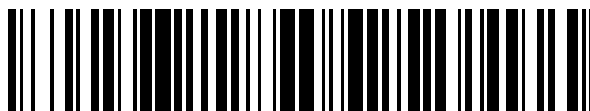


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 794 874**

51 Int. Cl.:

E04H 15/20 (2006.01)

E04C 3/46 (2006.01)

E04C 3/00 (2006.01)

D07B 5/00 (2006.01)

F03G 7/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **16.09.2016** **PCT/IT2016/000213**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.03.2017** **WO17051440**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **16.09.2016** **E 16801320 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.05.2020** **EP 3353360**

54 Título: **Estructura tensairity con cuerdas de alambre con memoria de forma**

30 Prioridad:

25.09.2015 IT UB20153899

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
19.11.2020

73 Titular/es:

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI ROMA "LA
SAPIENZA" (100.0%)
P. Le Aldo Moro 5
00185 Roma (RM), IT**

72 Inventor/es:

**LACARBONARA, WALTER y
CABONI, BIAGIO**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 794 874 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

Estructura tensairity con cuerdas de alambre con memoria de forma

5 La presente invención se refiere a una estructura tensairity de acuerdo con la reivindicación 1.

Más precisamente, la presente invención se refiere a un elemento estructural conocido en el campo técnico como "tensairity" que introduce elementos distintivos con respecto a la técnica anterior: (i) cuerdas en la aleación con memoria de forma (SMA) con comportamientos superelásticos (SE) y de memoria de forma (ME); (ii) tensores mecánicos para el ajuste de la tensión inicial en las cuerdas; (iii) opcionalmente, un aparato de control (procesador) está conectado a circuitos eléctricos que induce pasos de corriente de intensidad variable a través de las cuerdas de alambre de SMA; (iv) dispositivos opcionales para seguimiento en tiempo real de la temperatura y el nivel de tensión en las cuerdas de SMA; (v) opcionalmente, dispositivos para seguimiento en tiempo real de las oscilaciones de tensairity; (vi) opcionalmente, nuevas geometrías estructurales capaces de soportar acciones estáticas y dinámicas multidireccionales.

Técnica anterior

20 El término "tensairity" es una marca registrada de Airlight Ltd Via Croce 1, 6710 Biasca, Suiza, presentada como un nuevo concepto estructural por RH Luchsinger, A. Pedretti, M. Pedretti, P. Steingruber [1,2]. Las patentes precursoras y posteriores de esta invención son numerosas. En lo sucesivo, se enumeran y describen brevemente solicitudes de patentes, que tienen una relación con la invención propuesta aquí.

25 En orden cronológico, la primera patente que une elementos inflables conectados a elementos rígidos para formar una estructura similar a una viga es el documento US 2936056 A de 1957 [3], en el que se describen los toboganes inflables de longitud variable para evacuar a los pasajeros de un avión. Esta patente ha tenido gran relevancia considerando el número de patentes relacionadas con ella presentadas más adelante y la longevidad de la solicitud propuesta, todavía usada actualmente.

30 En la patente US 5311706 A de 1991 [4] se da una estructura reticular inflable, que puede adoptar varias formas. Está constituida por un esqueleto rígido delimitado por láminas de Mylar que forman una envoltura inflable o cilindros inflables interconectados mediante elementos rígidos. Esta aplicación ha sido propuesta para la conexión de satélites o buques. El mismo autor propuso una nueva patente [5] relacionada con la anterior, en donde el esqueleto rígido de la estructura inflable está hecho de haces de fibra reforzada que producen elementos de forma cilíndrica de tipo cable. 35 Estas vigas, inicialmente flexibles, contienen filamentos de material termoplástico interiores. Una vez que la estructura inflable ha asumido la forma deseada, los filamentos son fundidos por fuentes de calor y las diversas vigas se endurecen y forman el esqueleto de la estructura inflable.

40 En 2001, se presentó la patente US 6.463.699 B1 [6] titulada "Construcción de viga de aire utilizando cámaras de presión diferencial". La aplicación consiste en un diafragma inflable de forma cilíndrica dentro del cual se fija una viga que tiene una sección en forma de "I" y consta de material flexible impermeable al aire. La viga con la sección en forma de "I" divide el diafragma cilíndrico en cuatro tubos de cámaras de aire interiores y contiene en su interior el material compresible (denominado "partículas de microesferas o material similar"). Al introducir presión de aire en las cuatro cámaras de aire internas, el material contenido en la viga se comprime y toda la estructura se vuelve rígida.

45 La patente, en donde por primera vez se reivindica el concepto estructural de tensairity, es el documento US 20060260209 [7] presentado en 2004. Se propone una estructura inflable (membrana flexible), que se fabrica para formar parte de un elemento rígido de gran esbeltez y capaz de soportar un estado de compresión. Alrededor del diafragma cilíndrico, al menos dos elementos tensados están torcidos en direcciones opuestas, que están conectados a elementos comprimidos. La idea básica es inflar el elemento neumático de tal manera que los elementos enrollados helicoidalmente estén sujetos a un estado de tensión y el elemento rígido esté en compresión. El elemento comprimido también es estabilizado por el elemento neumático que evita que se consiga la carga de inestabilidad.

55 La patente de Estados Unidos 20080295417 [8] de 2008 presenta un conjunto de al menos tres cilindros inflables integrados entre sí. Uno de los tres cilindros inflables tiene una longitud igual a aproximadamente la mitad del otro. En conjunto, los cilindros en presión forman un arco para ser utilizados como estructuras de esqueleto tales como bóvedas.

60 En 2011, Mauro Pedretti (inventor de tensairity) propuso un nodo estructural [9] para anclar una o más tensairity. Dicho nodo es capaz de proporcionar compresión y tracción a los componentes estructurales de la tensairity usando tornillos no descritos y los anclajes de los cables.

65 En el documento WO2004/094754, se describen un elemento estructural neumático que comprende un cuerpo hueco, al menos dos elementos en tracción, dos tapas, al menos dos nodos, al menos una varilla de compresión. La longitud de los elementos de tracción de dicho elemento estructural neumático se puede variar en $\Delta 1$ de manera neumática, hidráulica o mecánica. Un accionador o una unidad de control está montada entre los extremos de los elementos de

tracción y un nodo. La tensión de tracción en los elementos de tracción se puede adaptar a las circunstancias por medio de dispositivos electrónicos de control y ajuste. La presión en los elementos neumáticos se modifica mediante el paso de corriente en el fluido contenido en los mismos.

5 Los elementos de tracción en el documento WO2004/094754 están hechos de acero, aluminio o material plástico (véase p. 3 1.8-14). Estos materiales no presentan ninguna de las propiedades típicas de los materiales con memoria de forma, incluyendo el efecto superelástico y la capacidad de recuperar una forma preimpresa.

10 La patente más reciente relacionada con tensairity es la US 8640386 B1 [10] presentada en 2012. En esta patente, se propone insertar simplemente en la tensairity clásica (que está sujeta a baja presión de inflado) una o más celdas inflables, que a su vez se pueden inflar a alta presión. La idea básica es aumentar la rigidez a la flexión de toda la estructura con las cámaras de aire internas de alta presión mencionadas anteriormente.

Descripción general de la invención

15 Haciendo referencia a la Figura 1, los elementos básicos constitutivos de una tensairity están representados por una viga 130 de alta esbeltez, una estructura inflable 120 de forma cilíndrica hecha de una membrana de forma cilíndrica, un conjunto de cuerdas 110, 140.

