inpi instituto nacional da propriedade industrial

(11) Número de Publicação: **PT 115228 B**

(51) Classificação Internacional:
D01D 5/00 (2006.01)

(12) **FASCÍCULO DE PATENTE DE INVENÇÃO**

(22) Data de pedido: **2018.12.21**

(30) Prioridade(s):

(43) Data de publicação do pedido: **2020.06.22**

(45) Data e BPI da concessão: **2023.04.12**
76/2023

(73) Titular(es):
UNIVERSIDADE DE AVEIRO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE SANTIAGO 3810-193 AVEIRO PT

(72) Inventor(es):
ANTÓNIO MANUEL GODINHO COMPLETO PT
PAULA ALEXANDRINA DE AGUIAR PEREIRA MARQUES PT

(74) Mandatário:

(54) Epígrafe: **SISTEMA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM LARGA ESCALA DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS ALINHADAS POR ELETROFIAÇÃO**

(57) Resumo:
A PRESENTE INVENÇÃO DIZ RESPEITO A SISTEMA E PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO EM CONTÍNUO PARA PRODUÇÃO DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS POLIMÉRICAS ALINHADAS. O SISTEMA DA PRESENTE INVENÇÃO COMPREENDE UM TUBO CAPILAR DE ELETROFIAÇÃO (3) COM POLARIDADE POSITIVA, UM CONJUNTO DE MULTI-ELÉTRODOS COM POLARIDADE NEGATIVA INSERIDOS NUM SUPORTE PERIFÉRICO (15), TENDO CADA ELÉTRODO (7) MOVIMENTO CONTROLADO PERMITINDO A SUA EXPOSIÇÃO OU RETRAÇÃO-OCULTAÇÃO AO TUBO DE ELETROFIAÇÃO (3), UMA MESA COLETORA CENTRAL (17) DAS FIBRAS ELETROFIADAS, A QUAL É RECOBERTA COM ORIFÍCIOS (6,16) LIGADOS A UMA CÂMARA E A UMA BOMBA DE VÁCUO (13). A FORMAÇÃO DAS MATRIZES TRIDIMENSIONAIS ALINHADAS (30) OCORRE POR DEPOSIÇÃO DE CAMADAS, AO EXPOR OS ELÉTRODOS (7) EXPOSTOS AO TUBO CAPILAR (3), COM O DISTANCIAMENTO CONTROLADO DA MESA COLETORA CENTRAL (17), RELATIVAMENTE AO TUBO DE ELETROFIAÇÃO (3). A PRESENTE INVENÇÃO TEM APLICAÇÃO NA ÁREA MÉDICA, NA ENGENHARIA DE TECIDOS, EM PARTICULAR NA MEDICINA REGENERATIVA.

RESUMO

SISTEMA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM LARGA ESCALA DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS ALINHADAS POR ELETROFIAÇÃO

A presente invenção diz respeito a sistema e processo de eletrofiação em contínuo para produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

O sistema da presente invenção compreende um tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva, um conjunto de multi-elétrodos com polaridade negativa inseridos num suporte periférico (15), tendo cada elétrodo (7) movimento controlado permitindo a sua exposição ou retração-ocultação ao tubo de eletrofiação (3), uma mesa coletora central (17) das fibras eletrofiadas, a qual é recoberta com orifícios (6,16) ligados a uma câmara e a uma bomba de vácuo (13).

A formação das matrizes tridimensionais alinhadas (30) ocorre por deposição de camadas, ao expor os elétrodos (7) expostos ao tubo capilar (3), com o distanciamento controlado da mesa coletora central (17), relativamente ao tubo de eletrofiação (3).

A presente invenção tem aplicação na área médica, na engenharia de tecidos, em particular na medicina regenerativa.

RESUMO

SISTEMA E PROCESSO DE FABRICAÇÃO EM LARGA ESCALA DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS ALINHADAS POR ELETROFIAÇÃO

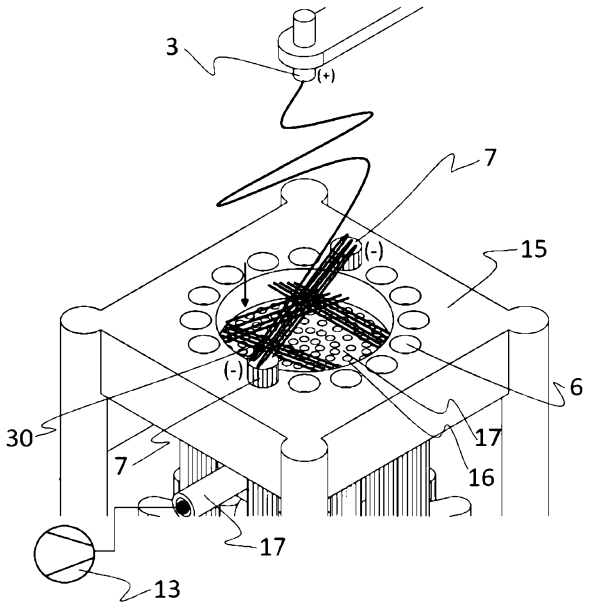
A presente invenção diz respeito a sistema e processo de eletrofiação em contínuo para produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

O sistema da presente invenção compreende um tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva, um conjunto de multi-elétrodos com polaridade negativa inseridos num suporte periférico (15), tendo cada elétrodo (7) movimento controlado permitindo a sua exposição ou retração-ocultação ao tubo de eletrofiação (3), uma mesa coletora central (17) das fibras eletrofiadas, a qual é recoberta com orifícios (6,16) ligados a uma câmara e a uma bomba de vácuo (13).

A formação das matrizes tridimensionais alinhadas (30) ocorre por deposição de camadas, ao expor os elétrodos (7) expostos ao tubo capilar (3), com o distanciamento controlado da mesa coletora central (17), relativamente ao tubo de eletrofiação (3).

A presente invenção tem aplicação na área médica, na engenharia de tecidos, em particular na medicina regenerativa.

FIGURA PARA PUBLICAÇÃO



DESCRIÇÃO

SISTEMA DE FABRICAÇÃO EM LARGA ESCALA DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS ALINHADAS POR ELETROFIAÇÃO

Domínio técnico da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e processo de eletrofiação, em contínuo, para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

A partir da aplicação da invenção é possível obter-se matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas.

Desta forma, a presente invenção tem aplicação em áreas variadas, na fabricação de produtos ou estruturas, à escala nanométrica, que dependem da área de superfície elevada, como por exemplo em biotecnologia, na área farmacêutica, em investigação, área de engenharia de tecidos e em medicina, em particular na medicina regenerativa, como por exemplo, na terapia celular, na produção de tecido cartilaginoso e relacionados, em especial para substituição e fortalecimento de articulações.

Estado da arte

Dentre os principais temas de interesse no processamento de materiais poliméricos está a produção de estruturas poliméricas micro ou nanoestruturadas, em especial nanofibras ou nanofios. As propriedades únicas dos nanomateriais associadas às diferentes possibilidades de morfologias e funcionalidades descortinam uma série de possibilidades de novas aplicações e impulsionam o avanço no processamento destas nanoestruturas.

Neste aspeto, o método de fiação eletrostática ou eletrofiação mostra-se muito vantajoso, uma vez que as fibras obtidas através desta técnica exibem elevada área superficial, aliada a um baixo custo de produção e possibilidade de serem formadas a partir de uma grande variedade de polímeros ou compósitos. Esta técnica baseia-se na aplicação de campos elétricos de alta tensão (5-50 KV) e baixa corrente (0,5-1 μA) para a produção fibras de diâmetros muito reduzidos. Neste processo as forças eletroestáticas controlam a formação e deposição destas fibras.

