

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 907 514**

21 Número de solicitud: 202130221

51 Int. Cl.:

G06F 30/17 (2010.01)
B29C 44/34 (2006.01)
B32B 3/12 (2006.01)
B32B 7/022 (2009.01)
B81B 3/00 (2006.01)
B33Y 50/00 (2015.01)
B33Y 80/00 (2015.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:
15.03.2021

43 Fecha de publicación de la solicitud:
25.04.2022

Fecha de modificación de las reivindicaciones:
02.06.2022

Fecha de concesión:
11.11.2022

45 Fecha de publicación de la concesión:
18.11.2022

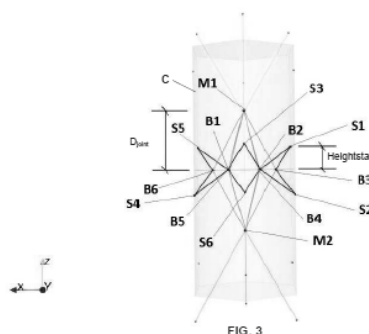
73 Titular/es:
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (100.0%)
Avda. Ramiro de Maeztu, nº 7
28040 Madrid (Madrid) ES

72 Inventor/es:
SAUCEDO MORA, Luis;
GÓMEZ CARANO, Guillermo;
SANZ GÓMEZ, Miguel Angel y
MONTÁNS LEAL, Francisco Javier

74 Agente/Representante:
ELZABURU, S.L.P

54 Título: **CELDA UNIDAD DE METAMATERIAL Y METAMATERIAL FORMADO A PARTIR DE DICHA CELDA UNIDAD**

57 Resumen:
 Celda unidad de metamaterial y metamaterial formado a partir de dicha celda unidad.
 Celda unidad (C) de metamaterial con forma de prisma hexagonal recto, provista de vigas oblicuas unidas entre sí formando: un primer grupo de nodos (B1, B2, B3, B4, B5, B6) dispuesto sobre un plano horizontal central (P) y que definen los vértices interiores de una estrella; un segundo grupo de nodos (S1, S2, S3, S4, S5, S6) que definen los vértices exteriores de la estrella, y están ubicados verticalmente de forma alterna por encima y por debajo del plano horizontal (P); y un tercer grupo de nodos (M1, M2) auxiliares dispuestos verticalmente por encima y por debajo del plano horizontal (P)



ES 2 907 514 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.
 Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

DESCRIPCIÓN

**CELDA UNIDAD DE METAMATERIAL Y METAMATERIAL FORMADO A PARTIR
DE DICHA CELDA UNIDAD**

5

SECTOR DE LA TÉCNICA

10 La presente invención pertenece al sector del diseño y fabricación de materiales, concretamente al campo de los metamateriales.

15 Más en particular, el objeto principal de la invención es una celda unidad de metamaterial cuya geometría y propiedades macroscópicas finales dependen de unos parámetros geométricos que son variables. Esto permite generar celdas unidad de metamaterial que mantengan una forma externa y una conectividad determinadas, pero cuyas propiedades mecánicas y/o electromagnéticas macroscópicas finales pueden variarse ampliamente, a voluntad. De este modo, es posible crear, por ejemplo, un metamaterial con gradientes en su propiedad mecánica del módulo de Poisson.

20 **ANTECEDENTES DE LA INVENCION**

25 Durante los últimos años los metamateriales han ido cobrando importancia en diferentes campos de investigación. Sin embargo, los primeros estudios de estos materiales datan de finales del siglo XIX y principios del XX. Y ya en el siglo XXI se han potenciado con la irrupción de las metodologías de impresión 3D, lo que ha generalizado su uso en la industria.

30 Los metamateriales son un tipo de materiales artificiales cuyas propiedades mecánicas y/o electromagnéticas dependen principalmente de la geometría de su microestructura, más que de su composición química. De este modo, partiendo de un mismo material base puede diseñarse la geometría de su microestructura de tal forma que se dote específicamente al metamaterial resultante de unas determinadas propiedades finales y funcionalidades concretas.

35 Por esta razón, los metamateriales tienen actualmente un elevado potencial en

numerosas industrias y aplicaciones diferentes, puesto que pueden diseñarse con una geometría específica que les otorgue unas determinadas características, incluso características que no se encuentran en los materiales convencionales, lo cual abre una puerta a multitud de aplicaciones: ingenieriles, médicas, etc. No sólo permiten
5 trabajar en nuevos conceptos e ideas, sino que también harán posible mejorar tecnologías que ya existen.

La aparición de la fabricación aditiva (o impresión 3D) también ha jugado un papel importante en el auge de los metamateriales, puesto que dicha tecnología se ha
10 convertido en la principal forma de fabricación de este tipo de materiales, ya que permite conseguir estructuras geoméricamente complicadas con la suficiente precisión.

En los últimos años, en el campo técnico de la fabricación aditiva han aparecido
15 mejoras considerables. De hecho, se han mejorado sustancialmente -tanto las propias técnicas de fabricación- como el software empleado en esta tecnología.

Los metamateriales suelen tener una microestructura ordenada que resulta de la repetición en el espacio de una unidad básica, llamada "celda unidad". Dicha celda
20 unidad de metamaterial comprende habitualmente una pluralidad de barras (o vigas) que se unen entre sí formando nodos y dan lugar a una estructura con una geometría predeterminada.

En la mayoría de los casos, para fabricar el metamaterial se unen sucesivamente entre
25 sí distintas celdas unidad, dando lugar a una capa horizontal. Asimismo, varias de dichas capas horizontales se agrupan -a su vez- verticalmente entre sí, para dar lugar a una porción de metamaterial.

Actualmente existen diferentes configuraciones de celda unidad de metamaterial con
30 buenas propiedades. El problema de estas celdas es que su diseño es fijo, por lo que sus propiedades únicamente se pueden cambiar mediante la utilización de otro material a la hora de la fabricación.

En el sector de los metamateriales existe, por tanto, la necesidad de desarrollar nuevas
35 celdas unidad de metamaterial que superen estas limitaciones del estado de la técnica.

CN111950095A divulga una estructura tridimensional multicelular con relación de Poisson y coeficiente de expansión térmica ajustables. CN211315750U divulga una estructura de celosía con prestaciones mecánicas ajustables. US2017/0057704A1
5 divulga una estructura quiral con efectos auxiliares ajustables.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención pretende subsanar los problemas y desventajas de la técnica
10 anterior, mencionadas anteriormente.

A tal fin, un primer objeto de la presente invención se refiere a una celda unidad de metamaterial con forma de prisma hexagonal recto, provista en su interior de vigas oblicuas, caracterizada porque dichas vigas están unidas entre sí formando:
15

- un primer grupo de nodos dispuesto sobre un plano horizontal central, estando cada uno de dichos nodos ubicado de forma que define un vértice interior de una estrella,
- un segundo grupo de nodos, estando cada uno de dichos nodos dispuesto de
20 forma que define un vértice exterior (o punta) de la estrella, estando además cada uno de dichos nodos ubicado verticalmente, de forma alterna, por encima y por debajo del plano horizontal central; y
- un tercer grupo de nodos auxiliares dispuestos verticalmente por encima y por debajo del plano horizontal central.

