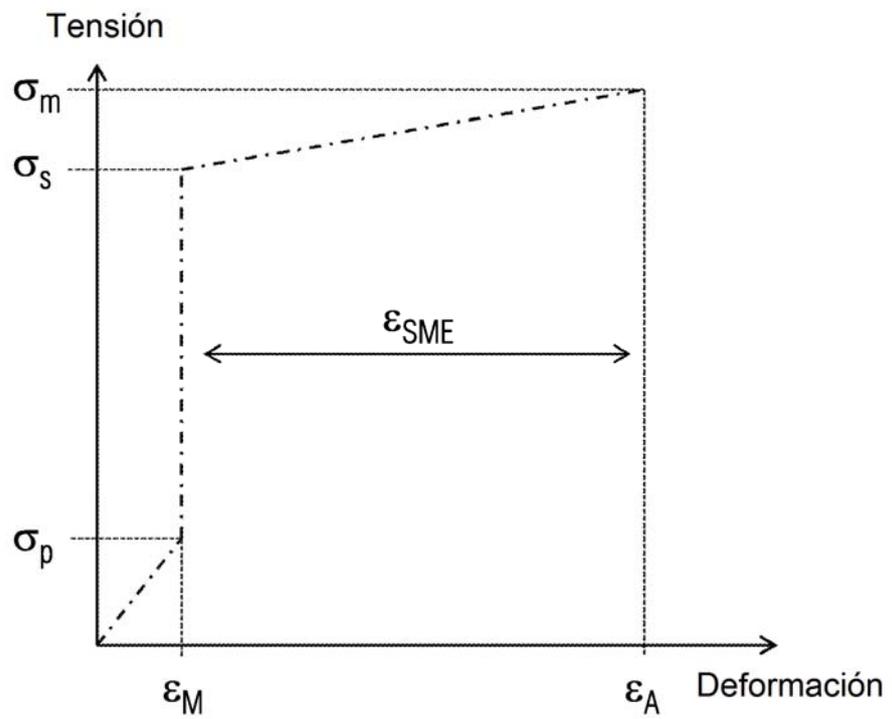


FIG 3

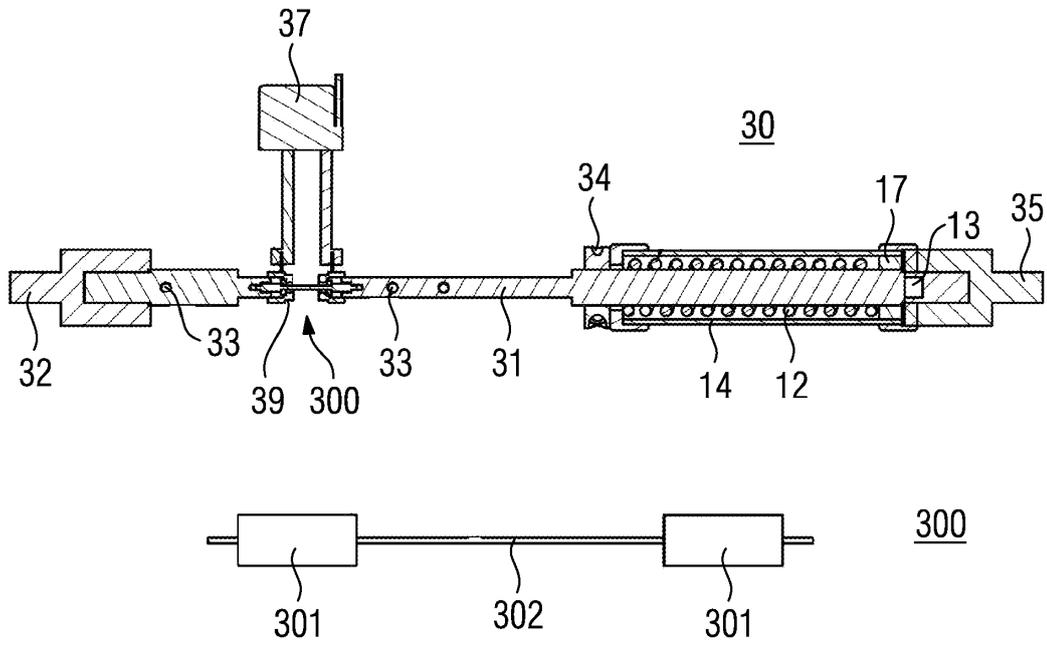


FIG 4

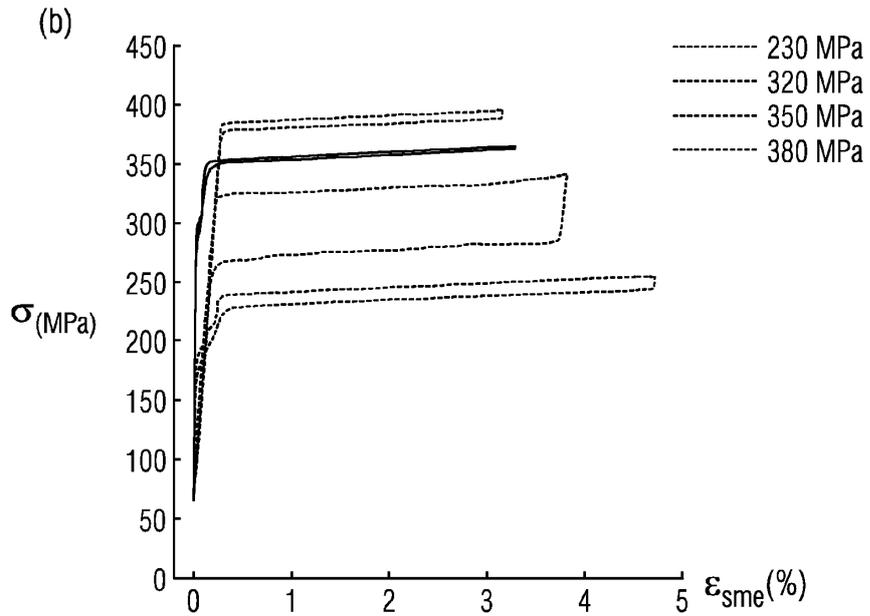
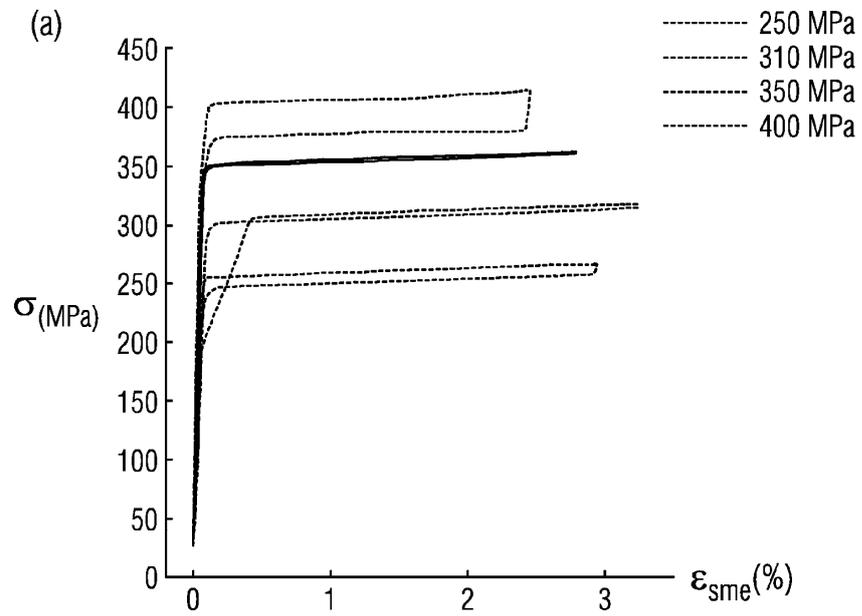