O documento US2349950A descreve um arranjo experimental básico, em que o diagrama proposto já apresenta uma configuração formada por numa fonte de alta tensão, solução polimérica e um sistema de aterramento.

Atualmente, a configuração fundamental de um processo genérico de eletrodeposição consiste numa seringa, onde é introduzida o polímero fundido ou solução polimérica, que é conectada a um tubo capilar, uma bomba difusora, a qual controla o caudal da solução polimérica a ser fornecido, de

modo a que seja mantido sempre uma gota de solução na ponta do tubo capilar, um coletor metálico, mantido a potencial zero (aterrado), onde serão recolhidas as fibras produzidas, uma fonte de alta tensão, responsável por produzir uma diferença de potencial entre a ponta do tubo capilar e o coletor. Com a aplicação do campo elétrico entre o tubo capilar e o coletor a gota de solução fica sujeita a orientação de cargas na sua superfície.
Conforme a intensidade do campo aumenta, o balanço das cargas eletrostáticas ao qual a gota está sujeita, nomeadamente a força de tensão superficial da solução e a força exercida pelo campo elétrico aplicado, começa a sofrer um desequilíbrio e, a partir de um determinado valor crítico de campo elétrico, é projetado um jato de material polimérico do tubo capilar e acelerado em direção ao coletor.

Durante a trajetória até o coletor, o jato com a solução polimérica sofre evaporação de grande parte do seu solvente, garantindo assim que as fibras formadas tenham rigidez suficiente para suportarem o próprio peso. Para além disso, o solvente que permanece na solução, como humidade, permite a adesão de umas fibras às outras, à medida que são depositadas em camadas, formando uma teia não tecida. Nesta configuração básica as fibras eletrofiadas formam uma manta ou tecido bidimensional, com orientação aleatória, devido a instabilidade da trajetória do jato.

O interesse no processo de eletrofiação tem crescido muito rapidamente desde a década de 1990. Esforços multidisciplinares, tanto na área da investigação académica quanto orientados para aplicações específicas, têm gerado um enorme número de publicações científicas, submissões de patentes e um aumento significativo da exploração da técnica

por parte das empresas de produtos de filtragem, medicina regenerativa, vestuário de proteção, catálise, entre outras.

As redes de fibras orientadas apresentam possibilidade de desenvolvimento de propriedades anisotrópicas nos materiais. Estas relações são bastante óbvias no campo da engenharia dos tecidos.

Exemplos típicos incluem produção de malhas poliméricas, contendo fibras alinhadas, utilizadas como substratos para cultura e regeneração de células neurais, devido a natureza inerentemente anisotrópica dos nervos e seus mecanismos de regeneração. Nestas aplicações de bioengenharia é requisito fundamental que o material de "*scaffold*" tenha uma estrutura tridimensional de porosidade controlada, para que seja possível o desenvolvimento da construção celular tridimensional em toda a profundidade da matriz.

Muitos dos esforços têm-se concentrado na produção de fibras alinhadas e com padronização controlada, devido ao seu excecional potencial para elaboração de dispositivos funcionais, como por exemplo os apresentados nos documentos US20120009292A1, US20110142806A1 e US2016004706A1.

Têm sido sugeridas várias abordagens para promover o alinhamento das mantas de fibras eletrofiadas, de entre as quais o processo de "*air gap electrospinning*", que prevê a configuração de elétrodos paralelos espaçados, com as fibras estiradas no espaçamento entre as placas, tem sido o método mais utilizado para depositar e coletar estas fibras.

A publicação de um trabalho pioneiro de Dan Li e colaboradores (Li, et al., Nanoletters, 2003, 3:8, 1167)

mostrou que dois efeitos favoreciam a produção e deposição de nanofibras bem alinhadas entre o espaço dos elétrodos dispostos em paralelo, nomeadamente o efeito do direcionamento de deposição das nanofibras, causada pela deformação do campo elétrico entre o tubo capilar e o coletor, e a acumulação das cargas ao longo das nanofibras depositadas, que favorece o arranjo paralelo entre elas, devido a repulsão eletrostática.

Uma variação interessante desse sistema de montagem é o coletor para produção de matrizes de fibras, cujo sistema compreende elétrodos dispostos num plano separados por 90°. O funcionamento baseia-se na ligação do terminal terra aos elétrodos dispostos na mesma linha. As fibras eletrofiadas são coletadas entre os elétrodos, que estão ligados à terra, e esta ligação é alternada entre os pares de elétrodos com intervalos de tempos definidos, permitindo a formação de uma malha com camadas de fibras com diferentes arranjos (Li, et al., Adv. Matter, 2004, 16:4, 361).

Neste sentido, o documento US20110018174A1 divulga a produção de fibras eletrofiadas alinhadas, com controlo de localização e orientação das fibras, sendo, para este efeito, utilizado um dispositivo que fornece uma voltagem em função do tempo selecionado, em que essa voltagem é aplicada a um coletor com múltiplos elétrodos. No entanto, o referido documento não divulga um processo com a capacidade de formar uma matriz tridimensional de fibras alinhadas com qualquer espessura desejada.

Outras estratégias para a formação de matrizes tridimensionais de fibras alinhadas têm sido objeto de estudos, principalmente no campo da medicina regenerativa,

como, por exemplo os artigos: Sheikh, et.al., Nanomedicine,2015, 11, e Li, et.al., Mater. Sci. Eng. C.,2016,68.

Neste sentido também o documento US 8580181B1 divulga um método para a formação de matrizes tridimensionais de nanofibras alinhadas com uma estrutura aberta e solta.

Embora as configurações acima descritas contemplem a formação de múltiplas camadas de fibras alinhadas umas sobre as outras, no espaço entre os elétrodos, ainda se verifica a existência de alguns problemas com a formação de matrizes tridimensionais. As limitações dos processos atuais de eletrofiação de fibras alinhadas relacionam-se, sobretudo com o facto de que, à medida que as fibras alinhadas e carregadas eletricamente são depositadas umas sobre as outras, a carga elétrica crescente tende a repelir as novas fibras de serem depositadas, impedindo o seu correto alinhamento e limitando a sua espessura a poucos décimos de milímetro da matriz de fibras formada.

Para determinadas aplicações, como exemplo a engenharia de tecidos, é necessária a formação de matrizes de fibras com elevada espessura, na ordem de vários milímetros, com controlo do alinhamento das fibras ao longo da espessura, e com a possibilidade de se controlar o grau de compactação (porosidade) entre as camadas fibras alinhadas depositadas.

Desta forma, existe a necessidade de se desenvolver e implementar um processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que permita produzir diversos padrões de alinhamento das fibras, ao longo

da espessura da matriz, formando estruturas tridimensionais com espessuras controlada.

A presente invenção propõe resolver os problemas do estado da técnica, acima descritos, através da implementação de um sistema e processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras, ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas.

Sumário da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e processo de eletrofiação, em contínuo, para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

O sistema da presente invenção compreende um tubo capilar de eletrofiação, um conjunto de multi-elétrodos, em que cada elétrodo apresenta um movimento controlado de exposição ou retração-ocultação em relação ao tubo de eletrofiação, e uma mesa coletora central das fibras eletrofiadas, que compreende orifícios sujeitos a pressão de vácuo, com possibilidade de regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação e os elétrodos em posição de exposição, e com movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar, de acordo com a **reivindicação 1.**

O sistema da presente invenção, através do movimento controlado de exposição ou retração-ocultação dos elétrodos, em relação ao tubo de eletrofiação, com produção de vácuo

controlado aplicado aos orifícios da mesa coletora central, permite segurar as fibras à mesa, assim como obter um determinado grau de compactação (e logo porosidade na direção vertical) necessário a determinadas aplicações das fibras. Para além disso, o movimento controlado de descida da mesa permite a formação das estruturas tridimensionais de fibras alinhadas.