20 Se hace que la viga 130 forme parte integral de una curva directriz del cilindro mientras un par de cables 110, 140 anclados en los extremos de la viga se envuelven alrededor del cilindro inflable 120. El cilindro se infla determinando un estado de tracción en los cables y compresión en el haz de alta esbeltez. La tensairity puede soportar cargas transversales f agentes en la dirección indicada en la Figura 1. Generan un aumento de tensión en los cables y compresión en la viga esbelta 130. El principio mecánico de funcionamiento de una tensairity consiste en la distribución de tracción elástica y de compresión, respectivamente, entre las cuerdas y la viga esbelta. El elemento neumático 120 lleva a cabo esta función y, al mismo tiempo, ejerce una acción de contraste en la viga de alta esbeltez evitando su alabeo para la acción de alta compresión. Cargas con dirección y orientación diferentes a las mostradas en la Figura 1 no se pueden aplicar a tensairity, ya que no permite desarrollar el mecanismo de soporte de compresión-tracción.

30 La característica principal de tensairity consiste en la capacidad de sostener una determinada carga transversal dado un peso estructural que es aproximadamente 10 veces menor comparado con una viga de acero convencional. Esta tremenda capacidad proviene de la distribución racional de la compresión y la tracción, y en el sentido de que la membrana (elemento neumático) aplica a la viga comprimida una acción estabilizadora que evita que pierda estabilidad para la carga máxima.

35 La tensairity se puede utilizar para la elaboración de grandes cubiertas de luz, puentes temporales u otras estructuras grandes para admisiones de emergencia. Estas estructuras tienen en común el hecho de estar sujetas a acciones predominantemente estáticas en condiciones operativas.

40 Debido a su baja amortiguación estructural, la tensairity no es adecuada para aplicaciones en las que hay forzamientos dinámicos. Ejemplos de dichas aplicaciones incluyen estructuras aeroespaciales que pueden incluir aeronaves, plataformas estratosféricas o, de manera más general, hábitats espaciales. La invención tiene por objeto superar la antedicha limitación inherente de la técnica anterior. Asimismo, Otro objeto de la invención es proporcionar medios técnicos novedosos para que la tensairity se convierta en una estructura activa capaz de cambiar sus propias características mecánicas en tiempo real en función de requisitos operativos.

La materia objeto de la presente invención es una estructura de acuerdo con las reivindicaciones anexas, que forman parte integral de la presente descripción.

50 Los elementos inventivos introducidos hacen de tensairity un producto tecnológico con alto rendimiento que es requerido para determinadas aplicaciones en los sectores industrial y civil.

La invención se describirá ahora, con fines ilustrativos, pero no limitativos, con particular referencia a las figuras de los dibujos adjuntos, en los que:

- 55
- la Figura 1 muestra un ejemplo de los elementos básicos que constituyen una tensairity, de acuerdo con la técnica conocida;
 - la Figura 2 muestra una tensairity para acción multidireccional, de acuerdo con la presente invención;
 - la Figura 3 muestra en (a) una vista tridimensional, y (b) una vista en planta de la tensairity toroidal, de acuerdo con la presente invención;
 - 60 - la Figura 4 muestra un ciclo de tensión-deformación de un comportamiento SE de cuerda de alambre de SMA, de acuerdo con la presente invención;
 - la Figura 5 muestra los ciclos de desplazamiento de fuerza de tensairity con memoria de forma, de acuerdo con la presente invención;
 - 65 - la Figura 6 muestra ciclos de tensión-deformación de una cuerda de alambre de SMA con comportamiento SE con temperatura en aumento, de acuerdo con los experimentos dados en la literatura;

- la Figura 7 muestra el efecto de la memoria en una ruta de un comportamiento ME de cuerda de alambre de SMA, de acuerdo con el comportamiento experimental presentado en la literatura;
- la Figura 8 muestra un sistema para el control activo de la tensairity, de acuerdo con la presente invención;
- la Figura 9 muestra secciones transversales de aleación-otro material de hilo único de cuerdas con memoria de forma mixtas, en las que los alambres en gris oscuro tienen la forma de una aleación con memoria de forma y los restantes están hechos de otro material, de acuerdo con la presente invención;
- la Figura 10 muestra secciones transversales de cables mixtos con aleaciones con memoria de forma y otro material de múltiples hilos en el que los alambres en gris oscuro están en las aleaciones con memoria de forma y el resto en otro material, de acuerdo con la presente invención;
- la Figura 11 muestra secciones transversales de tipo cerrado en las que las cuerdas de alambre cilíndricas representadas en gris oscuro están hechas de aleaciones con memoria de forma, mientras que el resto de los alambres con forma, que llevan el cierre están en otro material, de acuerdo con la presente invención; y
- la Figura 12 muestra una prueba de tracción cíclica para la cuerda de diámetro igual a 5,7 mm para la cual existe una alta disipación histerética.

Descripción detallada de ejemplos de la invención

Haciendo referencia a la Figura 2, la tensairity de acuerdo con la invención tiene al menos cuatro varillas de alta esbeltez 230 solidarizadas a lo largo de cuatro líneas del elemento neumático 220. Alrededor de este último, están enrollados al menos cuatro pares de cables de SMA y/o acero-SMA mixtos y/u otro material-SMA 210. Cada par de cables tiene al menos un arrollamiento alrededor de la carcasa neumática y está anclado a los extremos de la varilla asociada. Dicho esquema de realización hace que la tensairity sea capaz de soportar acciones en las dos direcciones ortogonales y en ambas direcciones para cada una.

La configuración de la Figura 2 no restringe las geometrías que se pueden generalizar utilizando un mayor número de vigas con diversas secciones y un mayor número de cuerdas. En el caso no limitativo más simple, las cuerdas están conectadas a las varillas mediante anclajes específicos similares a terminales, por ejemplo, terminales de aluminio de fricción.

En la Figura 3, se muestra un tipo diferente de geometría toroidal 300 de una tensairity, que está diseñada en particular para una estructura de capacidad aerostática (por ejemplo, plataformas estratosféricas). Las varillas 330 avanzan a lo largo de los paralelos del elemento neumático toroidal 320 (véase la Figura 3 (a)) y las cuerdas de SMA 310 están envueltas a su alrededor (véase la Figura 3 (b)) y están conectadas a las varillas.

Aumento de amortiguación estructural

Un elemento de la presente invención que permite ampliar el campo de aplicación de la tensairity consiste en reemplazar las cuerdas, generalmente están hechos de acero, por cuerdas de SMA (comportamiento superelástico y con memoria de forma) o acero mixto-SMA u otro material mixto-SMA en donde por "otro material" se entiende otra aleación de metal o materiales poliméricos.

La presencia del material con memoria de forma SE aumenta en gran medida la amortiguación de la tensairity gracias a la transformación austenita-martensita generada por los ciclos de tracción en las cuerdas, sin mostrar deformaciones inelásticas residuales. El nivel de amortiguación dinámica confiere estabilidad a la estructura. Adicionalmente, se puede ajustar mucho actuando sobre el número y la sección de las cuerdas de alambre con memoria de forma. La amplitud del desplazamiento al que se alcanza dicha amortiguación se puede modificar con el nivel inicial de tensión en las cuerdas. En la zona de conexión entre las cuerdas y las vigas esbeltas, se colocan elementos mecánicos para un pretensado adicional al ya obtenido con el elemento de inflado neumático. Los elementos para pretensar cargan en su interior las celdas de carga capaces de medir el nivel de pretensado aplicado.