FIG 5

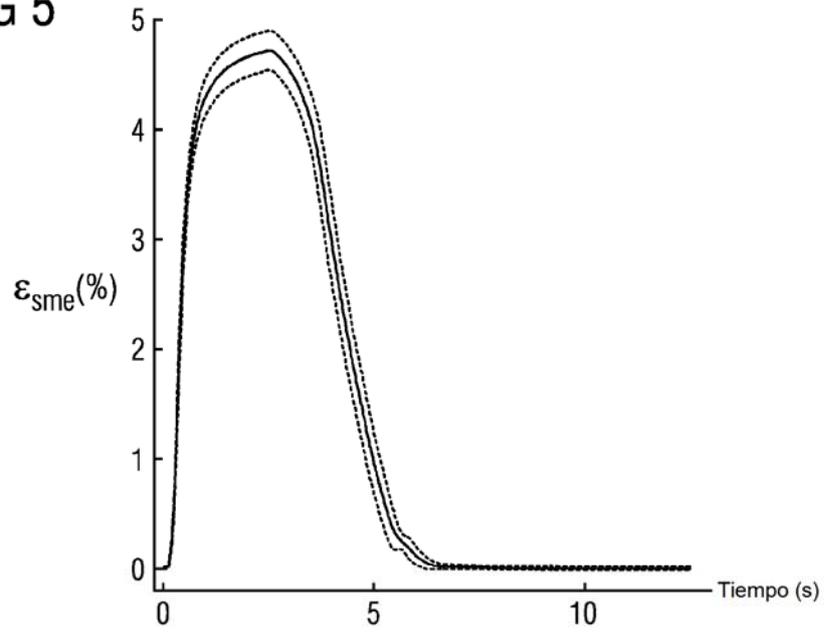


FIG 6

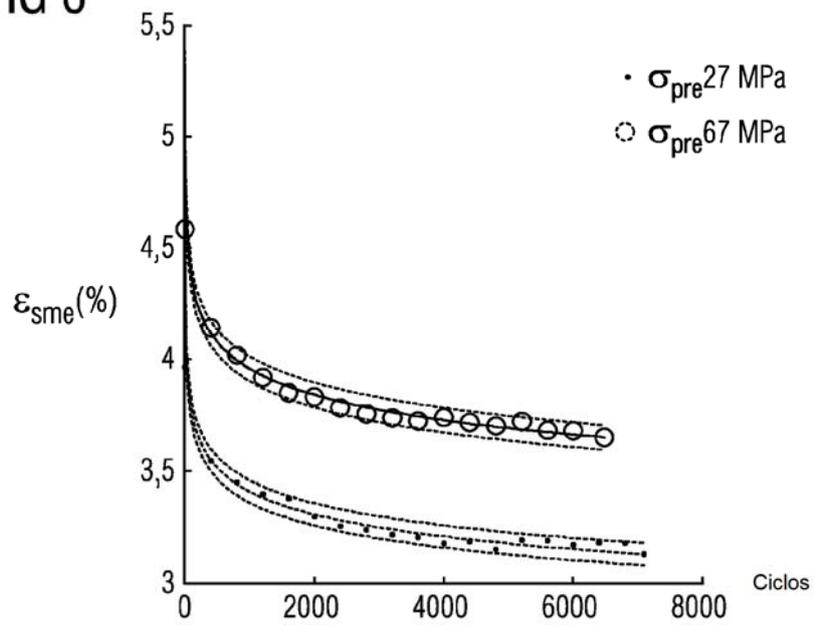


FIG 7

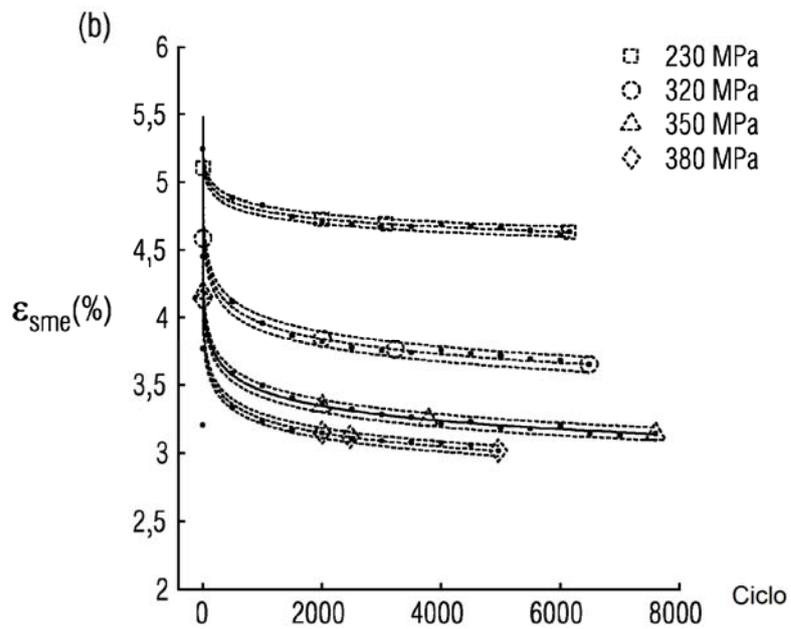