25 Esta celda unidad de metamaterial según la presente invención es ortótropa. Es decir, tiene ejes ortogonales entre sí, de doble simetría rotacional, de forma que sus propiedades mecánicas son diferentes en las direcciones de cada uno de esos ejes.

30 Preferiblemente, la celda unidad de metamaterial según la presente invención comprende dos nodos auxiliares, estando el primero de dichos nodos auxiliares dispuesto verticalmente a una primera distancia predeterminada (llamada en lo sucesivo D_{joint}) por debajo del plano horizontal central y estando el segundo de dichos nodos auxiliares dispuesto verticalmente a dicha primera distancia predeterminada
35 (D_{joint}) por encima del plano horizontal central.

Más preferiblemente, la primera distancia predeterminada (*Djoint*) viene determinada por:

$$5 \quad D_{joint} = v_1 * \frac{H_{capas}}{2}$$

Donde

v1 es un parámetro comprendido entre -0,8 y 0,8; y

Hcapas es la altura entre capas del metamaterial.

10

Asimismo, preferiblemente, el segundo grupo de nodos comprende seis nodos diferentes, estando cada uno de dichos nodos ubicado verticalmente de forma alterna, por encima y por debajo a una segunda distancia predeterminada (llamada en lo sucesivo *Heightstar*) del plano horizontal central.

15

Más preferiblemente, la segunda distancia predeterminada (*Heightstar*) viene determinada por:

$$20 \quad H_{heightstar} = v_2 * D_{joint}$$

20

Donde *v2* es un parámetro comprendido entre 0 y 0,5.

Por lo tanto, en las realizaciones de la celda unidad de metamaterial según la presente invención descritas anteriormente, su comportamiento mecánico macroscópico viene determinado por los siguientes parámetros geométricos:

25

- La forma de la estrella en planta que definen las vigas centrales de la celda unidad formando el primer grupo de nodos, controlada por la variable **Dstar**,
- la altura a la que se encuentran los nodos del segundo grupo (que forman la sección hexagonal general), controlado por la variable **Heightstar**, y
- la altura a la que se encuentran los nodos auxiliares del tercer grupo (que unen todas las vigas que parten del interior de la estrella), controlado por la variable **Djoint**.

30

35 Las celdas unidad de metamaterial según la presente invención cambian de tamaño,

deformándose ligeramente, cuando se ven sometidas a una carga. La dirección preferente de carga de dichas celdas unidad de la invención es la dirección z (o vertical). Dependiendo de los valores elegidos para cada parámetro geométrico, las posiciones de los nodos cambiarán y con ello su comportamiento frente a una carga.

5 Sin embargo, la forma en que se transmiten las cargas sí que es genérica independientemente de los parámetros. De este modo, manteniendo la misma estructura de celdas unidad y variando únicamente dichos parámetros geométricos característicos, pueden obtenerse celdas unidad de metamaterial con propiedades mecánicas muy diferentes, tales como, por ejemplo: módulo de Young y coeficiente de
10 Poisson.

De este modo, la presente invención permite diseñar metamateriales que posean unas propiedades mecánicas y/o electromagnéticas macroscópicas finales predeterminadas, sin que para ello sea necesario variar la estructura de las celdas
15 unidad que componen dicho metamaterial.

Asimismo, gracias a la presente invención también es posible obtener porciones de metamaterial, cuyas propiedades estructurales no sean constantes, sino que varíen de una forma predeterminada a lo largo de una o más zonas de la misma (por ejemplo,
20 definiendo un gradiente). Para ello, basta con variar de forma gradual los parámetros geométricos característicos de las celdas unidad pertenecientes a esas zonas.

El hecho de que todas las barras (o vigas) de las celdas unidad según la invención sean oblicuas facilita su fabricación mediante impresión 3D, ya que se minimiza la
25 aparición de errores, al no tener elementos horizontales ni con baja inclinación.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una
30 mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Muestra una vista 3D de una primera realización de una celda unidad de
35 metamaterial según la presente invención y con un coeficiente de Poisson de signo

positivo.

Figura 2.- Muestra una vista 3D una segunda realización de una celda unidad de metamaterial según la presente invención, con un coeficiente de Poisson negativo
5 (comportamiento auxético).

Figura 3.- Muestra una vista frontal de la celda representada en la Figura 1.

Figura 4.- Muestra una vista de planta de la celda unidad representada en la Figura 1.

10 Figura 5.- Es una vista esquemática en planta que representa una muestra de metamaterial según el segundo aspecto de la invención, formado a partir de la agrupación de celdas unidad según el primer aspecto de la invención.

Figura 6.- muestra una imagen perteneciente a un archivo de tipo stl, el cual se utiliza
15 para introducir el modelo de metamaterial en una máquina de fabricación aditiva o impresora 3D para su fabricación.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

20 A lo largo de la presente descripción, así como en las figuras, los elementos con funciones iguales o similares se designarán con las mismas referencias numéricas

Una primera realización de celda unidad (C) de metamaterial según la presente invención se ilustra en las Figuras 1, 3 y 4, y da lugar a un material con un coeficiente
25 de Poisson de signo positivo.

Los nodos correspondientes al primer grupo se designan con las referencias B1, B2, B3, B4, B5, B6 y están dispuestos sobre el plano horizontal central P. Cada uno de dichos nodos del segundo grupo B1, B2, B3, B4, B5 y B6 define uno de los vértices
30 interiores de una estrella (vista en planta y mostrada en la Fig. 3).

Asimismo, los nodos correspondientes al segundo grupo se designan con las referencias S1, S2, S3, S4, S5, y S6. Dichos nodos S1 a S6 definen los vértices exteriores de la estrella, y están ubicados verticalmente, de forma alterna, por encima
35 y por debajo del plano horizontal central (P) a una altura Heightstar.

Por último, los nodos auxiliares, correspondientes al tercer grupo, se designan con las referencias M1 y M2, estando uno de ellos (M1) dispuesto por encima plano horizontal central P y el otro (M2), por debajo del mismo a una altura D_{joint} .

5

En la Figura 2 se muestra una segunda realización de una celda unidad C de metamaterial según la presente invención, que da lugar a un material con un coeficiente de Poisson de signo negativo (es decir, que presenta un comportamiento auxético).

10

Las dimensiones de las celdas unidad C mostradas en las figuras 1 a 4 a lo largo de las tres direcciones del espacio se definen mediante los ejes x, y, z.

Como puede apreciarse en las Figuras 1 a 4, las distintas vigas que forman las celdas unidad C de la invención se pueden separar en varios grupos, dependiendo de la función que desempeñen y de su posición. Cada grupo de vigas se ha indicado con un color diferente, y su función es la que se describe a continuación:

- **Rojo (Tipo 0).** Corresponde a las vigas que forman la estrella central de la celda C. Esta zona es la que de manera diferencial aumentará o disminuirá de tamaño al cargarse la celda.
- **Verde y naranja (Tipo 1).** Son las vigas encargadas de transmitir las cargas a la parte central de la celda C a través de los nodos (M1 y M2) y vigas auxiliares.
- **Gris (Tipo 2).** Son las vigas auxiliares que conectan los nodos interiores de la estrella con los nodos auxiliares.