A **formação de matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas ocorre quando, um ou mais pares de elétrodos são expostos ao tubo capilar de eletrofiação, formando-se assim uma camada de fibras alinhadas bidimensional, sobre as quais são depositadas sucessivamente, outras camadas formadas pela exposição de um ou mais pares de elétrodos ao tubo capilar, acompanhado, subsequentemente, pelo movimento controlado de afastamento da mesa coletora central do tubo de eletrofiação, após cada camada de fibras depositada, de acordo com a **reivindicação 3.**

Desta forma, o processo da presente invenção permite a obtenção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas, de acordo com a **reivindicação 13.**

As matrizes produzidas têm **aplicação** em diversas áreas, como na biotecnologia, na área farmacêutica, em investigação, na área de engenharia de tecidos e em medicina, em particular na medicina regenerativa, como por exemplo, na terapia celular e na produção de tecido cartilaginoso e relacionados, em

especial para substituição e fortalecimento articulações, de acordo com a **reivindicação 15**.

Para além disso, o processo da presente invenção, através da utilização do sistema de eletrofiação proposto, tem a vantagem adicional de ser versátil, simples, barato e de funcionar em modo contínuo, não sendo, portanto, necessário produzir séries de camadas com um determinado alinhamento proceder à adição de outras camadas, com diferente alinhamento, para se obter matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas com diversos padrões de alinhamento das fibras e diferentes espessuras.

Breve descrição das figuras

Figura 1: Representação esquemática de uma forma de realização de um sistema de eletrofiação, de acordo com a presente invenção, com dois elétrodos expostos, em que os seguintes números representam:

1 sistema de eletrofiação;
2 fibra eletrofiada;
3 tubo capilar de eletrofiação;
4 ligação de polaridade positiva entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e uma fonte de alimentação (não representada);
5 suporte do tubo capilar de eletrofiação (3), apoiado na base de fixação (8);
6 orifícios do suporte periférico, onde estão inseridos os multi-elétrodos (7,14);
7 elétrodo em posição de exposição, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade negativa;

8 base de fixação de todo o sistema de eletrofiação (1);
9 unidade de controlo computorizada de todo o sistema de eletrofiação (1);
10 bobine de indução para geração da força eletromagnética para o sistema de eletrofiação (1);
11 íman permanente solidário com um elétrodo (7,14);
12 atuador do movimento linear da mesa coletora central (17);
13 bomba de vácuo com regulação de pressão;
14 elétrodo em posição de retração-ocultação, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
15 suporte periférico da mesa coletora (17), em material isolante;
16 orifícios na superfície da mesa coletora central (17), que ligam à câmara no seu interior (não representada);
17 mesa coletora central; e
18 canal de ligação entre a câmara interior (não representada) da mesa coletora central (17) e a bomba de vácuo (13).

Figura 2: Representação esquemática de uma secção longitudinal do sistema de eletrofiação (1), de acordo com uma forma de realização preferencial da presente invenção, em que:

- A fibra eletrofiada (2) encontra-se entre os dois elétrodos expostos com polaridade negativa (7) e a mesa coletora (17) com a sua superfície (19) recoberta com os orifícios (16) ligados à câmara (21) no seu interior, que é sujeita a pressão de vácuo, na posição mais próxima do tubo capilar de eletrofiação (3);

- Dois elétrodos encontram-se em posição de exposição (7) na superfície (20) do suporte periférico (15), um elétrodo encontra-se em posição de ocultação (14);
- o atuador (12) do movimento linear (24) da mesa coletora (17),
- os sentidos as forças eletromagnéticas de atração (23) e repulsão (22) geradas entre a extremidade dos elétrodos (7)(14) com íman permanente (11) e as bobines eletromagnéticas (10);

Figura 3: Representação esquemática de uma secção longitudinal do sistema de eletrofiação (1), de acordo com uma forma de realização preferencial da presente invenção, em que:
- a fibra eletrofiada (2) encontra-se depositada entre os dois elétrodos expostos (7) e a mesa coletora central (17), recoberta com os orifícios (16), ligados à câmara (21), no seu interior, numa posição mais afastada do tubo capilar de eletrofiação (3);
- o sentido da força de sucção (25), de fixação-compactação das diferentes camadas de fibras (27) (28) (29), gerada pelo efeito da pressão de vácuo presente na câmara (21), e a espessura (26) da matriz de fibras formada após a deposição de diferentes camadas (27) (28) (29) de fibras alinhadas.

Figura 4: Representação esquemática de uma das formas de realização do processo de eletrofiação da invenção, em que:
- uma primeira camada de fibras alinhadas (30) se encontra entre dois elétrodos expostos (7), com polaridade negativa, pertencentes ao conjunto de multi-elétrodos, os quais se encontram em posição oculta nos orifícios (6) do suporte periférico (15), com a mesa coletora central (17) na

posição de funcionamento mais próxima do tubo capilar de eletrofiação (3);
- a mesa coletora central (17) por intermédio da sua câmara (21) ligada.

Figura 5: Representação esquemática das fibras alinhadas da primeira camada (30) fixas à superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da superfície (19) da mesa coletora central (17), por efeito do vácuo presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (32) do atuador (12), e **é seguida pela deposição da segunda camada de fibras alinhadas** (31), entre os dois elétrodos expostos (7) e pelo movimento de afastamento da mesa (32).

Figura 6: Representação esquemática das fibras alinhadas da primeira camada (30) e segunda camada (31) fixas na superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da superfície (19) da mesa coletora central (17), pelo efeito do vácuo presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12), e é **seguida pela deposição da terceira camada de fibras alinhadas (31)**, entre os dois elétrodos expostos (7).

Figura 7: Representação esquemática das fibras alinhadas da **primeira camada (30)**, **segunda camada (31)** e **terceira camada (32)**, fixas na superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da

superfície (19) da mesa coletora central (17), pelo efeito da pressão de vácuo, presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (36) do atuador (12), e é seguida pela **deposição da quarta camada de fibras alinhadas (35)** entre os dois elétrodos expostos (7);

Figura 8: Representação esquemática da vista superior da mesa coletora central (17) e suporte periférico de elétrodos (15) **com a representação de nove alinhamentos de fibras** (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309), **depositados de forma sequencial em camadas**, sendo o alinhamento (301) obtido pela exposição dos elétrodos (702) e (710), o alinhamento (302) obtido pela exposição dos elétrodos (702) e (705), o alinhamento (303) obtido pela exposição dos elétrodos (701) e (706), o alinhamento (304) obtido pela exposição dos elétrodos (701) e (706), o alinhamento (305) obtido pela exposição dos elétrodos (708) e (702), o alinhamento (306) obtido pela exposição dos elétrodos (706) e (711), o alinhamento (307) obtido pela exposição dos elétrodos (710) e (707), o alinhamento (308) obtido pela exposição dos elétrodos (709) e (702), o alinhamento (309) obtido pela exposição dos elétrodos (710) e (703), em que o conjunto destas nove camadas forma um padrão de alinhamentos (200), o qual é repetido sucessivas vezes, entre o primeiro (203), intermédios (205) e último (206) padrão, resultando assim na espessura (26) da matriz tridimensional, que é delimitado por as dimensões (202) e (201).