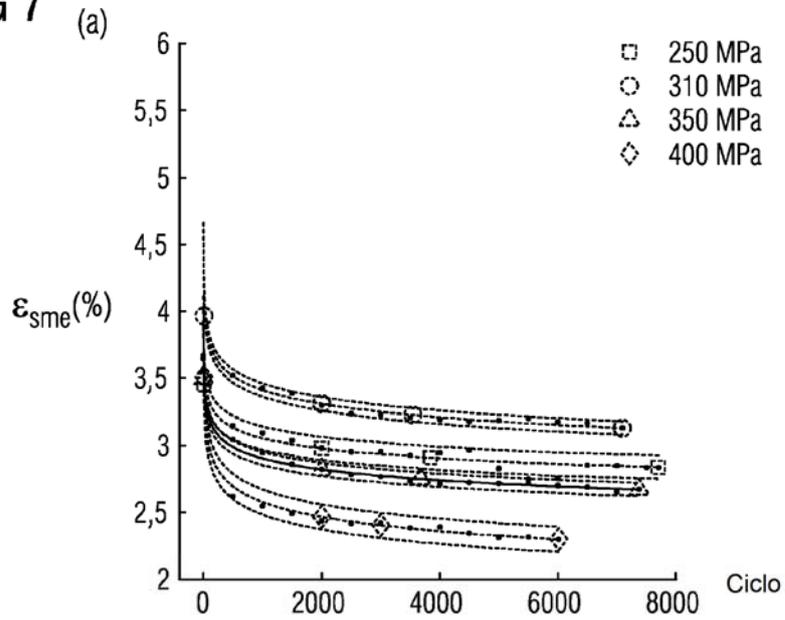


FIG 8

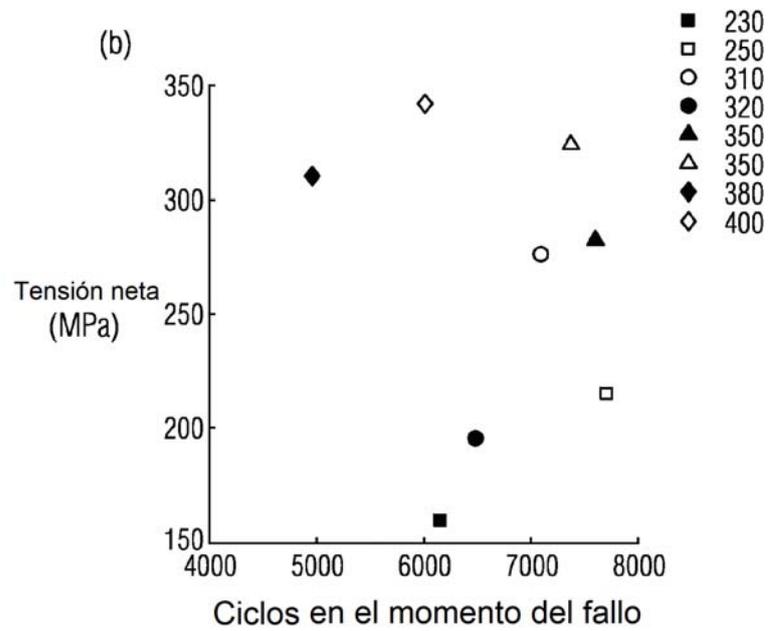
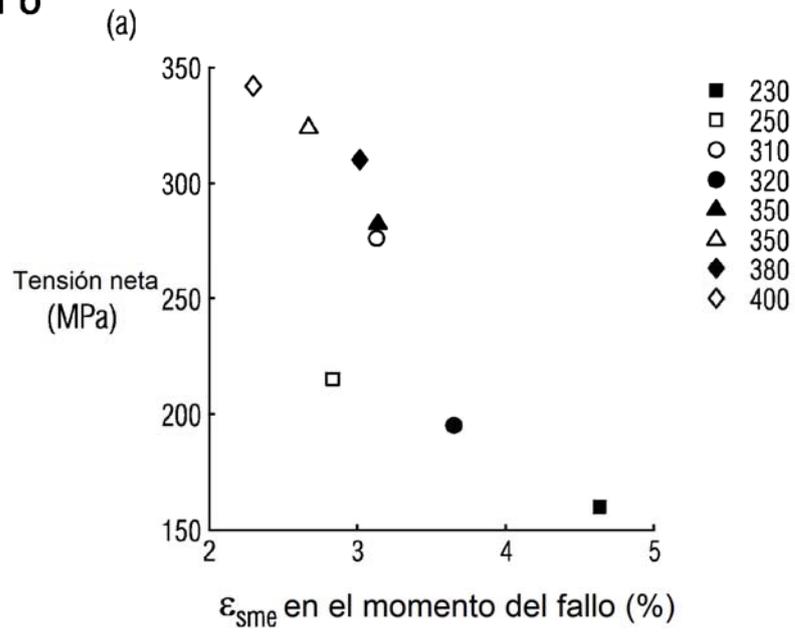