En la Figura 4 se muestra un ciclo de tensión-deformación en el que se indica el nivel de pretensado σ_0 que permite que el material de SMA disipe energía debido a los ciclos de deformación inducidos por las acciones sobre la tensairity. El valor numérico de dicho pretensado es extremadamente variable de una aleación a otra y varía considerablemente incluso para una misma aleación con diferentes composiciones y para diferentes procesos de mecanizado recibidos. En cualquier caso, el punto σ_0 - ϵ_0 al que se hace referencia en la Figura 4 puede definirse como el punto de transición (deformación de transición) por el comportamiento elástico del comportamiento postelástico. Este umbral es también aquel más allá del cual se puede suponer que comienza la transformación austenita-martensita.

Se ha fabricado un prototipo de tensairity con material de SMA con comportamiento SE con una varilla de aluminio, un cilindro inflable de PVC y dos alambres hechos de material con memoria de forma (Nitinol). La varilla de aluminio está limitada en los extremos a dos soportes con una bisagra y un carro para ser un esquema de viga inclinada. Los alambres de material con memoria de forma Nitinol se pretensan mediante el inflado del cilindro de PVC y con tensores de tornillo. En general, habrá medios tensores que comprendan o estén constituidos por tensores mecánicos para ajustar la tensión inicial de cuatro o más pares de cuerdas 210, 310, colocados en las zonas de conexión entre las cuerdas y las varillas. Las tensiones iniciales incluyen tensiones en el régimen lineal de alambres de SMA y tensiones en régimen no lineal de los alambres de SMA.

El tensado (inicial u operativo) también se puede obtener mediante la variación de la longitud de las cuerdas de alambre de SMA, usando una fuente de corriente eléctrica conectada a dichos cuatro o más pares de cuerdas, de tal manera que la corriente eléctrica pueda inducir una variación de temperatura en al menos uno de dichos cuatro o más pares de cuerdas. De esta manera, contrariamente a la técnica conocida, el tensado de la tensairity se obtiene mediante las únicas cuerdas de alambre de SMA, sin tener que introducir tensores mecánicos. La tensión se somete a ciclos de desplazamiento transversal en la línea central midiendo la fuerza opuesta con una celda de carga. En la Figura 5, se muestran las curvas de desplazamiento de fuerza, que se obtienen para dos amplitudes de desplazamiento. La energía disipada está representada por el área interna del bucle y se debe a la transición de fase del material con memoria de forma. Al retirar la carga, la estructura no muestra deformaciones residuales debido a la "superelasticidad" de los alambres consistentes en Nitinol. Las curvas corresponden a una amortiguación viscosa equivalente de aproximadamente el 4 % (curva con ancho de 2,5 mm) y el 3 % (curva con ancho de 5 mm). A diferencia de la tensairity de acuerdo con la invención, la tensairity obtenida de acuerdo con la técnica conocida muestra amortiguaciones insignificantes (menos del 1 %) a efectos de una rápida estabilización dinámica de la estructura.

Control activo de tensairity

Un nuevo aspecto innovador propuesto aquí es el hecho de que la rigidez tangente de las cuerdas de SMA con comportamiento SE también se puede aumentar dos veces variando la temperatura de la cuerda (por el efecto Joule) haciendo que la corriente eléctrica fluya. En la Figura 6, se muestran ciclos de tensión-deformación para variar la temperatura del material. El módulo de elasticidad tangente en el origen del Nitinol se duplica para un aumento de temperatura de aproximadamente 50 °C desde la temperatura ambiente de 20 °C [11-12].

Las cuerdas en el comportamiento con ME pueden usarse como elementos activos capaces de variar su acción sobre la tensairity durante el funcionamiento. Estos cables se pueden acortar (hasta el 8 % del valor de la longitud si se usa Nitinol o NiTiCu como una aleación SMA) variando su longitud mediante el calentamiento Joule. Se quiere aprovechar el denominado efecto unidireccional del material con memoria de forma para aplicar en tiempo real un estado adicional de tensión en la tensairity en los casos en que esto sea necesario (por ejemplo, pérdida de pretensión como resultado de la relajación viscoelástica o para ejercer un control activo sobre la tensairity). El efecto de memoria unidireccional se ilustra en la Figura 7 [11-12]. La cuerda se pone en funcionamiento en la tensairity en su configuración alargada indicada mediante p1. Seguidamente, se calienta por el efecto Joule más allá de la temperatura Af (acabado Austenita), generando la recuperación de la deformación impuesta inicialmente. La cuerda está anclada a la estructura de tensairity, en esta última se aplica una tensión indicada mediante el punto p2 que también se conserva cuando la temperatura de la cuerda vuelve a la temperatura ambiente en p3. La tensairity propuesta, en comparación con la tecnología existente, tiene la posibilidad de variar en tiempo real tanto la rigidez tangente como la geométrica mediante un aparato de control que regula la temperatura en las cuerdas de SMA (selectivamente con respecto a la única cuerda de alambre de acuerdo con las necesidades evaluadas por una unidad de control lógico referenciada como CPU en Figura 8) de acuerdo con las condiciones operativas. También es posible garantizar un nivel de amortiguación estructural adecuado contra acciones dinámicas multidireccionales.

El sistema de control destinado a activar la tensairity se representa esquemáticamente en la Figura 8. Las cuerdas de SMA o mixtas de SMA-otros materiales están provistas de una red distribuida de sensores para la medición continua o en tiempo real de la temperatura y el nivel de tensión. En el caso de la red distribuida, se pueden tener galgas extensométricas y termopares, mientras que en el caso de la red continua se pueden usar fibras ópticas.

En el área de anclaje entre las cuerdas y las vigas, se colocan elementos con alta esbeltez, que están adaptados para proporcionar un pretensado adicional en comparación con el obtenido con el elemento de inflado neumático. Dentro de estos elementos, están incrustadas celdas de carga y son capaces de medir el nivel de tensión presente en las cuerdas. Las cuerdas están conectadas a un generador de fuerza electromotriz que permite el paso de la corriente eléctrica. También están envueltas en un recubrimiento que las aísla del resto de la estructura. Otra posibilidad es proveer el recubrimiento, además del material aislante, también de material de alta conductividad eléctrica y hacer que la corriente eléctrica fluya en este último. Finalmente, las vigas de alta esbeltez están provistas de una red distribuida de acelerómetros.

La red de sensores de extensión, temperatura, aceleración y las celdas de carga envían sus mediciones a una unidad de control de adquisición que a su vez envía esta información a la unidad central de procesamiento denominada CPU. La CPU procesa la información en tiempo real utilizando algoritmos específicos que combinan simulaciones mecánicas, procesos de identificación y ciclos de control y ajusta, mediante el generador de la fuerza electromotriz, la intensidad de corriente dentro de las cuerdas.

Tipos de cuerdas de SMA y mixtas

Las cuerdas utilizadas para las estructuras de tensairity pueden producirse en diferentes formaciones que difieren de acuerdo con el número de hilos, el número de alambres que constituyen cada hilo, la posición relativa de los alambres de acero/SMA y los ángulos de arrollamiento de los hilos y alambres en el hilo único. Las aleaciones con memoria de forma utilizables son diferentes: a base de níquel (NiTi - níquel y titanio; NiAl - níquel y aluminio), a base de cobre

(CuSn - cobre y estaño; CuMn - cobre y manganeso; CuAlNi - cobre, aluminio y níquel; CuAlZn - cobre, aluminio y zinc), a base de hierro (FeTi - hierro y titanio; FePt - hierro y potasio; FeMnSi - hierro, manganeso y silicio).