Descrição da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e a um processo de eletrofiação em contínuo para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, em particular para engenharia de tecidos, com possibilidade de produzir diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz formando estruturas tridimensionais com espessuras controlada.

O sistema da presente invenção compreende um módulo de formação de fibras, que pode ser constituído basicamente por uma seringa para conter uma solução polimérica, conectada a uma bomba injetora, ligada a um tubo capilar de eletrofiação, que está ligado a uma fonte de tensão, configurada para fornecer polaridade positiva, estando o referido módulo alinhado longitudinalmente com o suporte periférico em material isolante em onde se encontram inseridos longitudinalmente em orifícios na sua superfície multi-elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento individual controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação comtemplando duas posições, uma de exposição e outra de retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, assim como a possibilidade de ativação seletiva das polaridades negativas dos referidos elétrodos, quando estes elétrodos estão na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, o alinhamento e distribuição deste elétrodos no suporte periférico delimitam a área e forma da mesa coletora central de fibras.

A fibra de material polimérico, formada por eletrofiação a partir do tubo capilar com polaridade positiva, desloca-se por ação de um campo elétrico em direção a um módulo coletor, que é constituído por um suporte periférico em material isolante onde se encontram inseridos longitudinalmente multi-

elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação permitindo a sua exposição ou retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, uma mesa coletora central delimitada pelo suporte periférico dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios que se estendem desde a sua superfície superior até uma câmara no seu interior estando esta câmara ligada uma bomba de vácuo com controlo de pressão, esta mesa coletora central possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar permitindo o seu afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação.

O suporte periférico dos multi-elétrodos e a mesa coletora central são montados sobre uma plataforma fixa onde se apoia o suporte, de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação permitindo a regulação da distância entre o tubo capilar de eletrofiação e os multi-elétrodos.

O movimento de exposição e retração-ocultação dos elétrodos inseridos em orifícios no suporte periférico ao tubo capilar de eletrofiação resulta de uma força eletromagnética controlada que se desenvolve na extremidade do elétrodo oposta a superfície superior do suporte periférico por ação do fluxo magnético entre um íman permanente solidário com o elétrodo e uma bobine de indução fixa na região inferior do suporte periférico.

O depósito e alinhamento do fluxo de fibras é realizado quando um ou mais pares de elétrodos são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, e as suas respetivas polaridades negativas são ativadas, de acordo

com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim uma camada de fibras bidimensional alinhadas.

O movimento de retração-ocultação do elétrodos, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, para o interior do seu orifício no suporte periférico dos multi-elétrodos permite o apoio-deposito das fibras sobre a mesa coletora central seguida da separação das fibras da extremidade do elétrodo.

O movimento controlado de afastamento da superfície superior da mesa coletora central do tubo capilar de eletrofiação, após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada, permite a acumulação de sucessivas camadas de fibras sobre a mesa coletora central permitindo assim a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras em que a sua espessura está dependente do número de camadas de fibras bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema de vácuo.

As sucessivas camadas bidimensionais de fibras depositadas no módulo coletor, de acordo com o referido processo de eletrofiação, são mantidas em posição na mesa coletora central, entre os multi-elétrodos, por ação do vácuo gerado nos orifícios da superfície superior da mesa coletora central que comunicam com uma câmara no seu interior conectada à bomba de vácuo.

O controlo da pressão na bomba de vácuo tem igualmente o propósito de controlar o grau de compactação entre as camadas de fibras bidimensionais formadas e logo a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

O controlo da distância entre o tubo capilar de eletrofiação com polaridade positiva e o módulo coletor, o controlo dos movimentos de exposição e retração-ocultação dos elétrodos com polaridade negativa relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, o controlo do movimento da superfície superior da mesa coletora central em referência ao tubo capilar de eletrofiação, o controlo da polaridade negativa aplicada aos multi-elétrodos e o controlo da pressão da bomba de vácuo são efetuados por uma unidade de controlo computorizada que em função do alinhamento de fibras desejado para cada camada bidimensional depositada e da espessura da matriz pretendia programa a sequência de todos os movimentos, pressão de vácuo e polaridade dos elétrodos necessários com base num programa computacional desenvolvido para o efeito.

A presente invenção possui a capacidade de formar matrizes de fibras alinhadas de qualquer espessura em contínuo e com e qualquer padrão de alinhamento ao longo dessa espessura, pelo facto de combinar diferentes particularidades técnicas, entre elas se destacam a utilização de multi-elétrodos distribuídos espacialmente com a possibilidade de movimentos individuais e controlados de exposição e retração-ocultação ao tubo capilar de eletrofiação, permitindo assim a possibilidade de controlo do alinhamento das fibras depositadas, o apoio e depósito das fibras sobre a mesa coletora central e a separação das fibras das extremidades dos elétrodos aquando do movimento de retração, sendo a superfície da mesa coletora provida orifícios sujeitos a pressão de vácuo, que por um lado permitem a fixação das fibras à mesa e também permite o controlo do grau de compactação (porosidade) entre as diferentes camadas de fibras depositadas, estando esta capacidade associada também ao movimento de afastamento da

mesa coletora relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, permitindo assim a deposição sucessiva de camadas de fibras alinhadas até a espessura desejada.

1. Sistema de eletrofiação para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas

O sistema da presente invenção compreende, de uma forma genérica:

- um **módulo de formação de fibras**, que compreende um recipiente para contenção e fornecimento polímero fundido ou solução polimérica, tipicamente uma seringa, e uma bomba injetora, ligada a um tubo capilar de eletrofiação, ligado a uma fonte de tensão, configurada para fornecer polaridade positiva;
- um **conjunto multi-elétrodos**, que compreende vários elétrodos com polaridade negativa;
- um **módulo coletor**, para recolha das fibras produzidas;
- uma fonte de alimentação do sistema de eletrofiação; e
- uma bomba de vácuo.

Para além dos referidos elementos, o sistema da presente invenção compreende ainda um íman permanente, solidário com cada um dos elétrodos, para gerar as forças de atração e repulsão entre as extremidades dos elétrodos e as bobines eletromagnéticas, também presentes no sistema, uma unidade de controlo computorizada e a eletrónica necessária ao seu adequado funcionamento, atuadores, nomeadamente o atuador do movimento linear da mesa coletora central, bem como toda a cabelagem elétrica para distribuição de energia aos vários componentes do sistema.