FIG 9

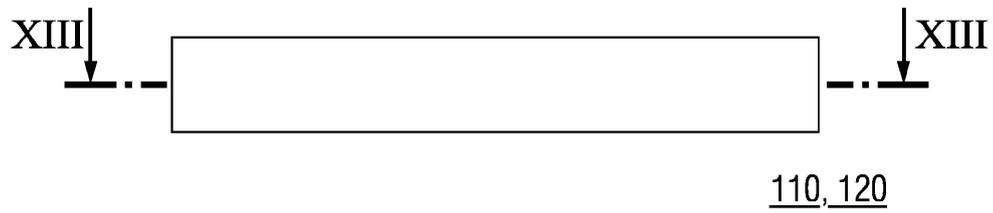


FIG 10

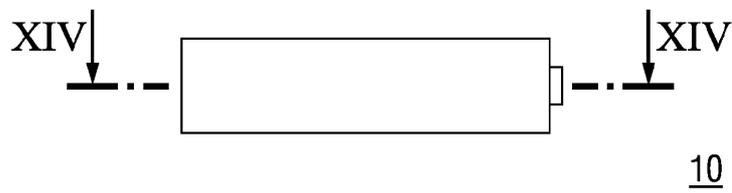


FIG 11

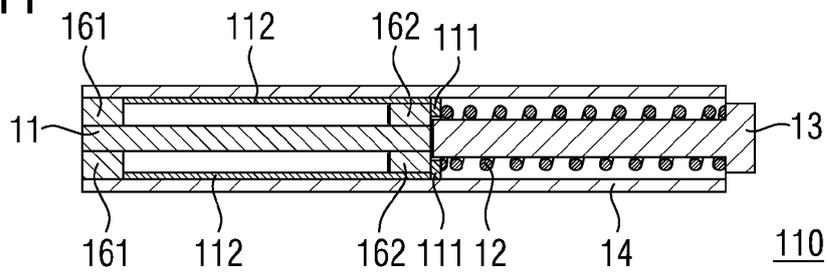


FIG 12

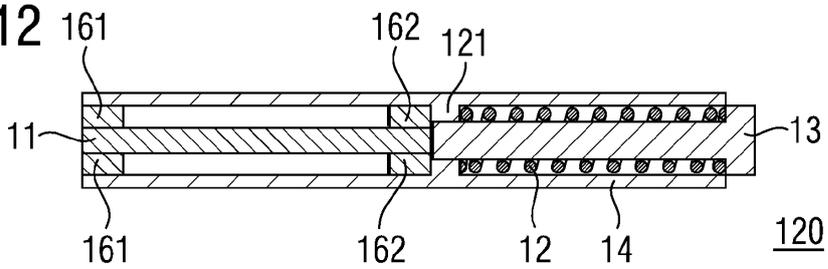


FIG 13

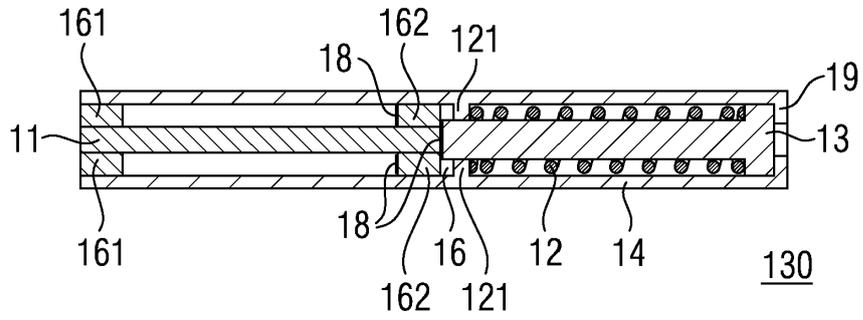


FIG 14

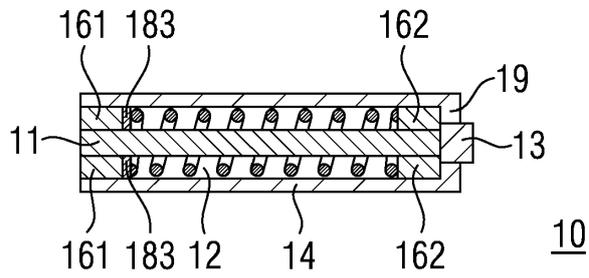