La celda unidad (C) de metamaterial según la invención recibe las cargas verticales exteriores a través de las vigas de Tipo 1 superiores (indicadas en color verde en las figuras) e inferiores (naranja). Concretamente son los nodos de los extremos de estas vigas los que se desplazan, por lo que desplazan los nodos centrales auxiliares. Al ser estos desplazados, y a través de las vigas de Tipo 2 (gris), se desplazan los vértices interiores de la estrella. Dependiendo de las condiciones del caso de carga y de las características de la celda, la sección de la estrella aumentará o disminuirá su superficie, es decir las dimensiones de la celda que son perpendiculares a la carga vertical se verán alteradas aumentando o disminuyendo.

Según lo explicado anteriormente, es posible dimensionar las celdas unidad C de la invención, de tal forma que el Coeficiente de Poisson del metamaterial resultante posea el signo que deseemos. Más en particular:

5

- **Coef. Poisson positivo.** Este caso se corresponde con la Figura 1. Al comprimir la celda unidad C ésta se expande en las direcciones perpendiculares a la dirección vertical (Z). Dada la posición particular en la que están dispuestos los nodos auxiliares M1 y M2 centrales (visible en dicha Fig. 1), la sección de la estrella aumenta. Por ello, en caso de someter la celda a tracción, la sección disminuiría; y

10

- **Coef. Poisson negativo.** Este caso se corresponde con la Figura 2. En él, al comprimir la celda y, debido al carácter auxético que tiene la celda unidad, también se reducirán las dimensiones perpendiculares a la dirección vertical.. Al colocarse los nodos auxiliares en las posiciones opuestas (el nodo superior se encuentra en la mitad inferior de la celda, y el nodo inferior en la mitad superior), generan un efecto contrario a la geometría de la Figura 1. Si en lugar de comprimir, se somete a un esfuerzo de tracción la respuesta sería la contraria a la de compresión y se produce una expansión y un aumento de la sección.

15
20

Para diseñar el metamaterial, los valores geométricos macroscópicos no varían pese al cambio de las propiedades mecánicas de la celda unidad. Estos controlan la geometría macroscópica de la pieza que se quiere diseñar con el metamaterial. Sus valores para una muestra cúbica son las dimensiones de la muestra en las 3 direcciones del espacio y las dimensiones en x, y, z de la celda unidad que definirán la densidad y rigidez macroscópicas. Una de estas dimensiones es la denominada Hcapas.

25

30

En las celdas unidad C de metamaterial mostradas en las figuras 1 a 4 los siguientes parámetros geométricos principales son los que condicionan las propiedades finales y los que se van variando para ver la evolución de estos valores:

- **Hcapas:** es la altura entre capas del metamaterial. Este valor influye

35

directamente en el número de capas que tendrá la muestra del material, ya que se calcula con este parámetro y con el tamaño deseado de la muestra en la dirección z de la siguiente manera:

5
$$c = \frac{s}{H_{\text{capas}}}$$

- c es el número de capas del metamaterial.
- s es el tamaño de la muestra en la dirección z.

- 10 • **Djoint:** controla la posición de los nodos auxiliares que se encuentran en el eje central de la celda unidad. Su fórmula es la siguiente:

$$D_{\text{joint}} = v1 * \frac{H_{\text{capas}}}{2}$$

15 El valor de v1 se encuentra arbitrariamente entre -0,8 y 0,8 y como se puede apreciar en la expresión de su fórmula, depende directamente del valor de Hcapas, en concreto de la mitad de este. Esto es así para que la posición de los nodos auxiliares no se salga de la propia celda. A pesar de esto, si v1=1 las posiciones coincidirían con los límites superior e inferior de la celda. Por esta razón limita a 0,8 para dejar un 20% de margen de seguridad.

20

- **Heightstar:** se encarga de controlar el “zigzag” vertical que presentan los vértices de la estrella. Depende directamente de *Djoint* como se puede ver en su expresión:

25

$$Heightstar = v2 * D_{\text{joint}}$$

Donde v2 toma valores desde 0 a 0,5.

- 30 • **Dstar:** es el porcentaje de la apotema del hexágono que define la entrada de la estrella.

35 En la tabla que sigue a continuación se muestran los posibles valores del módulo Young y del modulo Poisson característicos de un metamaterial según la presente

invención, en función de los valores que adoptan las variables geométricas Djoint, Hcapas, Stepx, Stepy, Heightstar y Dstar que caracterizan su celda unidad. Stepx es la resta de la coordenada x_{S1} del nodo S1 menos la coordenada x_c del nodo M1. Stepy es la resta de la coordenada y_c del nodo M1 menos la coordenada y_{S2} del nodo S2.

5

| Djoint (mm) | Hcapas (mm) | Stepx (mm) | Stepy (mm) | Heightstar (mm) | Dstar (mm) | Poisson | | Young |
|----------------|----------------|---------------|---------------|--------------------|---------------|---------|------|------------|
| | | | | | | Xz | yz | E (MPa) |
| 1,20 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 1,70 | 1,53 | 232,95 |
| 0,60 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 1,19 | 1,26 | 292,32 |
| 1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,88 | 0,88 | 121,94 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,81 | 0,73 | 716,23 |
| 0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,50 | 0,62 | 170,81 |
| 0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,51 | 0,57 | 83,02 |
| 0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,26 | 0,35 | 120,94 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,49 | 0,30 | 447,53 |
| 0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,44 | 0,25 | 111,69 |
| 0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,45 | 0,24 | 146,15 |
| 0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,29 | 0,16 | 102,09 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,13 | 152,41 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,13 | 152,41 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,13 | 152,41 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,13 | 152,41 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,08 | 0,13 | 152,41 |
| 0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,28 | 0,12 | 133,09 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,20 | 0,11 | 110,68 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,21 | 0,10 | 183,81 |
| 0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,28 | 0,10 | 143,79 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,03 | 0,08 | 101,33 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,03 | 0,08 | 101,33 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,03 | 0,08 | 101,33 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,03 | 0,08 | 101,33 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,03 | 0,08 | 101,33 |

ES 2 907 514 B2

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-------|------|------|-------|--------|
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,11 | 0,07 | 157,22 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,11 | 0,07 | 157,22 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,11 | 0,07 | 157,22 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,11 | 0,07 | 157,22 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,11 | 0,07 | 157,22 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,70 | 0,09 | 0,07 | 120,07 |
| 0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,19 | 0,07 | 98,16 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,05 | 0,04 | 111,15 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,05 | 0,04 | 111,15 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,05 | 0,04 | 111,15 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,05 | 0,04 | 111,15 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,05 | 0,04 | 111,15 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 145,12 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 145,12 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 145,12 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 145,12 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,08 | 0,02 | 145,12 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 99,89 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 99,89 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 99,89 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 99,89 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,04 | 0,01 | 99,89 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,03 | 0,01 | 82,26 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,03 | 0,01 | 82,26 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,03 | 0,01 | 82,26 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,03 | 0,01 | 82,26 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | 0,03 | 0,01 | 82,26 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 66,44 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 66,44 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 66,44 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 66,44 |
| 0,00 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 66,44 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 78,78 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 78,78 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 78,78 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 78,78 |
| 0,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,02 | 0,01 | 78,78 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 103,08 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 103,08 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 103,08 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 103,08 |
| 0,00 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | 0,03 | 0,00 | 103,08 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,08 | 0,70 | 0,08 | -0,01 | 118,61 |