De uma forma mais particular, o sistema (1) da presente invenção compreende:

- um módulo de formação de fibras com um **tubo capilar de eletrofiação** (3);
- um **conjunto multi-elétrodos**;
- um **módulo coletor**, para recolha das fibras produzidas;
- uma bomba de vácuo (13) para regulação de pressão;

Em que:

a) **O conjunto multi-elétrodos**, o qual se encontra inserido num suporte periférico (15), compreende:

(i) vários elétrodos (7) (14), sendo cada um dotado de movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3);

(ii) vários imanes (11), estando cada um destes imanes solidário com um elétrodo (7,14), para geração de força eletromagnética (22, 23), em conjunto com a bobine de indução (10), controlada pela unidade computorizada (9);

b) O **módulo coletor** compreende:

(i) um suporte periférico (15), onde se encontram inseridos, longitudinalmente, em orifícios (6) na sua superfície (20), os elétrodos (7) (14), estando o referido suporte (15) montado sobre uma plataforma fixa (8), onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3), para regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);

(ii) uma mesa coletora central (17), delimitada pelo referido suporte periférico (15), definindo uma região de acumulação das fibras eletrofiadas, e que ainda apresenta orifícios (16), que se estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21);

(iii) uma câmara (21), que se encontra no interior da mesa central (17), estando esta câmara ligada, por um canal (18), a uma bomba de vácuo (13);

em que:

- cada um dos elétrodos é capaz de estar independentemente exposto (7) ou retraído/ocultado (14), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
- a bomba de vácuo (13) exerce uma pressão de vácuo controlado sobre os orifícios (16); e
- a mesa coletora central (17), apresenta movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar (3), permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

O **sistema de eletrofiação (1)** compreendendo a fibra (2) de material polimérico formada por eletrofiação a partir do tubo capilar (3) com polaridade positiva desloca-se por ação de um campo elétrico em direção a um módulo coletor, que é constituído por um suporte periférico (15) em material isolante onde se encontram inseridos longitudinalmente em orifícios (6) na sua superfície (20) multi-elétrodos (7) (14) sendo cada elétrodo (7) (14) dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3) permitindo a sua exposição (7) ou retração-ocultação (14) relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), uma mesa coletora central (17) delimitada pelo suporte periférico (15) dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios (16) que se

estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21) no seu interior estando esta câmara ligada por um canal (18) a uma bomba de vácuo (13) com controlo de pressão, esta mesa coletora central (17) possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar (3) permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

Numa forma de realização, o presente sistema e processo de eletrofiação em contínuo é constituído pelo suporte periférico (15) dos multi-elétrodos montado sobre uma plataforma fixa (8) onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3) permitindo a regulação da distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7) ao tubo capilar de eletrofiação (3).

Numa forma de realização, o movimento de exposição (22) e retração-ocultação (23) dos elétrodos (7) e (14) inseridos em orifícios (6) do suporte periférico (15) ao tubo capilar de eletrofiação (3) resulta de uma força eletromagnética (22) (23) controlada pela unidade de controlo computorizada (9) que se desenvolve na extremidade do elétrodo (7) (14) oposta a superfície superior (20) do suporte periférico (15) por ação do fluxo magnético entre um íman permanente (11) solidário com o elétrodo (7) (14) e uma bobine de indução (10) posicionada na região inferior do suporte periférico (15).

Numa forma de realização, o depósito e alinhamento do fluxo de fibras (2) é realizado quando um ou mais pares de elétrodos (7) são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), e as suas respetivas

polaridades negativas são ativadas pela unidade de controlo computorizada (8), de acordo com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim camadas sucessivas de fibras bidimensional alinhadas (27)(28)(29)(30)(31)(34)(35).

Numa forma de realização, o movimento de retração-ocultação do elétrodos (23), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3) para o interior do seu orifício (6) no suporte periférico (15) permite o apoio-deposito das fibras (27) (28) (29)(30)(31)(33)(35) sobre a superfície (19) mesa coletora central (17) seguida da separação-libertação das fibras da extremidade dos elétrodos (7).

O movimento (24)(32)(33)(36)controlado de afastamento da superfície (19) da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35), permite a acumulação de sucessivas camadas de fibras (27)(28) (29)(30)(31)(33)(35) sobre a mesa coletora central (17) permitindo assim a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras (207) em que a sua espessura (26) está dependente do número de camadas de fibras (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35)bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema de vácuo (13).

As sucessivas camadas bidimensionais de fibras depositadas (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35) na mesa coletora central (17) são mantidas em posição na mesa coletora central (17) por ação de uma força de sucção (25) gerada pela pressão de vácuo nos orifícios da superfície (19)da mesa coletora central (17) que comunicam com uma câmara (21) no seu interior conectada por um canal (18) à bomba de vácuo (13).

O controlo da pressão na bomba de vácuo (13) tem igualmente o propósito de controlar a forças de sucção (25) sobre as fibras e o grau de compactação entre as camadas de fibras (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35) bidimensionais formadas e logo a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

O controlo da distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva através do seu suporte (5) e os multi-eletródos expostos (7) com carga negativa, o controlo dos movimentos de exposição (22) e retração-ocultação (23) dos elétrodos (7) com polaridade negativa relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), o controlo do movimento da superfície (19) da mesa coletora central (17), em referência ao tubo capilar de eletrofiação (3), o controlo da polaridade negativa aplicada aos elétrodos (7) e o controlo da pressão da bomba de vácuo (13) são efetuados por uma unidade de controlo computorizada (8) que em função do alinhamento (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308)(309) de fibras desejado para cada camada bidimensional depositada (27)(28)(29) (30) (31)(33)(35) e da espessura (26) da matriz pretendia programa a sequência de todos os movimentos, pressão de vácuo e polaridade dos elétrodos necessários com base num programa computacional desenvolvido para o efeito.

2. Processo de obtenção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas

O processo da presente invenção realiza-se em várias etapas com utilização do sistema de eletrofiação (1), tal como descrito na secção anterior.

A produção de matrizes tridimensionais de fibras (2) poliméricas alinhadas ocorre quando um ou mais pares de elétrodos (7,14) são expostos ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, formando-se assim uma camada bidimensional de fibras alinhadas, as quais são mantidas em posição adequada, na mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos, por ação da força de sucção gerada pela pressão do vácuo nos seus orifícios.

O movimento controlado de afastamento da mesa coletora central (17) do tubo de eletrofiação (3), após cada camada de fibras depositada, permite a acumulação de sucessivas camadas e a formação de uma matriz tridimensional com espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas está controlado pela pressão vácuo.

Desta forma, o processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas da presente invenção compreende os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma primeira camada de fibras alinhadas (30);
b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);

d) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma segunda camada (31) de fibras alinhadas;
e) aplicação de pressão de vácuo à camada (31) de fibras alinhadas, obtida em (d), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14).

A produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, com mais de duas camadas, é realizada pela repetição dos passos (a), (b) e (c), tantas vezes quanto o número de camadas desejadas, ao processo tal como acima descrito.

Desta forma, para se obter uma matriz com três camadas, o processo da presente invenção compreende os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma primeira camada de fibras alinhadas (30);
b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);
d) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma segunda camada (31) de fibras alinhadas;

e) aplicação de pressão de vácuo à camada (32) de fibras alinhadas, obtida em (d), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
f) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma terceira camada (33) de fibras alinhadas;
g) aplicação de pressão de vácuo à camada (33) de fibras alinhadas, obtida em (f), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14).

Para obtenção de matrizes com camadas múltiplas e padrões de alinhamento utiliza-se um ou mais pares de elétrodos que são expostos (7) ao tubo capilar (3), contendo uma determinada solução polimérica, em que a composição e a concentração do polímero em solução, bem como os solventes usados, variam em função do fim a que a matriz se destina.

Aos elétrodos, localizados em orifícios superficiais (16) e distribuídos radialmente em torno da mesa de coletora central (17), com uma determinada área, é aplicada uma determinada voltagem negativa, também esta selecionada de acordo com o tipo de fibra e matriz a produzir.

Cada um dos diferentes alinhamentos das camadas bidimensionais de fibras é obtido por a exposição (7) sequencial, de um número de elétrodos selecionados, ao tubo capilar de eletrofiação (3) durante um determinado período, também este selecionado em função do fim a que as fibras e as matrizes se destinam.

As várias camadas de fibras bidimensionais depositadas resultam assim da realização de ciclos consecutivos de vários tipos de alinhamento, que é obtido pela combinação das variáveis ou dos fatores de produção acima descritos.