En las Figuras 9 y 10, se dan algunas secciones transversales de cables de un hilo único y de múltiples hilos respectivamente. La posición de los alambres de acero u otro material y de alambres hechos de aleación con memoria de forma se optimiza dependiendo de la aplicación que se considere que produce el comportamiento mecánico deseado. "Otro material" incluye materiales metálicos o poliméricos. Los hilos en espiral abiertos se nombran de acuerdo con el número de alambres que constituyen las diversas capas, comenzando desde el centro hacia el exterior. Para las cuerdas de múltiples hilos, se indica el número de hilos de cada capa y el número de alambres que constituyen el hilo único. Los alambres de SMA son de color gris oscuro, mientras que los restantes son de otro material. Los alambres de SMA se colocan (a) en el núcleo central de la cuerda, (b) en las capas externas, (c) dispuestos alternativamente con alambres de otro material. Por motivos de construcción, la última capa siempre consiste en acero y/u otro material, por ejemplo, polímero. La disposición alterna entre alambres de diferente material y/o la SMA se forma entre las capas que componen la cuerda espiral y dentro de la misma capa. Las cuerdas de hilos colocados alternativamente adoptan el mismo criterio de los alambres en las cuerdas alternadas en espiral y también se fabrican en configuraciones que utilizan, como un hilo único, las cuerdas alternas de tipo espiral.

Los cables que se muestran en las Figuras 9 y 10 pueden ser de un tipo en espiral con diversos arrollamientos, tipo viga (alambres paralelos) y tipo poligonal (hilos trenzados). En la Figura 11, se muestran tres posibles secciones de una cuerda cerrada (generalmente utilizada en cables de soporte), en la que los núcleos centrales están fabricados con materiales con memoria de forma.

Las cuerdas de las Figuras 9 y 10, en caso de que sea necesario, también pueden producirse en su totalidad en una aleación con memoria de forma gracias al alto rendimiento que puede requerir una aplicación específica de la tensairity.

Los inventores fabricaron una mixta entre las cuerdas de tipo espiral en dos diámetros diferentes. La primera cuerda de 5,7 mm de diámetro total está hecha de acero inoxidable del tipo "AISI 302" y de una aleación con memoria de forma de níquel y titanio (Nitinol) con temperatura de transición inicial austenítica = -10 °C caracterizada por un comportamiento pseudoelástico a temperatura ambiente. La segunda cuerda de 19,5 mm de diámetro total está hecha con la misma aleación con memoria de forma, pero con acero inoxidable del tipo "AISI 304". La sección transversal de ambas cuerdas se representa en la Figura 9 (véase (1+6+12+18+24)b). Se compone de 61 alambres dispuestos en un núcleo central y 4 capas posteriores (1+6+12+18+24) enrolladas en la dirección opuesta. Las capas que contienen 12 y 18 hilos están hechas de NiTiNOL mientras que las restantes están hechas de acero. Este diseño está optimizado para una aplicación específica que requiere la transición de fase SMA para tensiones de flexión aplicadas al cable. La Figura 12 muestra una prueba de tracción realizada con una máquina MTS en el laboratorio de materiales y estructuras del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica, Universidad de Roma La Sapienza. La curva de respuesta experimental muestra una capacidad de disipación histerética formidable. La deformación residual se debe a la presencia de fricción y no a una deformación inelástica en el material.

Con respecto a la elección del tipo de aleaciones con memoria de forma en la construcción de los cables, es necesario distinguir entre cuerdas utilizadas en tensairity como accionadores (en las que es importante activar el efecto de la memoria a temperaturas compatibles con el entorno operativo) y las cuerdas utilizadas para aumentar la amortiguación inherente de la estructura y cambiar la rigidez tangente (en las que se usa el efecto superelástico o pseudoelástico). Para el primer grupo, es preferible el uso de aleaciones de Nitinol (níquel-titanio), mientras que para el segundo grupo se prefiere el uso de aleaciones binarias de tipo cobre-aluminio o tipo ternario de cobre-aluminio-zinc que ofrecen la ventaja de costes más bajos ya que consisten en metales menos costosos de níquel y titanio. Sin embargo, dicho criterio no es general porque la elección de la aleación con memoria de forma que se utilizará para los efectos SE y ME depende del tipo de aplicación de tensairity (dependiendo del cual se establece el aspecto económico) y especialmente por el nivel de rendimiento que se desee para alcanzar las funcionalidades específicas.

El proceso de trenzado de cuerdas mixtas requiere procesos térmicos *ad hoc* con respecto a métodos convencionales para cuerdas de alambre debido a la pseudoelasticidad de NiTiNOL cuyos alambres tienden a recuperar su forma original, no conservando así el enrollado impreso por el proceso de trenzado. Para obtener cuerdas que preserven la forma se necesita realizar un proceso de doble calor. Asimismo, la capa exterior fabricada con otro material tiene, como fin principal, encerrar el material con memoria de forma, favoreciendo así la compacidad y la resistencia radial de la cuerda. La cuerda mixta en otro material y aleación con memoria de forma tiene, además, la ventaja de reducir en gran medida los costes de producción gracias al menor uso de la aleación con memoria de forma y de facilitar el proceso de producción en comparación con el de cuerdas que consisten en su totalidad en alambres en la aleación con memoria de forma.

Beneficios

La tensairity propuesta permite ampliar la aplicación de estas estructuras a áreas caracterizadas por la presencia de acciones dinámicas multidireccionales. Esto es posible gracias a la amortiguación adicional inducida por la presencia de las cuerdas de alambre con memoria de forma. Estas últimas hacen que la tensairity sea adaptable de acuerdo con las condiciones operativas. De hecho, es posible variar la rigidez tangente y la rigidez geométrica modificando, por el

efecto Joule, la temperatura de las cuerdas de SMA con comportamiento superelástico o de memoria de forma respectivamente. El sistema de control está compuesto por un procesador conectado a una red de sensores que hace un seguimiento de la tensión y la temperatura en las cuerdas y oscilaciones en tensairity. El sistema, basado en la información procesada por el procesador, es capaz de ajustar el flujo de corriente eléctrica en las cuerdas, por tanto, la temperatura y, en consecuencia, la tensión.

Las principales áreas de aplicación son las estructuras estratosféricas/espaciales y los techos para grandes áreas.

Bibliografía

- [1] Luchsinger, RH, Pedretti, A., Steingruber, P., & Pedretti, M. (2004). The new structural concept Tensairity: Basic principles. Progress in structural engineering, mechanics and computation, 323-328.
- [2] Luchsinger, RH, Pedretti, M., & Reinhard, A. (2004). Pressure induced stability: from pneumatic structures to Tensairity (R). Journal of Bionics Engineering, 1 (3), 141-148.
- [3] William L. Heyniger, Garret Corp, US 2,936,056 A, Variable length inflatable escape chute 1957.
- [4] Bradley Saltee, Tracor Aerospace, Inc., US 5,311,706 A, Inflatable truss frame, 1991.
- [5] Bradley Saltee, Tracor Aerospace, Inc., US 5,579,609 A, Rigidizable inflatable structure, 1994.
- [6] Gary L, Bailey, Ross S. Woods, Obi Corporation, US 6,463,699 B1, Air beam construction using differential pressure chambers, 2001.
- [7] Mauro Pedretti, US 20060260209 A1, Flexible compression member for a flexible pneumatic structural element and pneumatic element means for erecting structures, 2004.
- [8] Jean-Marc Daniel Turcot US 20080295417 A1, Inflatable beam and truss structure, 2008.
- [9] Mauro Pedretti, US 20110209416 A1, Pneumatic node for compression elements, 2011.
- [10] Saul Griffith, Peter S. Lynn, Other Lab, Llc US 8640386 B1, stiffening of an air beam, 2012.
- [11] Suzuki, Y., K. Otsuka y CM Wayman. "Shape memory materials" (1998): 137-138.
- [12] Otsuka, K. y CM Wayman. "Mechanism of shape memory effect and superelasticity" Shape memory materials (1998): 27-49.