ES 2 907 514 B2

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|
| -0,60 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | -0,21 | -0,04 | 193,76 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | -0,15 | -0,05 | 113,32 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | -0,20 | -0,06 | 158,71 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | -0,23 | -0,07 | 170,38 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,10 | -0,27 | -0,08 | 254,35 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,10 | 0,70 | -0,07 | -0,09 | 141,17 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,13 | 0,70 | 0,03 | -0,11 | 224,10 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,04 | 0,10 | -0,23 | -0,11 | 111,76 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | -0,21 | -0,13 | 130,93 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,05 | 0,10 | -0,30 | -0,13 | 154,04 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | -0,14 | 162,56 |
| -0,60 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | -0,35 | -0,17 | 222,74 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | -0,30 | -0,18 | 179,79 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,50 | -0,03 | -0,19 | 163,92 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | -0,34 | -0,19 | 174,96 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,16 | 0,70 | -0,17 | -0,19 | 161,39 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,70 | -0,08 | -0,20 | 138,90 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,04 | 0,20 | -0,30 | -0,20 | 132,59 |
| -0,60 | 3,00 | 1,00 | 1,00 | -0,06 | 0,20 | -0,38 | -0,20 | 223,92 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,10 | 0,10 | -0,34 | -0,20 | 115,29 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,04 | 0,50 | -0,11 | -0,22 | 170,36 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | 0,00 | 0,20 | -0,43 | -0,24 | 254,21 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,70 | -0,10 | -0,24 | 264,33 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,13 | 0,10 | -0,44 | -0,25 | 154,18 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,05 | 0,20 | -0,40 | -0,27 | 180,41 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,70 | -0,25 | -0,27 | 176,46 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,16 | 0,10 | -0,43 | -0,28 | 122,37 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,10 | 0,20 | -0,42 | -0,30 | 139,26 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,10 | -0,49 | -0,32 | 127,38 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,10 | 0,50 | -0,25 | -0,33 | 187,23 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,25 | 0,70 | -0,19 | -0,33 | 292,77 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,10 | -0,56 | -0,35 | 158,94 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,08 | 0,50 | -0,26 | -0,37 | 177,00 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,16 | 0,20 | -0,52 | -0,38 | 148,17 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,13 | 0,20 | -0,54 | -0,38 | 185,43 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,32 | 0,70 | -0,24 | -0,40 | 166,32 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,20 | -0,58 | -0,42 | 154,14 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,16 | 0,50 | -0,38 | -0,45 | 208,80 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,20 | -0,66 | -0,47 | 192,11 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,13 | 0,50 | -0,32 | -0,51 | 277,85 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,25 | 0,20 | -0,72 | -0,52 | 196,13 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,10 | 0,50 | -0,34 | -0,52 | 256,91 |
| -0,40 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,50 | -0,47 | -0,53 | 224,90 |

| | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|-------|--------|
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,40 | 0,70 | -0,38 | -0,55 | 186,34 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,50 | -0,57 | -0,63 | 206,40 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,20 | 0,50 | -0,48 | -0,66 | 308,84 |
| -0,50 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,25 | 0,50 | -0,58 | -0,75 | 330,11 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,25 | 0,50 | -0,71 | -0,86 | 296,94 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,32 | 0,50 | -0,88 | -0,94 | 239,51 |
| -0,80 | 2,00 | 1,00 | 1,00 | -0,40 | 0,50 | -1,09 | -1,14 | 262,36 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,40 | 0,50 | -1,06 | -1,22 | 336,00 |
| -1,00 | 2,50 | 1,00 | 1,00 | -0,50 | 0,50 | -1,26 | -1,42 | 359,63 |

Las posiciones de los distintos nodos de una celda unidad C según cualquiera de las figuras 1 a 4, dadas en forma de coordenadas, pueden obtenerse a partir de las coordenadas del centro de la celda (x_c, y_c, z_c) según se describe a continuación:

5

- **Grupo de nodos M:**

- M1:

- $x_{M1} = x_c$
- $y_{M1} = y_c$
- $z_{M1} = z_c + D_{joint}$

10

- M2:

- $x_{M2} = x_c$
- $y_{M2} = y_c$
- $z_{M2} = z_c - D_{joint}$

15

- **Grupo de nodos S:**

- S1:

- $x_{S1} = x_c + step_x$
- $y_{S1} = y_c$
- $z_{S1} = z_c + Heightstar$

20

- S2:

- $x_{S2} = x_c + step_x / 2$
- $y_{S2} = y_c - step_y$
- $z_{S2} = z_c - Heightstar$

25

- S3:

- $x_{S3} = x_c - step_x / 2$
- $y_{S3} = y_c - step_y$
- $z_{S3} = z_c + Heightstar$

- 5
 - S4:
 - $x_{S4} = x_c - \text{stepx}$
 - $y_{S4} = y_c$
 - $z_{S4} = z_c - \text{Heightstar}$
 - S5:
 - $x_{S5} = x_c - \text{stepx} / 2$
 - $y_{S5} = y_c + \text{stepy}$
 - $z_{S5} = z_c + \text{Heightstar}$
 - 10
 - S6:
 - $x_{S6} = x_c + \text{stepx} / 2$
 - $y_{S6} = y_c + \text{stepy}$
 - $z_{S6} = z_c - \text{Heightstar}$
- **Grupo de nodos B:**
 - 15
 - B1:
 - $x_{B1} = (2 - \text{Dstar}) * x_c - (1 - \text{Dstar}) * (x_{S6} + x_{S5}) / 2$
 - $y_{B1} = (2 - \text{Dstar}) * y_c - (1 - \text{Dstar}) * (y_{S6} + y_{S5}) / 2$
 - $z_{B1} = (2 - \text{Dstar}) * z_c - (1 - \text{Dstar}) * (z_{S6} + z_{S5}) / 2$
 - 20
 - B2:
 - $x_{B2} = (2 - \text{Dstar}) * x_c - (1 - \text{Dstar}) * (x_{S6} + x_{S1}) / 2$
 - $y_{B2} = (2 - \text{Dstar}) * y_c - (1 - \text{Dstar}) * (y_{S6} + y_{S1}) / 2$
 - $z_{B2} = (2 - \text{Dstar}) * z_c - (1 - \text{Dstar}) * (z_{S6} + z_{S1}) / 2$
 - 25
 - B3:
 - $x_{B3} = (2 - \text{Dstar}) * x_c - (1 - \text{Dstar}) * (x_{S2} + x_{S1}) / 2$
 - $y_{B3} = (2 - \text{Dstar}) * y_c - (1 - \text{Dstar}) * (y_{S2} + y_{S1}) / 2$
 - $z_{B3} = (2 - \text{Dstar}) * z_c - (1 - \text{Dstar}) * (z_{S2} + z_{S1}) / 2$
 - 30
 - B4:
 - $x_{B4} = (2 - \text{Dstar}) * x_c - (1 - \text{Dstar}) * (x_{S2} + x_{S3}) / 2$
 - $y_{B4} = (2 - \text{Dstar}) * y_c - (1 - \text{Dstar}) * (y_{S2} + y_{S3}) / 2$
 - $z_{B4} = (2 - \text{Dstar}) * z_c - (1 - \text{Dstar}) * (z_{S2} + z_{S3}) / 2$
 - 35
 - B5:
 - $x_{B5} = (2 - \text{Dstar}) * x_c - (1 - \text{Dstar}) * (x_{S4} + x_{S3}) / 2$
 - $y_{B5} = (2 - \text{Dstar}) * y_c - (1 - \text{Dstar}) * (y_{S4} + y_{S3}) / 2$
 - $z_{B5} = (2 - \text{Dstar}) * z_c - (1 - \text{Dstar}) * (z_{S4} + z_{S3}) / 2$