É assim possível obter vários alinhamentos de fibras (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) depositados de forma sequencial em camadas, sendo cada um dos alinhamentos obtido pela exposição (7) de diferentes elétrodos ao tubo capilar de fiação (3).

O conjunto de diferentes camadas, alinhadas de maneira distinta, forma um padrão de alinhamentos (200), o qual é repetido sucessivas vezes entre o primeiro (203), intermédios (205) e último (206) padrão, resultando assim a espessura (26) da matriz tridimensional, que é delimitada pelas dimensões (202) e (201) da mesa coletora central (17).

O processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas decorre em contínuo pela realização sucessiva dos vários passos para a formação camadas bidimensionais de fibras poliméricas, de acordo com o acima descrito.

3. Caracterização das matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas,

A espessura das matrizes obtidas varia assim, não apenas em função do tipo e quantidade de polímero usado, mas também em função do número de camadas de fibras depositadas, da espessura dessas fibras e do grau de compactação entre camadas, sendo cada um destes aspetos, controlados pela

pressão vácuo exercido nas camadas de fibras depositadas na mesa coletora central.

Por outro lado, o alinhamento das fibras de cada camada é controlado pelos diferentes movimentos e número de elétrodos expostos e/ou ocultos em cada ciclo de formação de fibras.

Em conclusão, através da implementação do sistema e do processo da presente invenção é possível obter matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, as quais podem apresentar diversos padrões de alinhamento, ao longo da espessura da matriz podendo ser esta espessura também variável.

Exemplo: Produção de uma matriz polimérica de fibras alinhadas

O presente exemplo refere-se à produção de uma matriz composta por 27 camadas de fibras poliméricas alinhadas para engenharia de cartilagem, com uma espessura total de 3.24 mm.

O polímero usado para fabricar a matriz foi policaprolactona (PCL) com um peso molecular de 80.000 Da.

O PCL foi dissolvido com concentrações de 12% de diclorometano (DCM) e dimetilformamido (DMF) com um rácio de 1:1 (v:v) após 12 horas em agitação à temperatura ambiente.

Em seguida, procedeu-se à eletrofiação do polímero fundido, com recurso a um tubo capilar (3) com um fluxo de 2.5 mL/h, uma voltagem de 25 kV e uma distância de trabalho de 15 cm relativamente à mesa coletora central (17).

Nesta configuração do sistema de eletrofiação (1), a mesa coletora central (17) possui um diâmetro de 8mm, sendo os orifícios (16) na sua superfície sujeitos a uma pressão de vácuo de 3300 Pa.

Para a formação de cada camada de fibras foram utilizados 11 elétrodos (701), (702), (703), (704), (705), (706), (707), (708), (709), (710) e (711) distribuídos radialmente em torno da mesa (tal como representados na figura 8), tendo cada elétrodo um diâmetro medio de 1.5mm.

Na sua posição de exposição (7) ao tubo capilar de eletrofiação (3) os referidos elétrodos foram sujeitos a uma voltagem negativa de -3kV.

Cada um dos diferentes alinhamentos das camadas bidimensionais de fibras foi obtido por a exposição (7) sequencial de pares de elétrodos ao tubo capilar de eletrofiação (3) durante 2,3 min.

As 27 camadas de fibras bidimensionais depositadas resultaram da realização de 3 ciclos consecutivos (3 vezes) de 9 padrões de alinhamento (301), (302), (303), (304), (305), (306), (307), (308) e (309) por esta ordem, sendo:

- o alinhamento (301) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (702) e (710);
- alinhamento (302) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (702) e (705);
- o alinhamento (303) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (701) e (706);
- o alinhamento (304) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (701) e (706);

- o alinhamento (305) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (708) e (702);
- o alinhamento (306) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (706) e (711);
- o alinhamento (307) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (710) e (707);
- o alinhamento (308) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (709) e (702); e
- o alinhamento (309) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (710) e (703).

No final da deposição de cada camada de fibras alinhadas a mesa coletora central (17) afastou-se do tubo capilar de eletrofiação cerca de 0.12 mm, sendo este o valor correspondente à espessura média de cada camada de fibras dimensional depositada.

No total a mesa coletora central afastou-se cerca de 3.24 mm, o correspondente à espessura da matriz obtida no final das 27 camadas depositadas.

A matriz tridimensional de fibras alinhadas obtida neste exemplo exibe, tal como a cartilagem nativa, um alinhamento preferencial das fibras na sua zona superficial paralelo a superfície, na zona intermédia não apresenta qualquer alinhamento preferencial, e na zona mais profunda as fibras estão alinhadas de uma forma verticalizada relativamente à superfície.

Lisboa, 11 de dezembro de 2019.

REIVINDICAÇÕES

1. **Um sistema de electrofiação** (1) que compreende (a) um módulo de formação de fibras, (b) um conjunto multi-elétrodos, (c) um módulo coletor, para recolha das fibras depositadas, uma fonte de alimentação, uma bomba de vácuo (13), **caracterizado por:**

   a) O módulo de formação de fibras compreender, um tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva;

   b) O conjunto multi-elétrodos se encontrar inserido num suporte periférico (15) e compreender:

   - vários elétrodos (7) (14), sendo cada um destes elétrodos dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3);
   - vários imanes (11), estando cada um destes imanes solidário com um elétrodo (7,14), para geração de força eletromagnética (22, 23), em conjunto com a bobine de indução (10), controlada pela unidade computorizada (9);

   c) O módulo coletor compreender:

   - um suporte periférico (15), onde se encontram inseridos, longitudinalmente, em orifícios (6) na sua superfície (20), os elétrodos (7) (14), estando o referido suporte (15) montado sobre uma plataforma fixa (8), onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3), para regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
   - uma mesa coletora central (17), delimitada pelo referido suporte periférico (15), definindo uma região de acumulação das fibras eletrofiadas, e que

ainda apresenta orifícios (16), que se estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21);

- uma câmara (21), que se encontra no interior da mesa central (17), estando esta câmara ligada, por um canal (18), a uma bomba de vácuo (13);

em que:

- cada um dos elétrodos é capaz de estar independentemente exposto (7) ou retraído/ocultado (14), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
- a bomba de vácuo (13) exerce uma pressão de vácuo controlado sobre os orifícios (16); e
- a mesa coletora central (17), apresenta movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar (3), permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

2. **Sistema de electrofiação** (1) de acordo com a reivindicação anterior que compreende unidade de controlo computorizada (9) e programa de computador.

3. **Um processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** compreender os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3) contendo uma solução de um determinado polímero adequado à função da matriz a produzir, sendo essa exposição feita de acordo com a orientação das fibras desejada, por aplicação de uma voltagem negativa aos elétrodos selecionados, durante um determinado tempo, para formação camadas de fibras alinhadas (30);

b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), com o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);

c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);

d) Repetição de ciclos de exposição (7) sequencial de pares de elétrodos ao tubo capilar de eletrofiação (3) de (a), aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas de (b) e afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3) de (c), tantas vezes quanto o necessário para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido;

e) Repetição dos ciclos, tal como o descrito nos passos (a), (b) e (c), tantas vezes quanto o necessário, em que pelo menos, um dos fatores de eletrofiação é modificado em relação aos definidos no passo (a), (b) ou (c), para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido, sendo este alinhamento diferente do obtido no descrito nos passos (a), (b), (c) e (d);

f) Repetição de ciclos de exposição de (e), tantas vezes quanto o necessário, em que, pelo menos, um dos fatores de eletrofiação é modificado em relação aos definidos no ciclo anterior, para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido, sendo este alinhamento diferente do obtido no ciclo anterior

em que:

o movimento controlado de afastamento da mesa coletora central do tubo de eletrofiação após cada camada de

fibras depositada permite a acumulação de sucessivas camadas e a formação de uma matriz tridimensional com espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas é controlado pela pressão vácuo e a pressão de vácuo segura as fibras à mesa.

4. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com a reivindicação anterior, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o suporte periférico possuir um conjunto de multi-elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento individual controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação comtemplando duas posições, uma de exposição e outra de retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação.

5. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 ou 4, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** a mesa coletora central estar delimitada pelo suporte periférico dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios que se estendem desde a sua superfície até uma cavidade no seu interior estando esta cavidade ligada uma bomba de vácuo com controlo de pressão, em que a mesa coletora central possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar permitindo o seu afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação.

6. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 5, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento de exposição e retração-ocultação dos elétrodos inseridos em orifícios no suporte periférico ao tubo capilar de eletrofiação resultar de força eletromagnética controlada que se desenvolve na extremidade do elétrodo oposta a superfície superior do suporte periférico por ação do fluxo magnético entre um íman permanente solidário com o elétrodo e uma bobine de indução posicionada na região inferior do suporte periférico.

7. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 6, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o depósito e alinhamento do fluxo de fibras ser realizado quando um ou mais pares de elétrodos são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, e as suas respetivas polaridades negativas são ativadas, de acordo com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim uma camada de fibras bidimensional alinhadas.

8. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 7, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento de retração-ocultação dos elétrodos, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, para o interior do seu orifício no suporte

periférico apoiar e depositar as fibras sobre a mesa coletora central seguida da separação das fibras das extremidades dos elétrodos.

9. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 8, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento controlado de afastamento da superfície da mesa coletora central do tubo capilar de eletrofiação, após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada, acumular sucessivas camadas de fibras sobre a mesa coletora central para a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras em que a sua espessura está dependente do número de camadas de fibras bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema e pressão de vácuo.

10. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 9, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** as sucessivas camadas de fibras depositadas no módulo coletor serem mantidas em posição na mesa coletora central, por ação da força de sucção gerado nos orifícios da superfície da mesa coletora central por ação da pressão de vácuo gerada na câmara interior da mesa coletora central que comunicam com a bomba de vácuo.

11. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 10, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o controlo da pressão na bomba de vácuo controlar o grau de compactação entre as camadas de fibras bidimensionais formadas e a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

12. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 11, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** os parâmetros serem controlados por unidade de controlo computorizada (9) e os movimentos dos elétrodos serem controlados por programa de computador.

13. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas **caracterizadas por** apresentarem 27 camadas de fibras poliméricas bidimensionais, com 9 padrões de alinhamento (301), (302), (303), (304), (305), (306), (307), (308) e (309), com uma espessura total de 3,24 mm.

14. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação anterior, **caracterizadas por** apresentarem um alinhamento preferencial das fibras, (i) em paralelo na sua zona superficial, (ii) não apresentarem qualquer alinhamento preferencial na zona intermédia, e (iii) na zona mais profunda as fibras estarem alinhadas de uma forma verticalizada relativamente à superfície.

15. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com o descrito em qualquer uma das reivindicações 13 ou 14, **caracterizadas por** serem aplicadas em medicina.

16. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação 15, caracterizadas por serem aplicadas em medicina regenerativa.

17. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação 15, caracterizadas por serem aplicadas na engenharia de cartilagem.

Lisboa, 11 de dezembro de 2019.