En lo analizado anteriormente, se han sugerido realizaciones preferidas y variantes de la presente invención, pero se entenderá que los expertos en la materia pueden hacer modificaciones y cambios, sin apartarse del alcance de protección relacionado, de acuerdo con lo definido por las reivindicaciones que se han descrito adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Estructura tensairity (200, 300), que comprende un elemento neumático (220, 320) que se extiende a lo largo de al menos una curva directriz, estando una o más cuerdas (210, 310) conectadas a los extremos de al menos una viga de alta esbeltez denominada "varilla" (230, 330) en zonas de conexión entre las cuerdas y las varillas, estando dicha al menos una varilla (230, 330) anclada a dicho elemento neumático (220, 320) a lo largo de dicha al menos una curva directriz, en donde:
 - están incluidas cuatro o más varillas (230, 330), que están colocadas a lo largo de las mismas curvas directrices de dicho elemento neumático (220, 330);
 - están incluidos cuatro o más pares de cuerdas (210, 310), que están fabricadas con alambres de aleación con memoria de forma (SMA) y/o con una combinación de hilos fabricados con un material que no es SMA y un material SMA;
 - están incluidos medios tensores para regular la tensión de dichos cuatro o más pares de cuerdas (210, 310); comprendiendo o estando constituidos dichos medios tensores por tensores mecánicos para ajustar las tensiones iniciales de dichos cuatro o más pares de cuerdas (210, 310), colocados en dichas zonas de conexión entre las cuerdas y las varillas, en donde dichas tensiones iniciales incluyen tensiones en el régimen lineal de los alambres de SMA y tensiones en el régimen no lineal de los alambres de SMA.
2. Estructura tensairity de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizada por que dichos medios tensores comprenden una fuente de corriente eléctrica conectada eléctricamente a dichos cuatro o más pares de cuerdas, de tal manera que la corriente eléctrica pueda inducir un cambio de temperatura en al menos uno de dichos cuatro o más pares de cuerdas.
3. Estructura tensairity de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 o 2, caracterizada por que comprende medios de variación del módulo elástico de dichos alambres de SMA, que incluyen una fuente de corriente eléctrica conectada eléctricamente a dichos cuatro o más pares de cuerdas, de tal manera que la corriente eléctrica pueda inducir una variación de temperatura en al menos uno de dichos cuatro o más pares de cuerdas.
4. Estructura tensairity de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, caracterizada por que comprende una unidad de control que comprende una serie de sensores de carga, tensión y temperatura aplicados en puntos correspondientes de dichos cuatro o más pares de cuerdas, así como una unidad lógica electrónica configurada para ajustar el flujo de corriente desde dicha fuente de corriente hasta dichos cuatro o más pares de cuerdas en función de detecciones de dicha serie de sensores.
5. Estructura tensairity de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizada por que dicho material que no es SMA es acero.
6. Estructura tensairity de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizada por que dicho SMA es NiTiNOL o NiTiCu.
7. Estructura tensairity de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, caracterizada por que en dichas cuatro o más varillas (230, 330) se aplican una serie de acelerómetros, preferentemente micrométricos (MEMS).
8. Estructura tensairity de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, caracterizada por que dichas cuatro o más varillas están fabricadas con aluminio o de otra aleación metálica o material laminado compuesto, por ejemplo, fibras de carbono.
9. Estructura tensairity de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, caracterizada por que dicho elemento neumático está fabricado con PVC o cualquier otro material compuesto textil impermeable.
10. Estructura tensairity de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizada por que dicho elemento neumático tiene forma cilíndrica.
11. Estructura tensairity de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, caracterizada por que dicho elemento neumático tiene forma toroidal.