o B6:

- $x_{B6} = (2 - Dstar) * x_c - (1 - Dstar) * (x_{S4} + x_{S5}) / 2$
- $y_{B6} = (2 - Dstar) * y_c - (1 - Dstar) * (y_{S4} + y_{S5}) / 2$
- $z_{B6} = (2 - Dstar) * z_c - (1 - Dstar) * (z_{S4} + z_{S5}) / 2$

5

Una vez se tienen las coordenadas de los nodos, se puede proceder a la unión de estos mediante los distintos tipos de vigas:

- 10
 - Tipo 0. Unen los nodos de los grupos B y S (los nodos interiores de la estrella con los vértices de esta), alternando nodos de los dos grupos, de la siguiente forma: S1-B2, B2-S6, S6-B1, B1-S5, S5-B6, B6-S4, S4-B5, B5-S3, S3-B4, B4-S2, S2-B3 y B3-S1.
 - Tipo 1. En este caso se hace una separación en la clasificación de las vigas de este tipo:
 - 15
 - o Superiores. Enlazan la celda con la celda superior uniendo el nodo M1 de la celda con ciertos nodos del grupo S de la celda superior de la forma: M1-S2, M1-S4, M1-S6.
 - o Inferiores. Enlazan la celda con la celda inferior uniendo el nodo M2 de la celda con ciertos nodos del grupo S de la celda inferior de la forma:
 - 20
 - o M1-S1, M1-S3, M1-S5.
 - o
 - Tipo 2. Unen los nodos del grupo M con los del grupo B, de la siguiente forma: M1-B1, M1-B2, M1-B3, M1-B4, M1-B5, M1-B6, M2-B1, M2-B2, M2-B3, M2-B4, M2-B5, M2-B6.

25

En la Figura 3 se acotan dos distancias importantes de la celda unidad C, que dependen de dos de los parámetros geométricos: la primera distancia predefinida *Djoint*, y la segunda predefinida *Heightstar*.

30 Asimismo, en la Figura 4. se acota la distancia 3, la cual es igual a la apotema del hexágono multiplicado por $(1 - Dstar)$.

En la Figura 5 se muestra esquemáticamente una muestra de metamaterial M según el segundo aspecto de la invención, formado a partir de la agrupación de celdas unidad C según el primer aspecto de la invención. Como puede apreciarse en dicha figura,

35

cada nodo del grupo S, es compartido por tres celdas unidad C diferentes.

Por último, en la Figura 6 se muestran una muestra en 3D metamaterial resultante.

El metamaterial según la presente invención se fabrica preferiblemente mediante
5 impresión 3D. En vista de ello, a continuación se describe un posible proceso de diseño digital del mismo, que incluye desde la conceptualización hasta la generación de un fichero stl, legible por la mayoría de impresoras 3D.

De acuerdo con dicho proceso, para fabricar el metamaterial primero se crea una malla
10 de nodos y elementos en un archivo que es visualizado posteriormente en algún software por ejemplo Patran, Catia, o Paraview. Este archivo contiene las coordenadas de cada nodo y la conectividad de los elementos para poder representar la estructura.

Las coordenadas de los nodos se generan mediante un código, el cual puede
15 programarse en prácticamente cualquier lenguaje de programación e implementa las ecuaciones expresadas en este documento.

Una posible realización preferente sería emplear Python para crear las coordenadas de los nodos al igual que la conectividad. Tras tener todos los datos listos, el código
20 crea un archivo de tipo vtk. VTK es un kit de herramientas de visualización de software libre. Este tipo de archivo es muy utilizado por aplicaciones de visualización como Paraview, que es la herramienta elegida en este caso para ver la estructura en 3D.

Una vez se tiene la muestra de metamaterial en Paraview, se puede crear un archivo
25 stl de la estructura. Este tipo de archivo contiene un modelo 3D sin color ni textura que puede ser enviado a una impresora 3D o máquina de fabricación aditiva para su fabricación.

Un aspecto clave que puede explotarse con este tipo de diseño es la creación de una
30 biblioteca de combinaciones de parámetros geométricos para crear un gran número de estructuras y ensayarlas mecánicamente para obtener sus propiedades finales. De esta forma se obtendría una tabla que relaciona cada combinación de parámetros geométricos con sus propiedades mecánicas, y mediante algún tipo de ingeniería inversa se podría crear una función que tuviera como variables de entrada las
35 propiedades finales deseadas y diera como resultado los parámetros geométricos

necesarios para obtenerlas.

5 Las diferentes aplicaciones del metamaterial definido en este documento vienen de la necesidad de crear cualquier elemento industrial que necesite un gradiente de propiedades mecánicas y deba de realizarlo con el mismo material y proceso de fabricación. Por ello esta invención está muy enfocada a la impresión 3D y la optimización topológica.

10 La presente invención no está limitada, en modo alguno, a las realizaciones aquí divulgadas. De hecho, en vista de la presente descripción, para la persona experta en la técnica serán evidentes otras posibles realizaciones diferentes de esta invención, cuyo alcance de protección viene definido exclusivamente por el juego de reivindicaciones que sigue a continuación.

REIVINDICACIONES

1. Celda unidad (C) de metamaterial con forma de prisma hexagonal recto, provista
 5 en su interior de vigas oblicuas, caracterizada por que dichas vigas están unidas
 entre sí formando:

- un primer grupo de nodos (B1, B2, B3, B4, B5, B6) dispuesto sobre un
 10 plano horizontal central (P), estando cada uno de dichos nodos (B1, B2, B3,
 B4, B5, B6) ubicado de forma que define un vértice interior de una estrella,
- un segundo grupo de nodos (S1, S2, S3, S4, S5, S6), estando cada uno
 de dichos nodos (S1, S2, S3, S4, S5, S6), dispuesto de forma que define un
 vértice exterior de la estrella, estando además cada uno de dichos nodos
 15 ubicado verticalmente, de forma alterna, por encima y por debajo del plano
 horizontal central (P); y
- un tercer grupo de nodos (M1, M2) auxiliares dispuestos verticalmente
 por encima y por debajo del plano horizontal central (P).