FIG 15

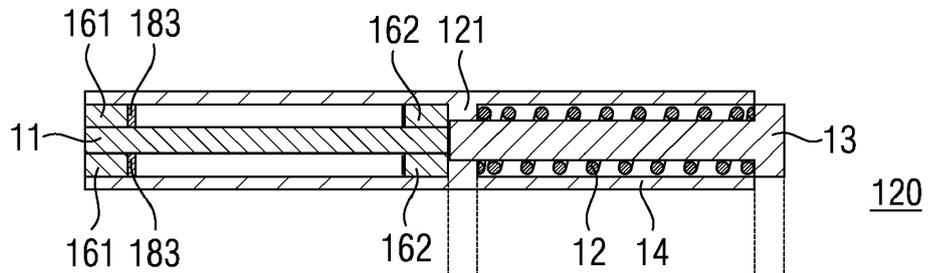


FIG 16

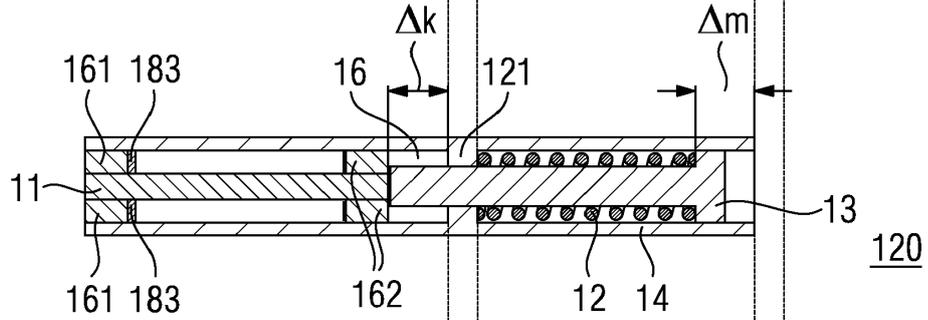
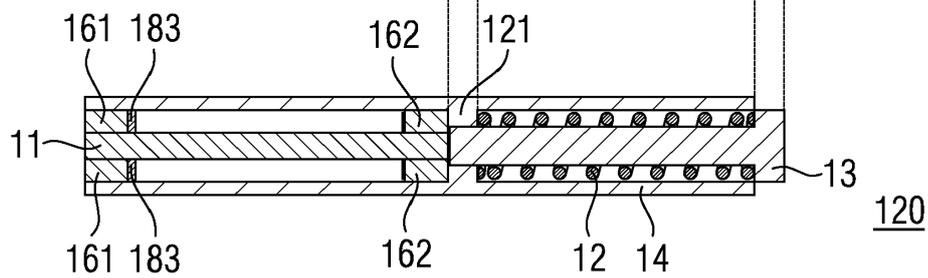


FIG 17





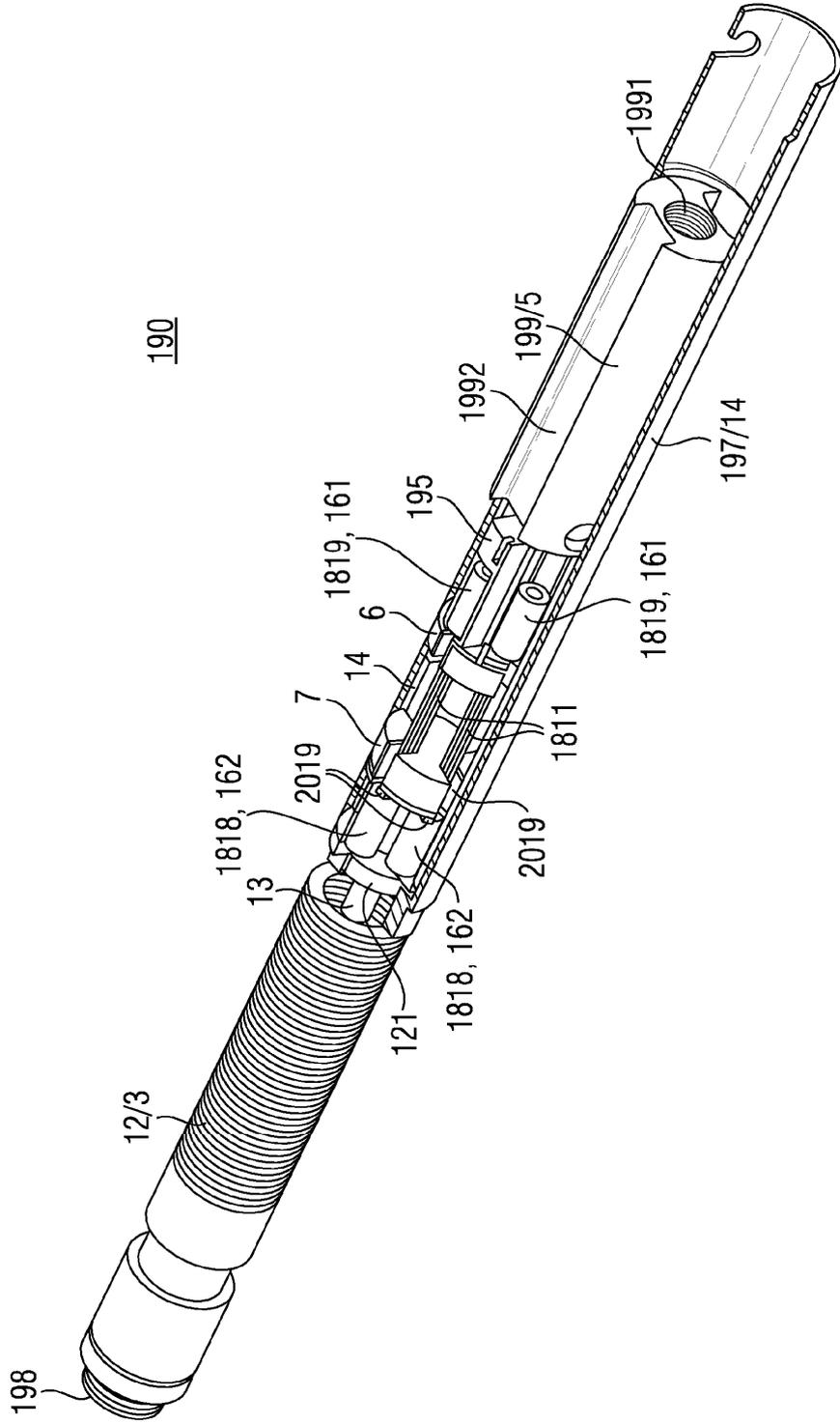
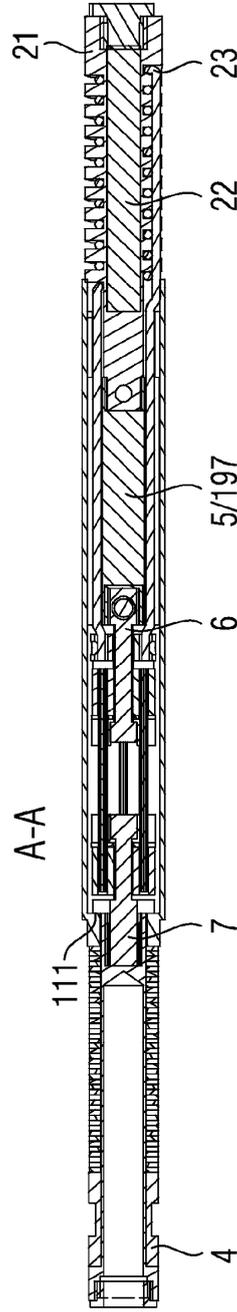
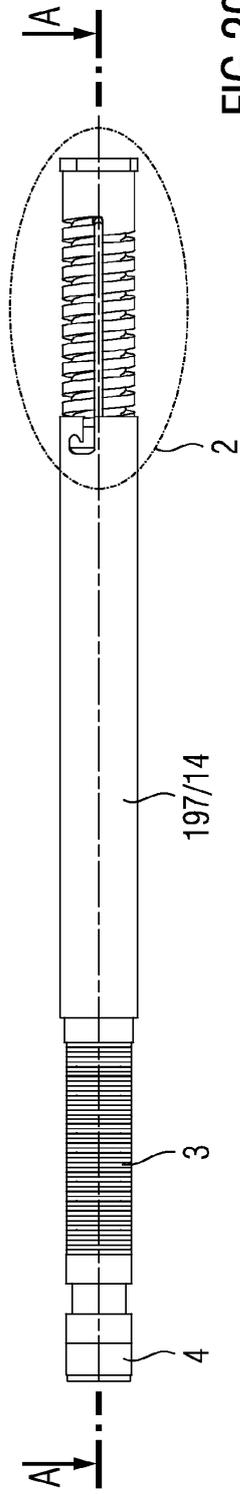