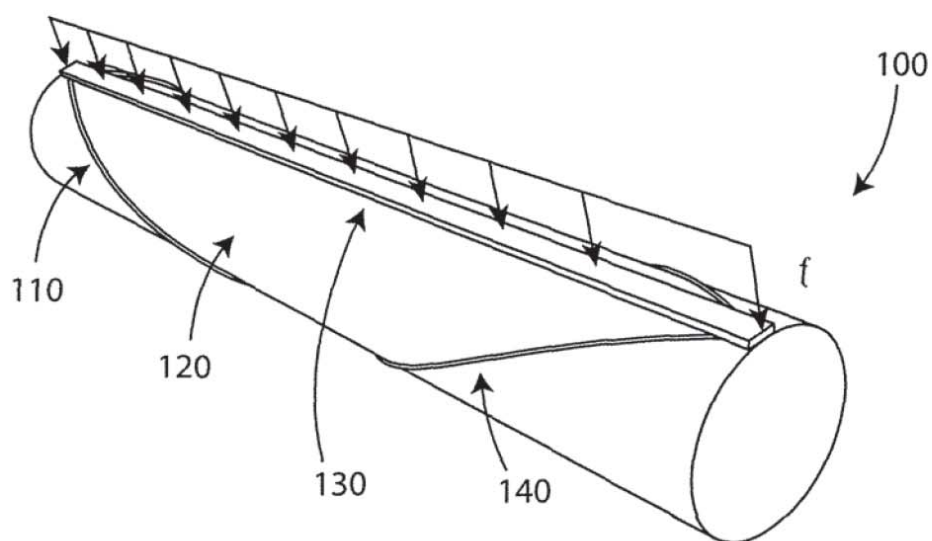


Fig. 1

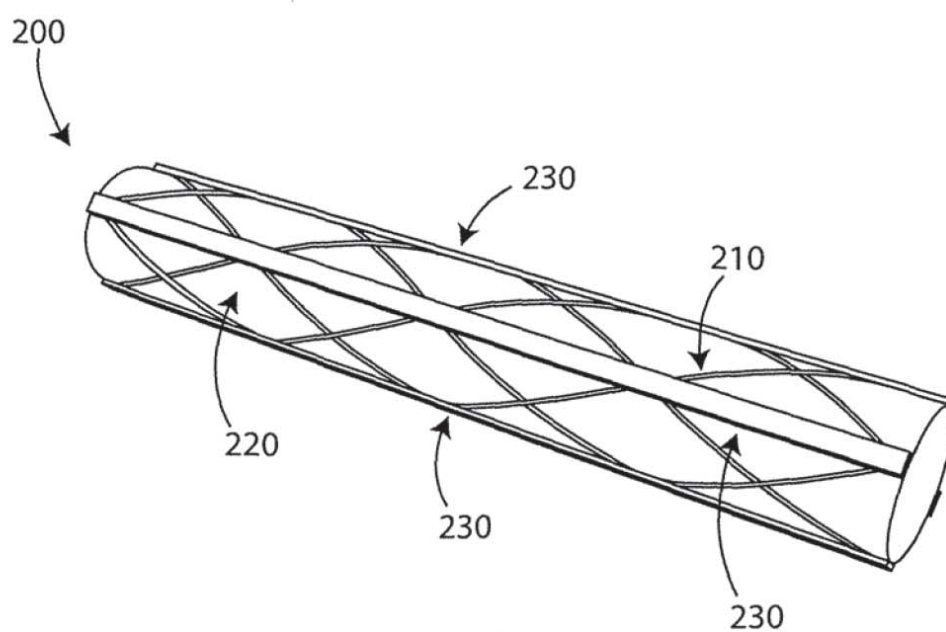


Fig. 2

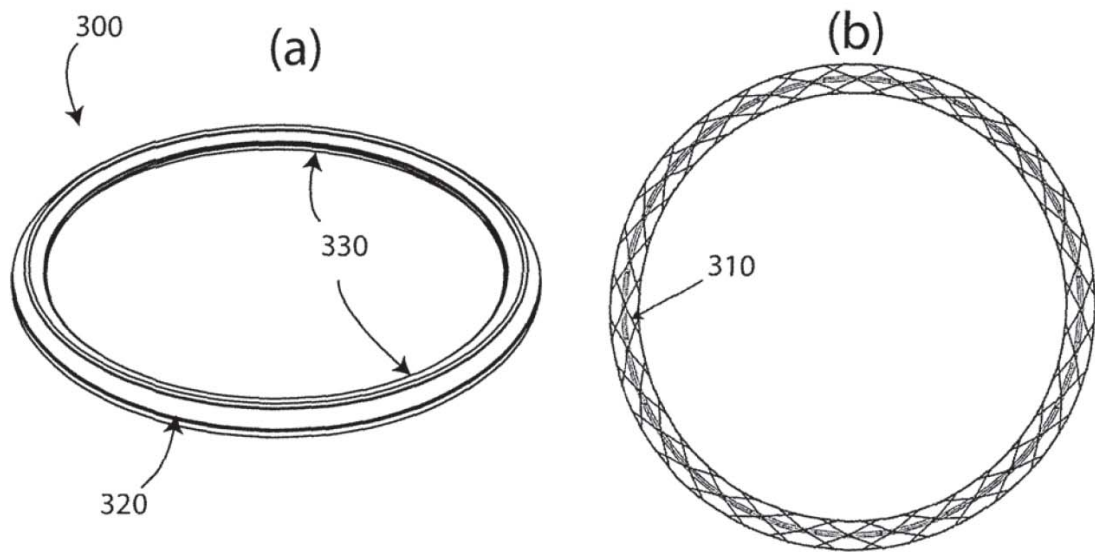


Fig. 3

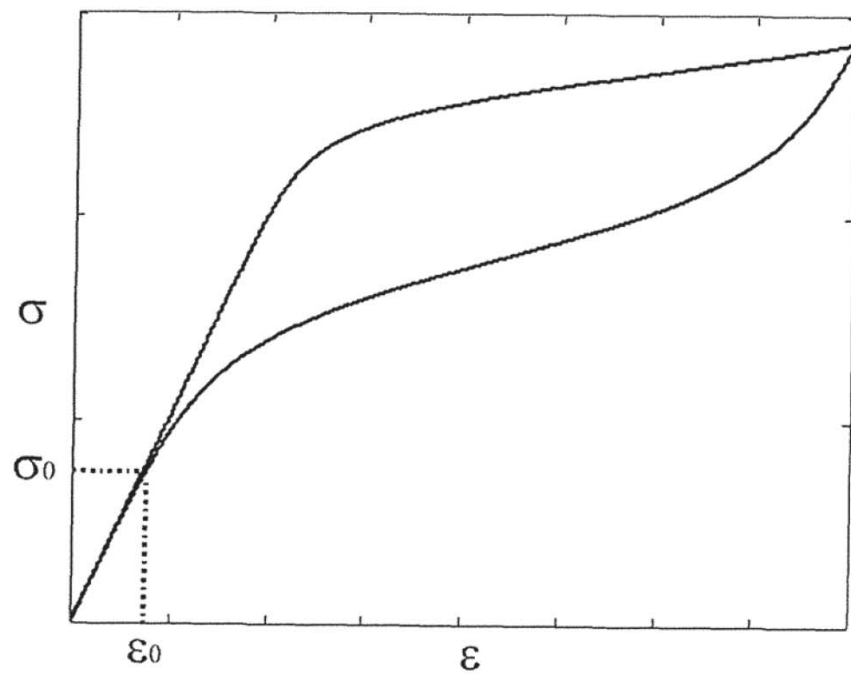


Fig. 4