2. Celda unidad (C) de metamaterial según la reivindicación 1, caracterizada por
 20 que comprende dos nodos auxiliares (M1, M2), estando el primero de dichos
 nodos auxiliares (M1) dispuesto verticalmente a una primera distancia
 predeterminada (Djoint) por debajo del plano horizontal central (P) y estando el
 segundo de dichos nodos auxiliares (M2) dispuesto verticalmente a dicha
 primera distancia predeterminada (Djoint) por encima del plano horizontal central
 25 (P).

3. Celda unidad (C) de metamaterial según la reivindicación 2, caracterizada por
 que la primera distancia predeterminada (Djoint) viene determinada por:

30
$$D_{joint} = v_1 * \frac{H_{capas}}{2}$$

donde:

v1 es un parámetro comprendido entre -0,8 y 0,8; y

Hcapas es la altura entre capas del metamaterial.

35 4. Celda unidad (C) de metamaterial según cualquiera de las reivindicaciones

anteriores, caracterizada por que el segundo grupo de nodos comprende seis nodos diferentes (S1, S2, S3, S4, S5, S6), estando cada uno de dichos nodos (S1, S2, S3, S4, S5, S6) ubicado verticalmente de forma alterna, por encima y por debajo a una segunda distancia predeterminada (Heightstar) del plano horizontal central (P).

5

5. Celda unidad (C) de metamaterial según las reivindicaciones 3 y 4, caracterizada por que la segunda distancia predeterminada (Heightstar) viene determinada por:

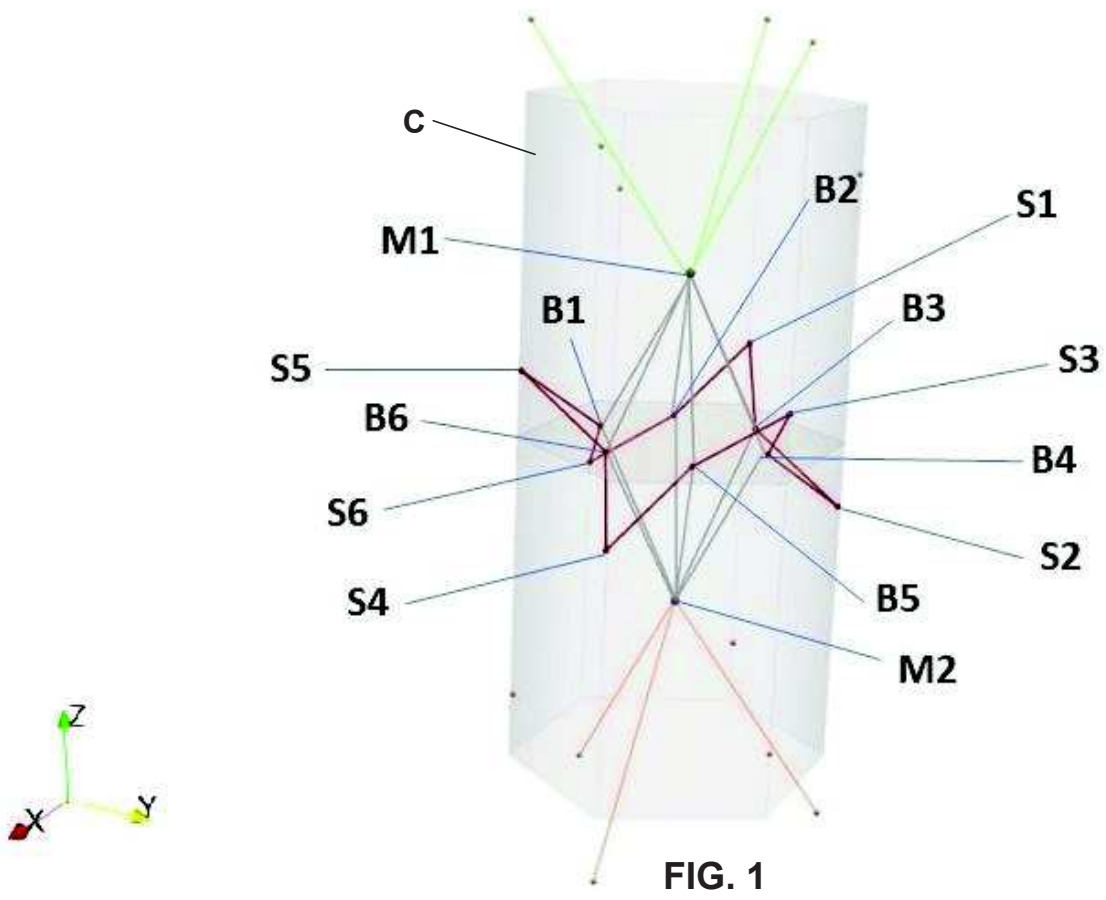
10

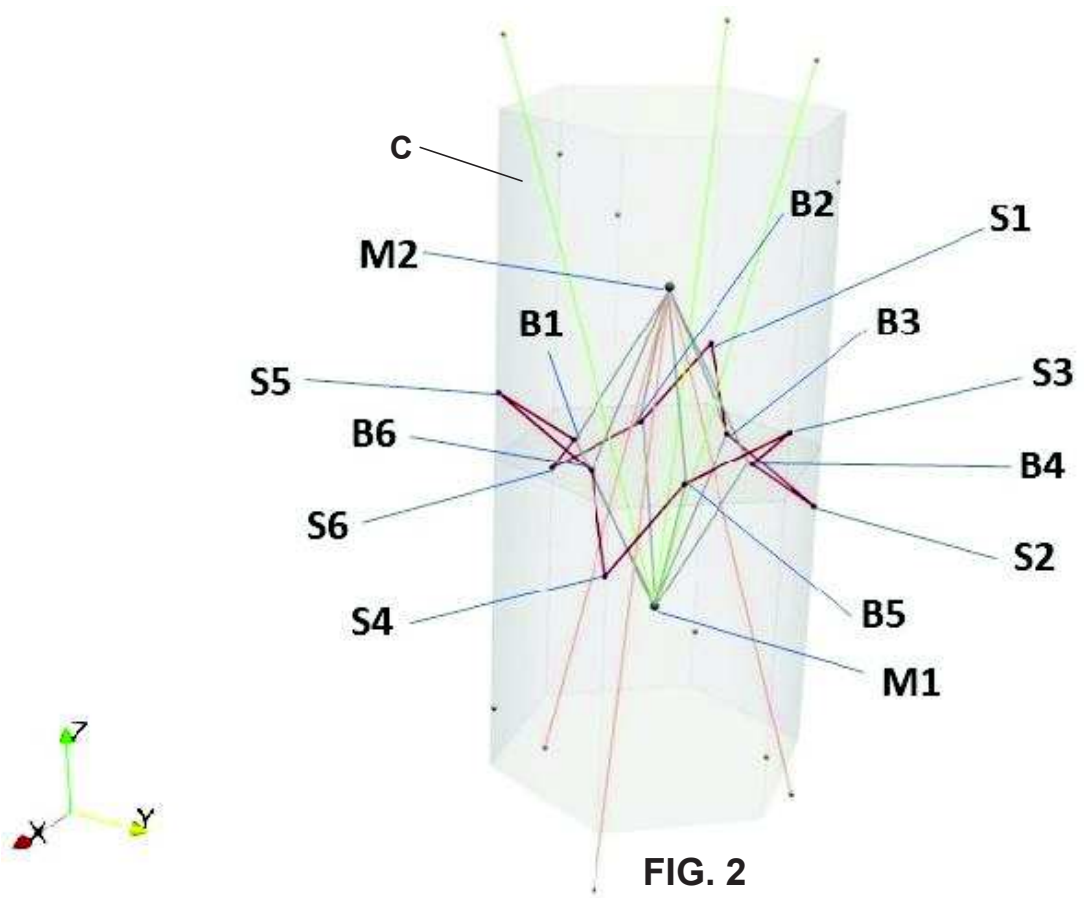
$$\text{Heightstar} = v2 * Djoint$$

donde v2 es un parámetro comprendido entre 0 y 0,5.

6. Metamaterial (M) formado a partir de la agrupación iterativa de celdas unidad (C) de metamaterial, según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5.