FIG 19



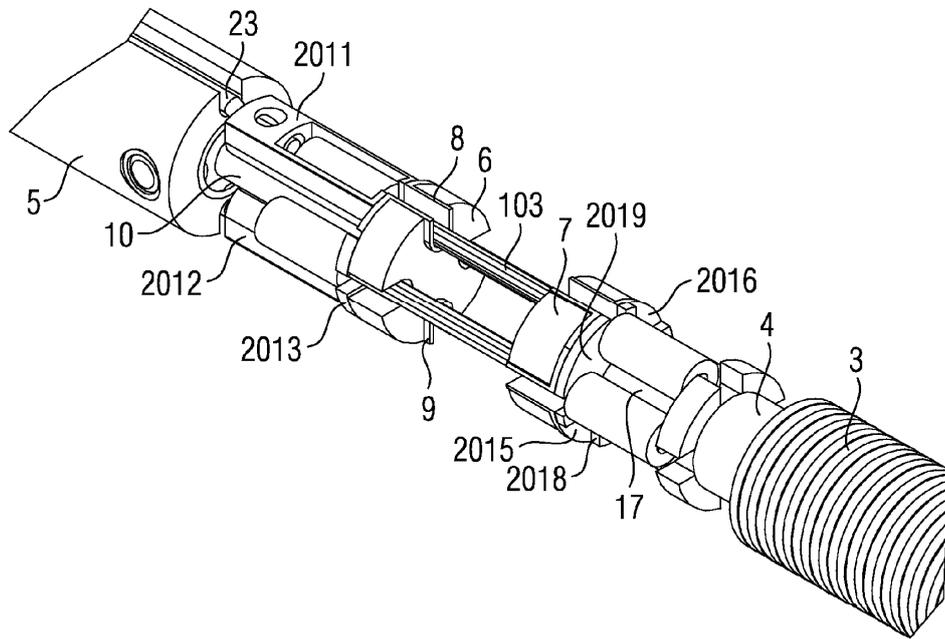


FIG 22

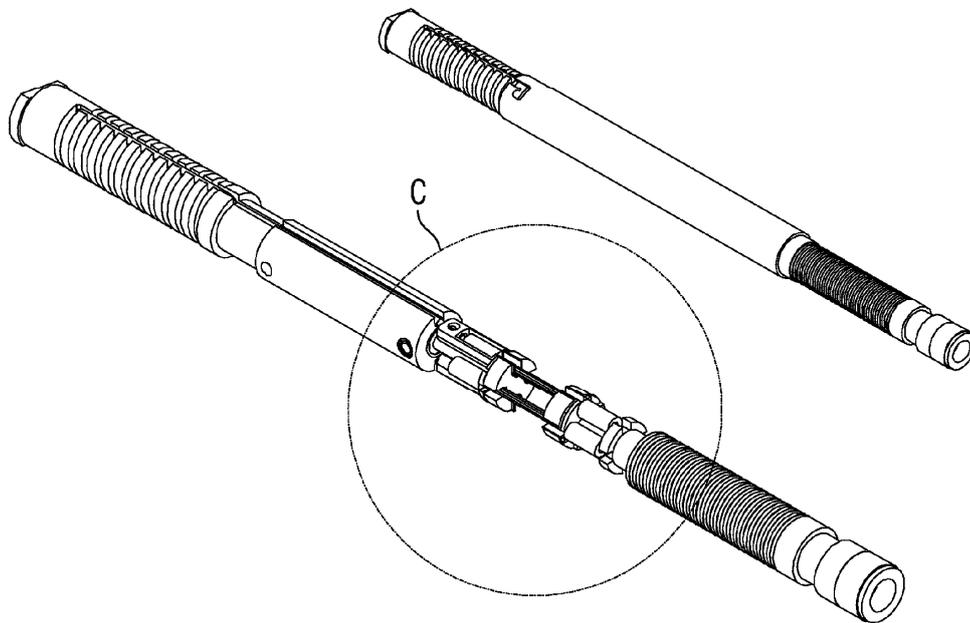