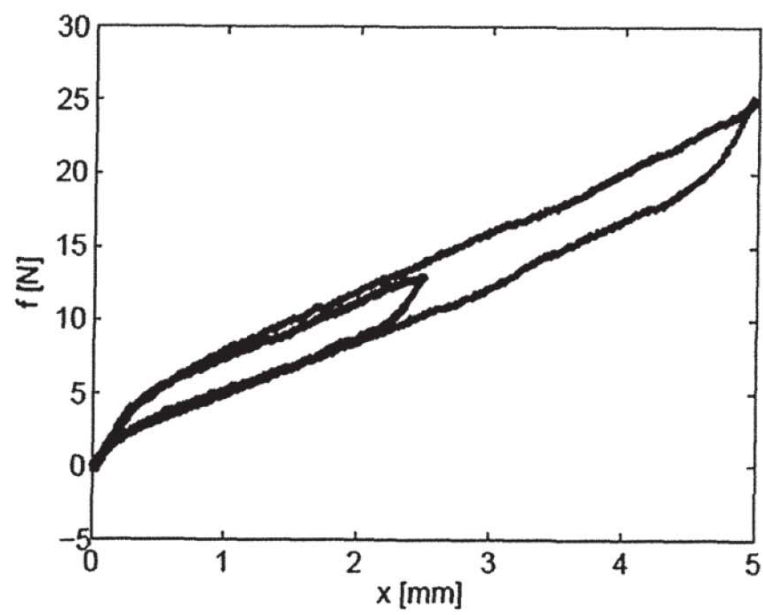


Fig. 5

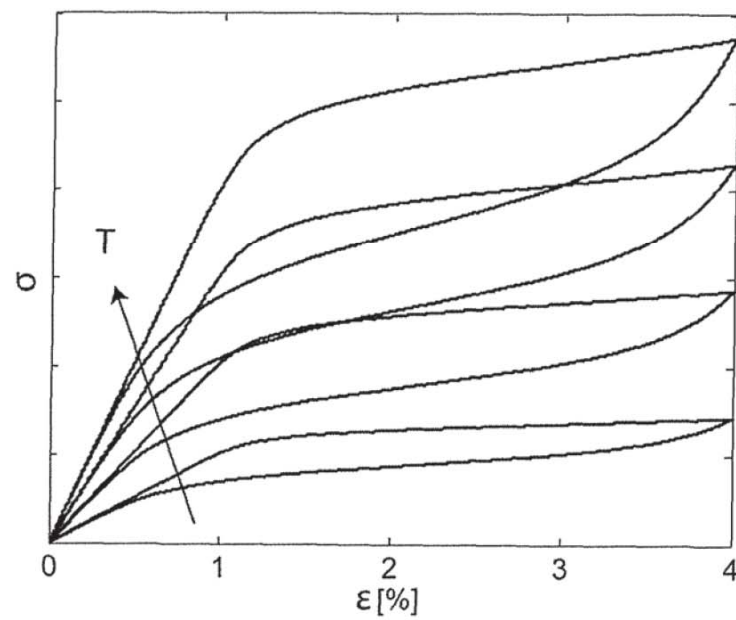


Fig. 6

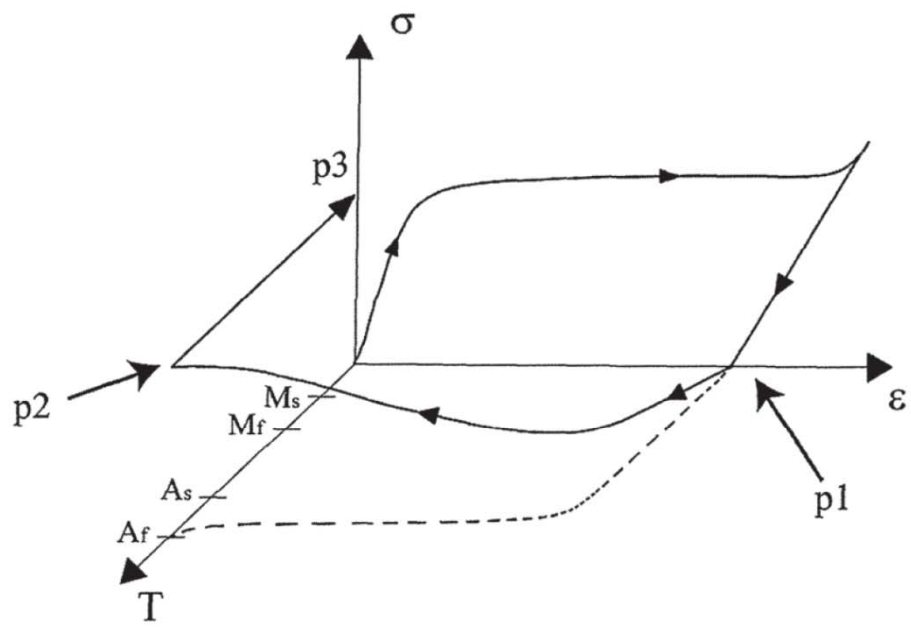


Fig. 7

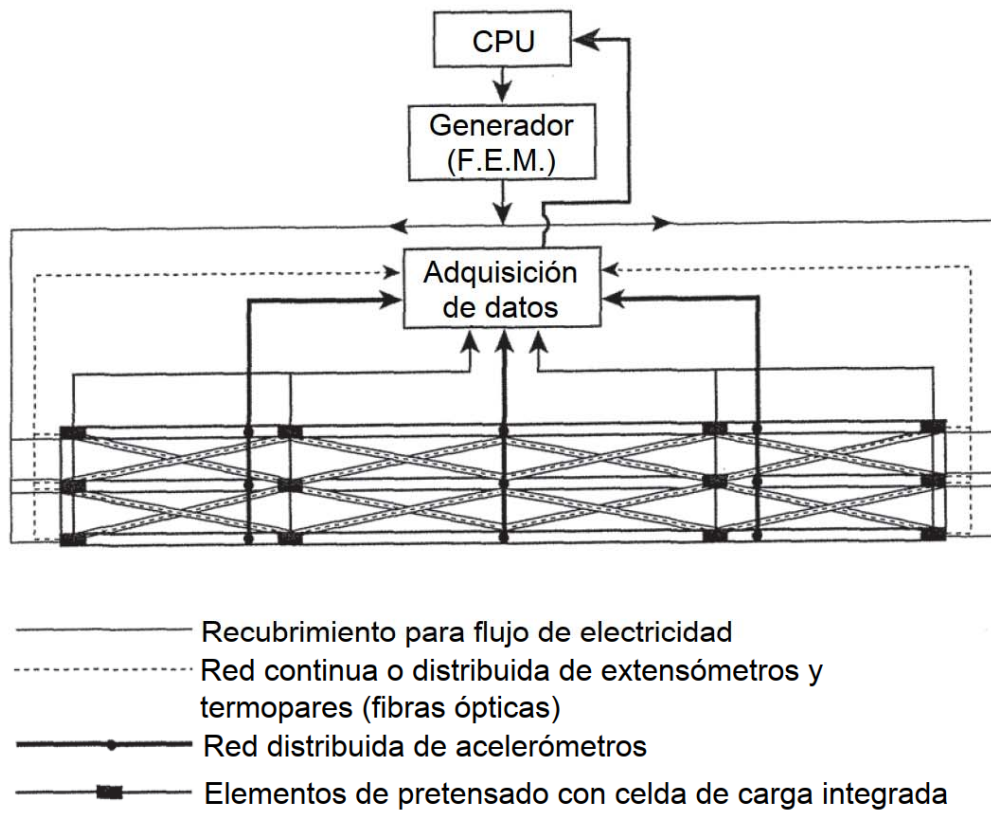


Fig. 8