15





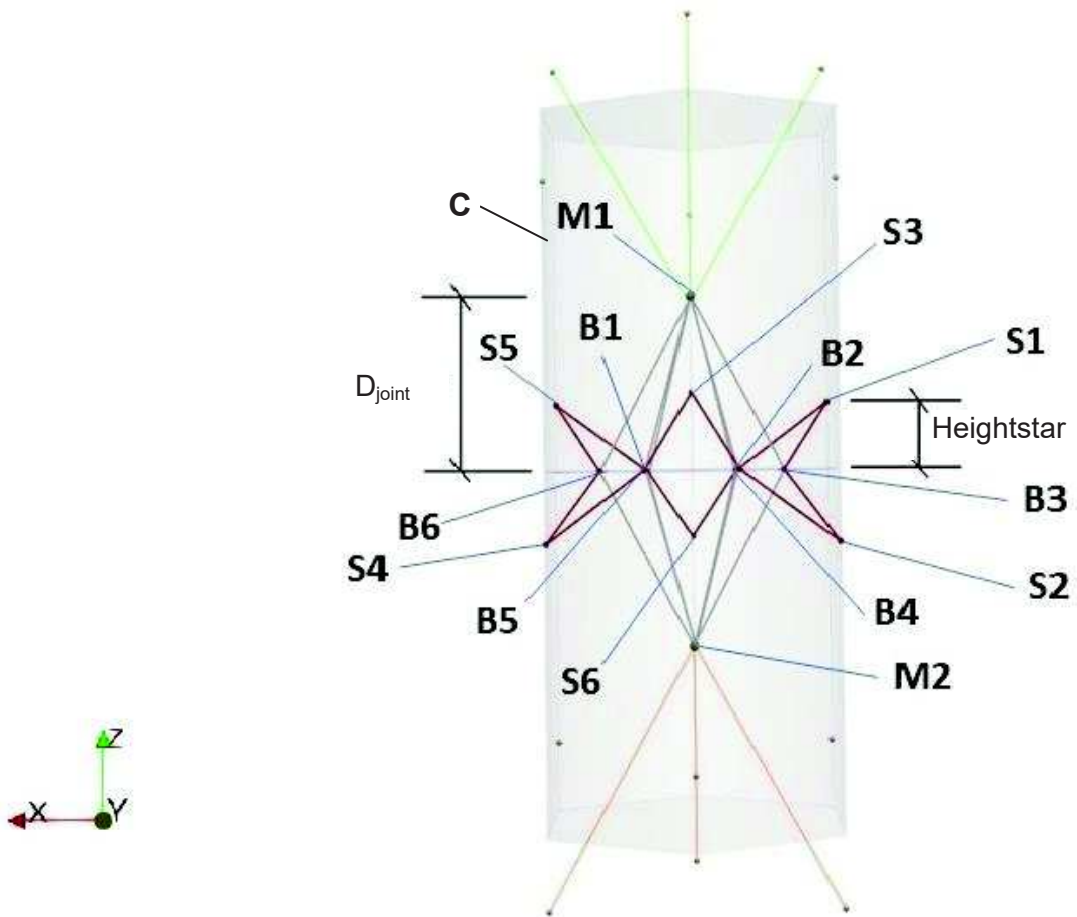


FIG. 3

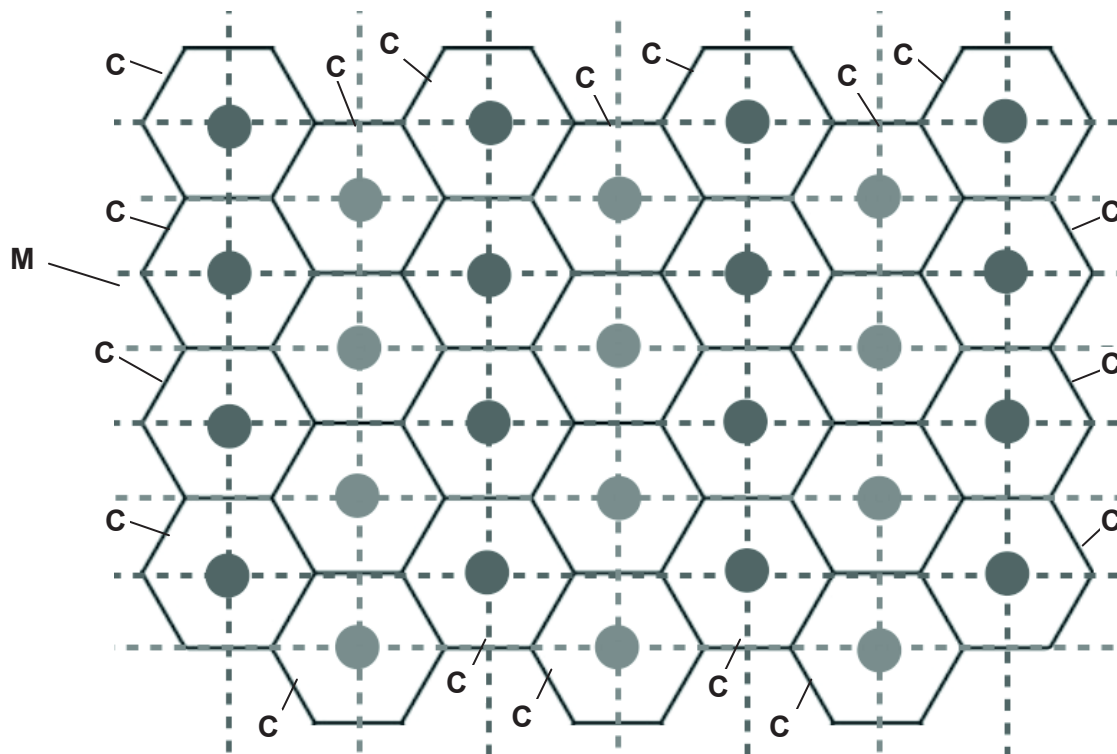
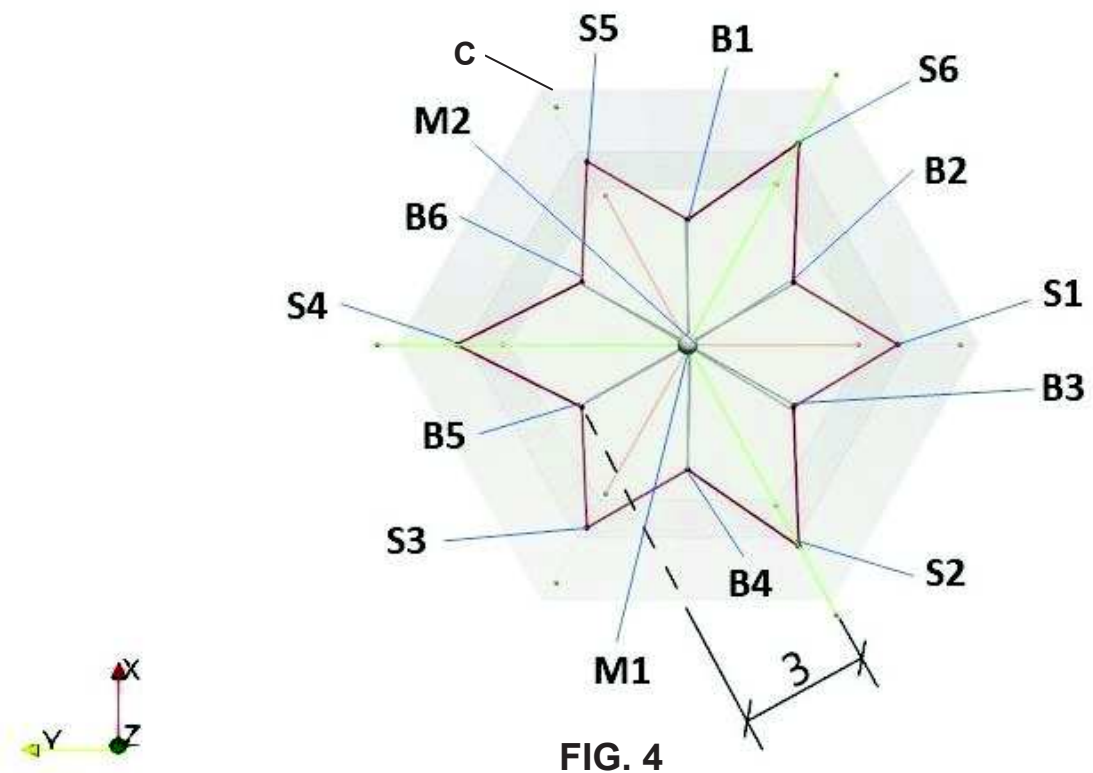


FIG. 5

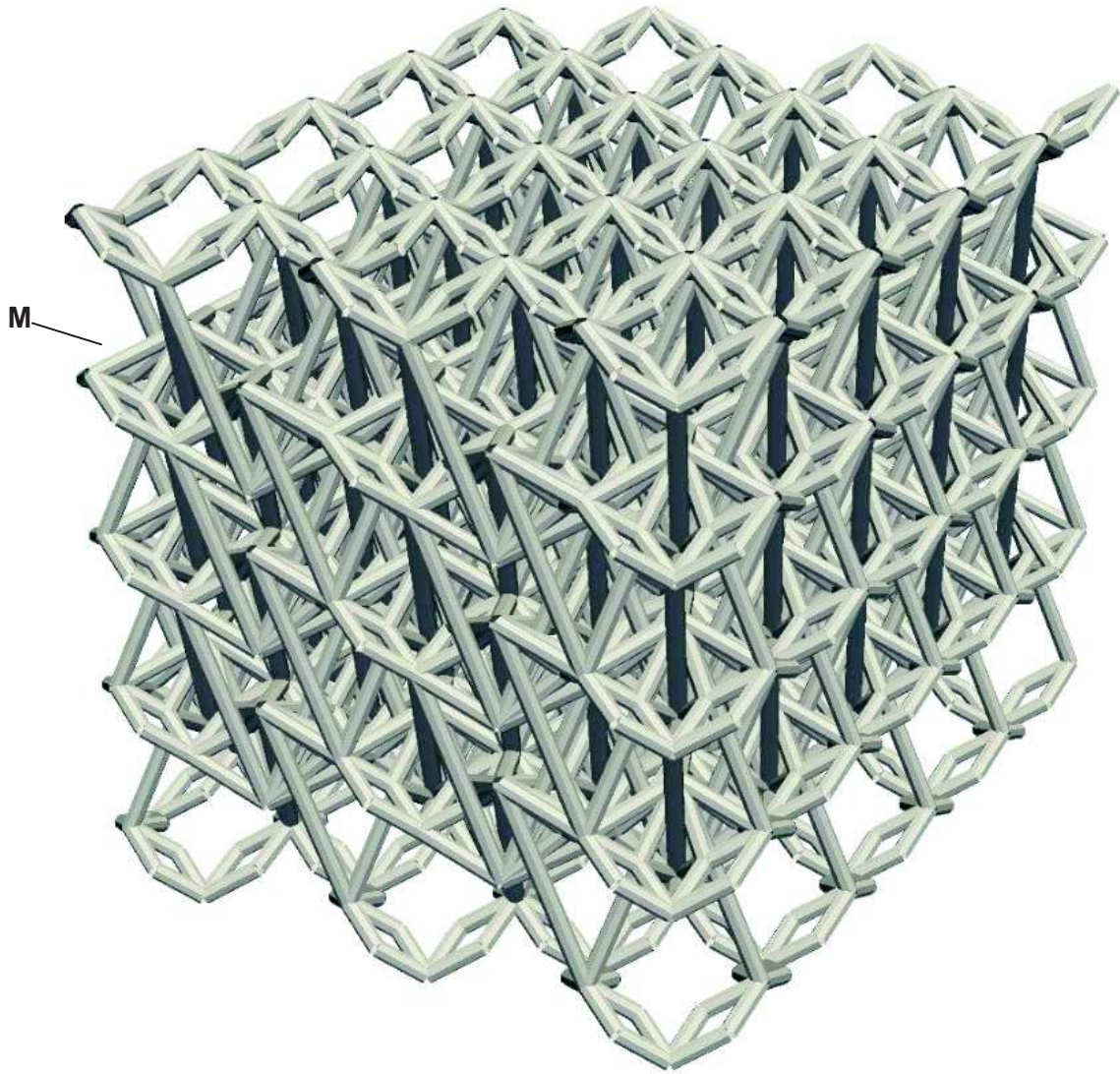


FIG. 6