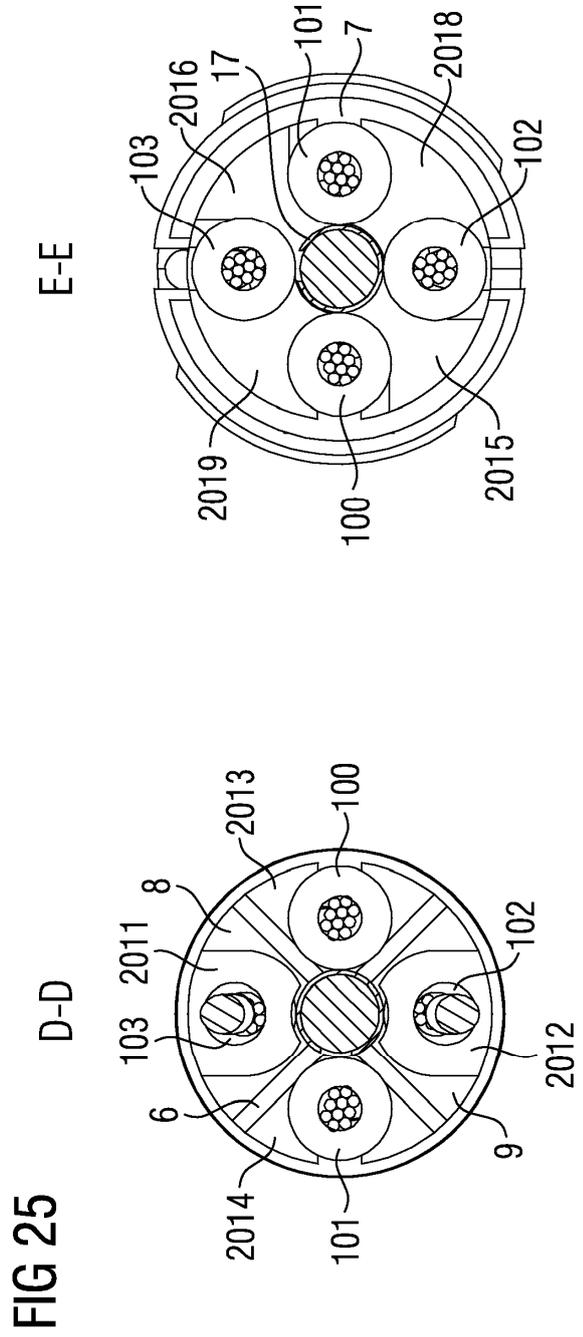
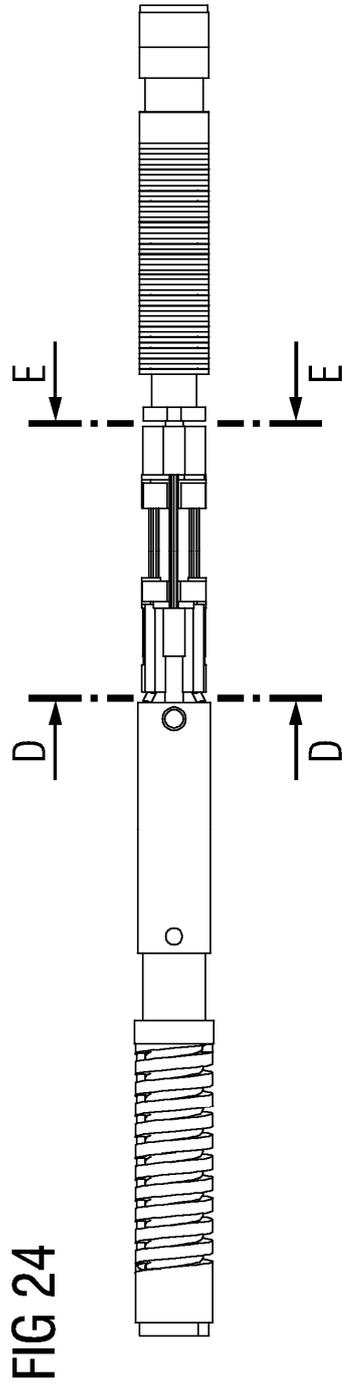