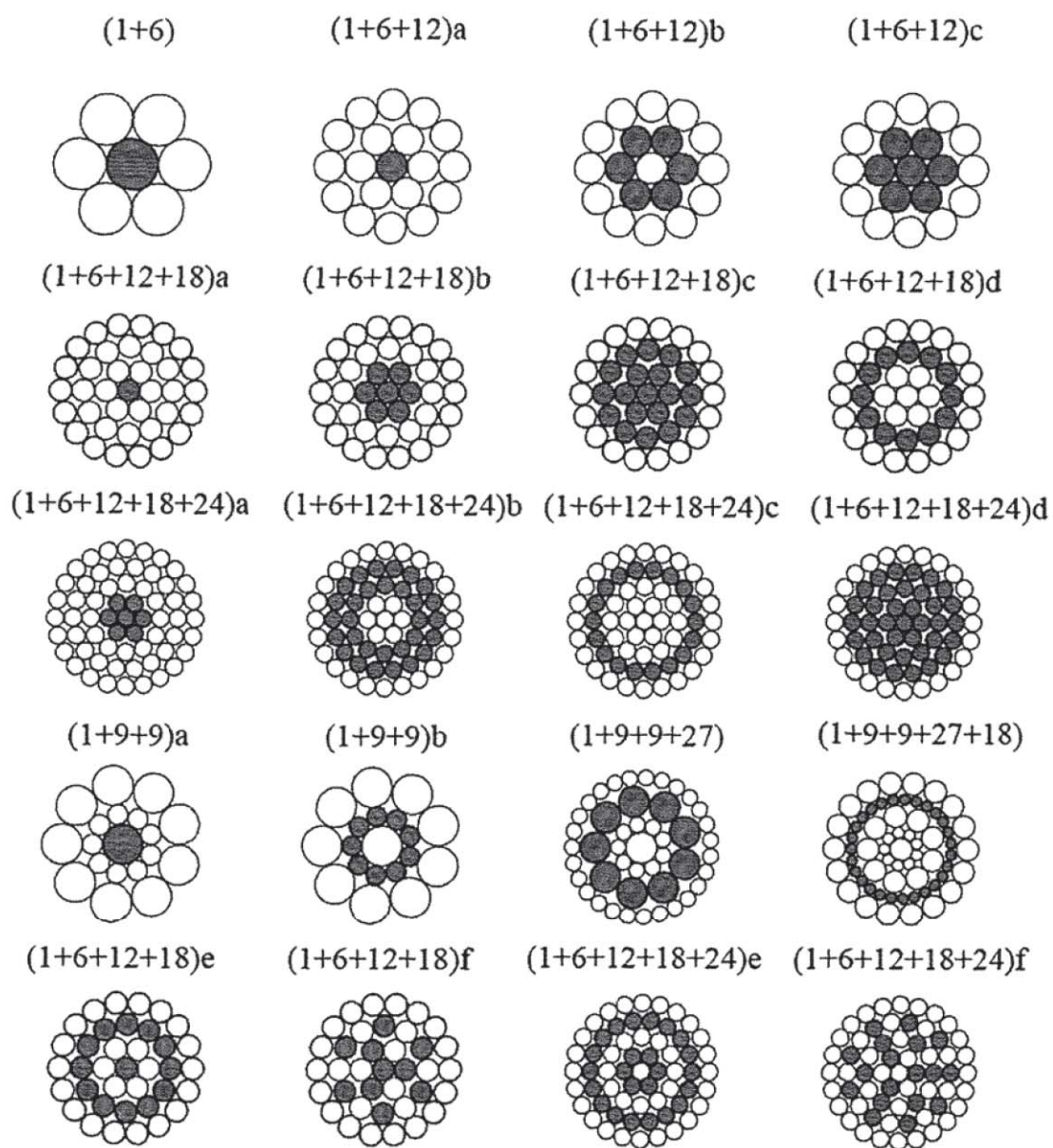


Fig. 9

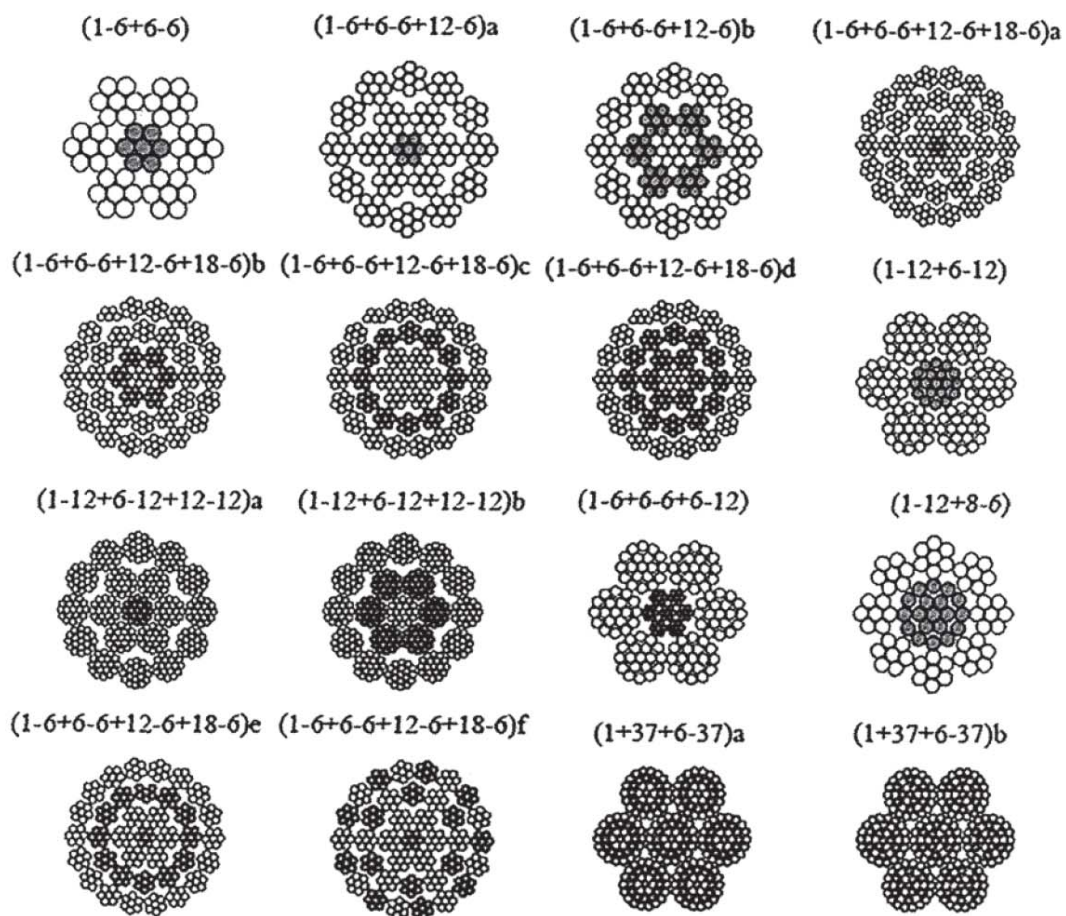


Fig. 10

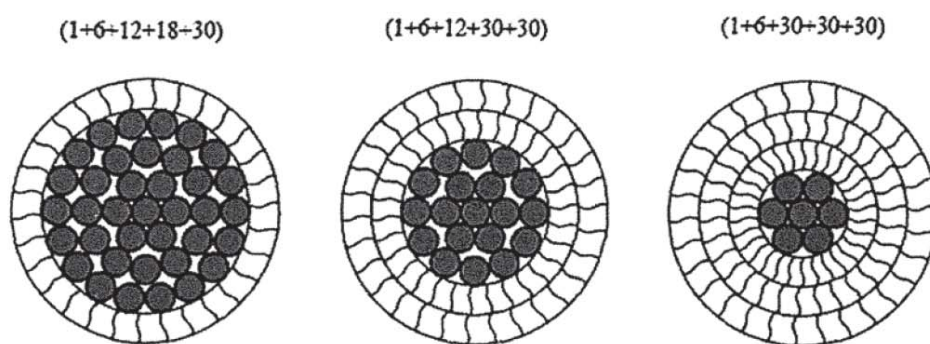


Fig. 11

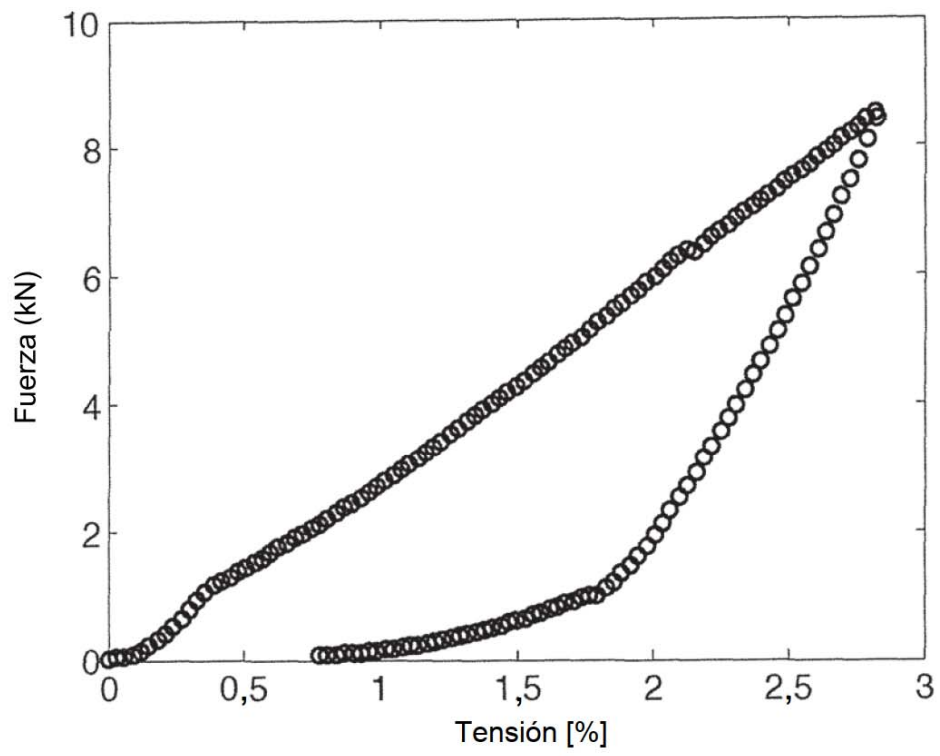


Fig. 12