FIG 23



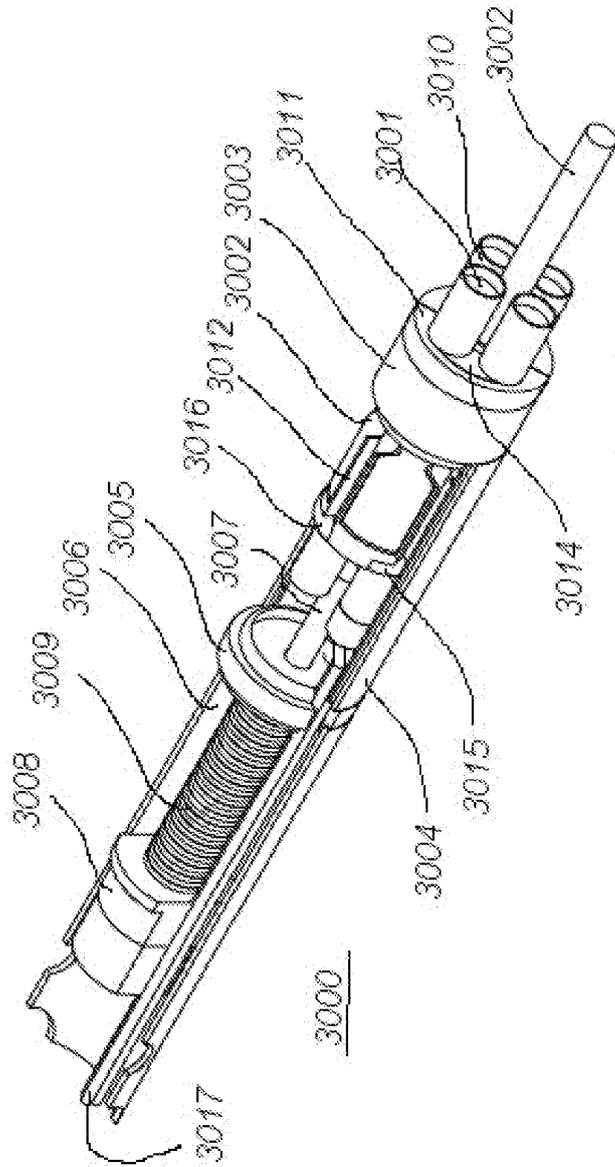
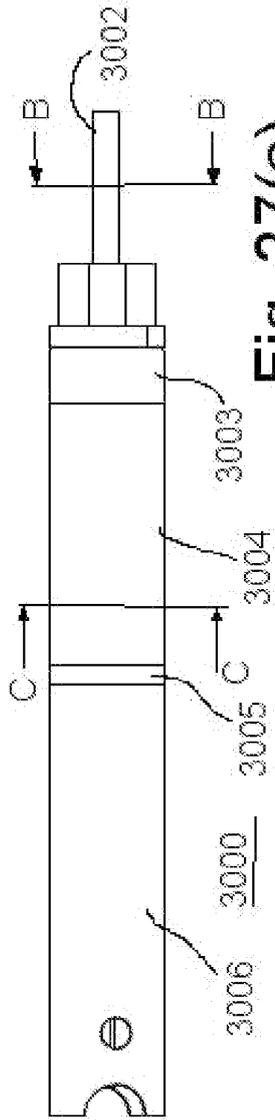
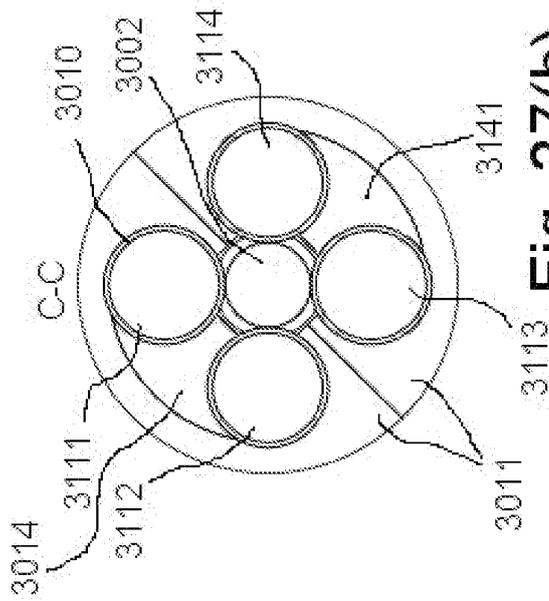


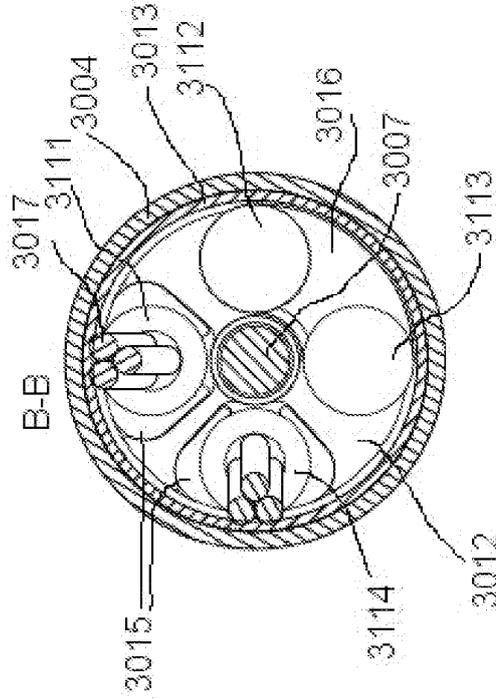
Fig. 26



**Fig. 27(a)**



**Fig. 27(b)**



**Fig. 27(c)**

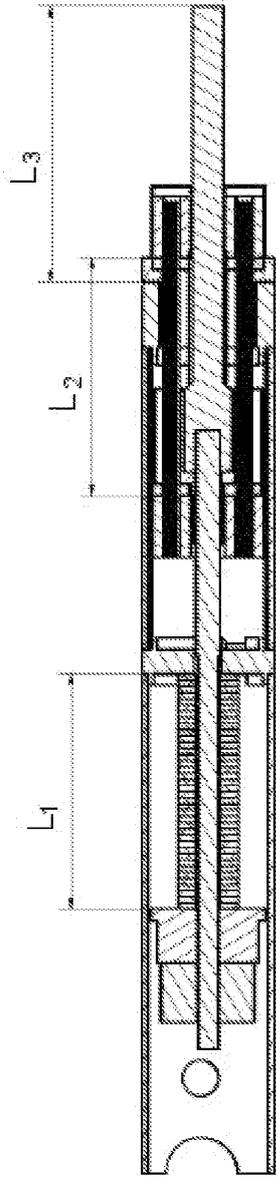


Fig. 28