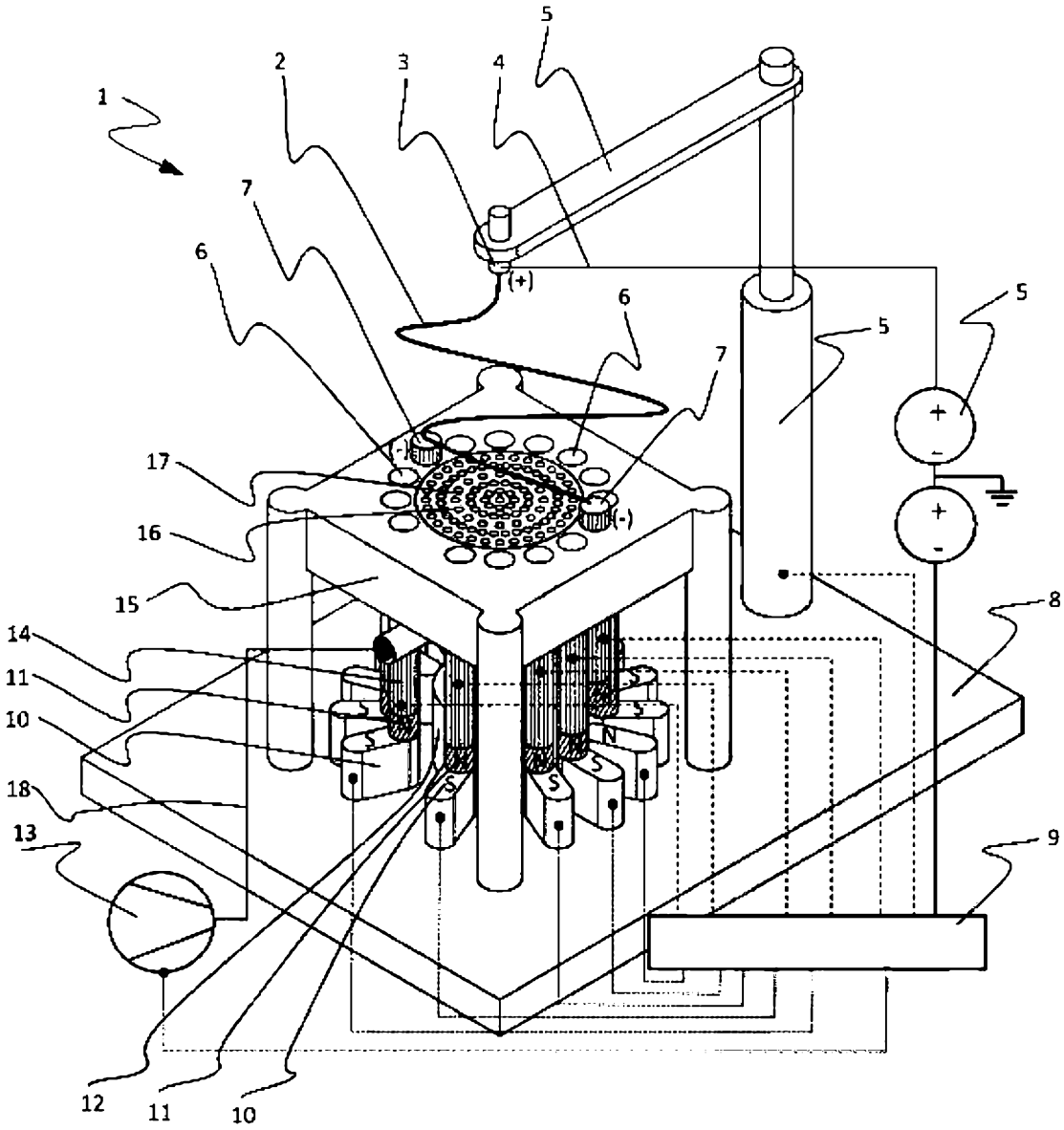


Fig. 1

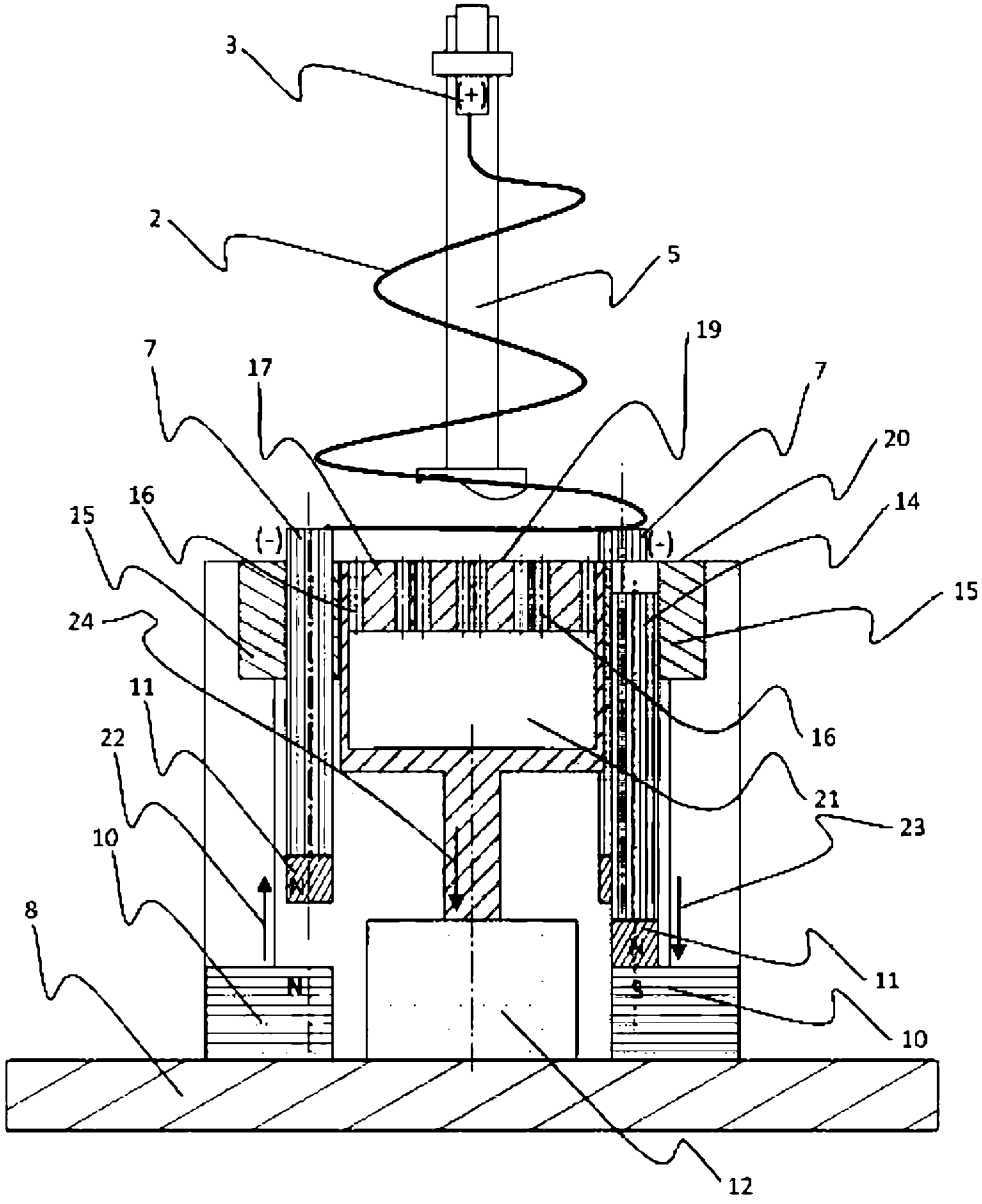


Fig. 2

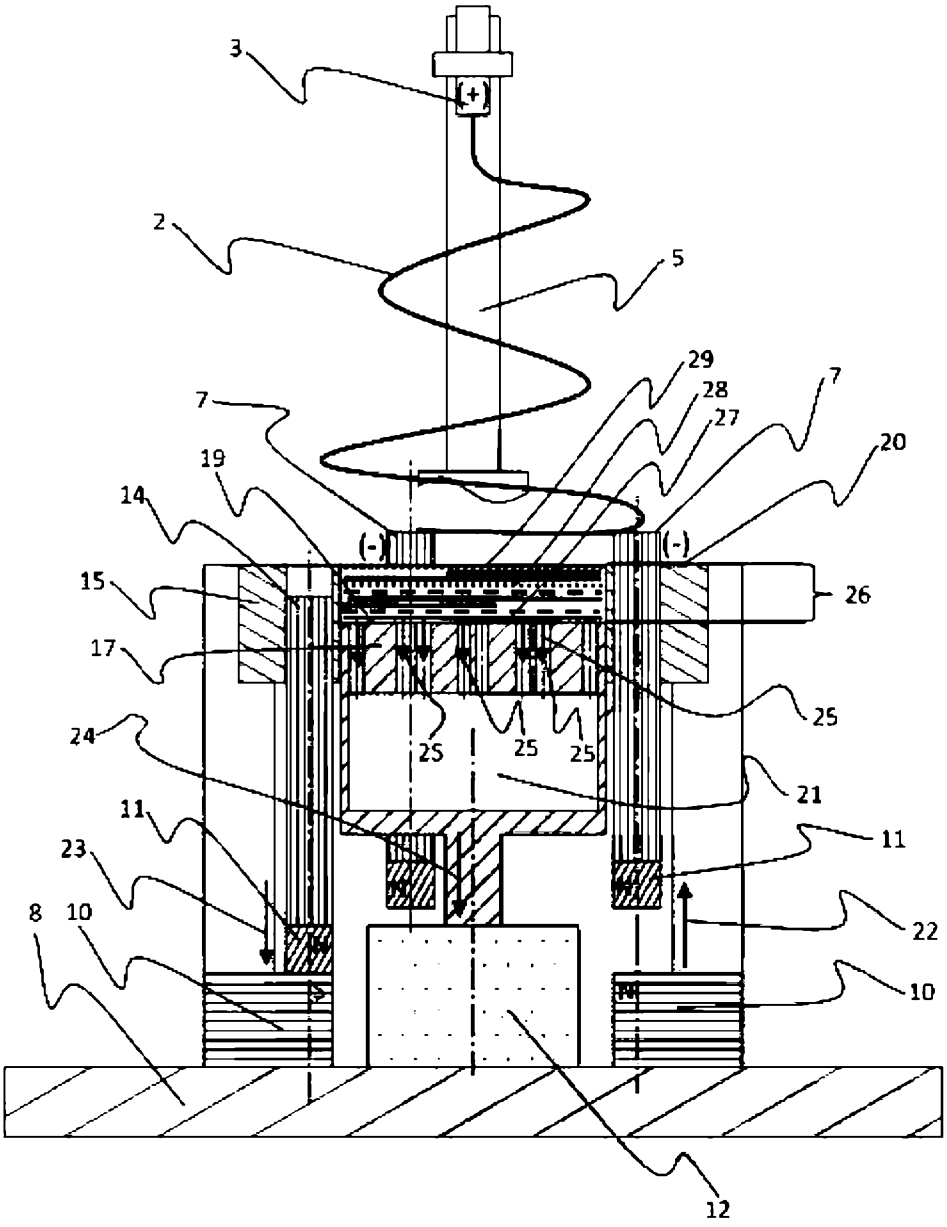

3
(+)
2
5
29
28
27
7
7
20
19
14
(-)
(-)
15
26
17
25
24
25
25
25
21
11
11
23
22
8
10
10
12

Fig. 3

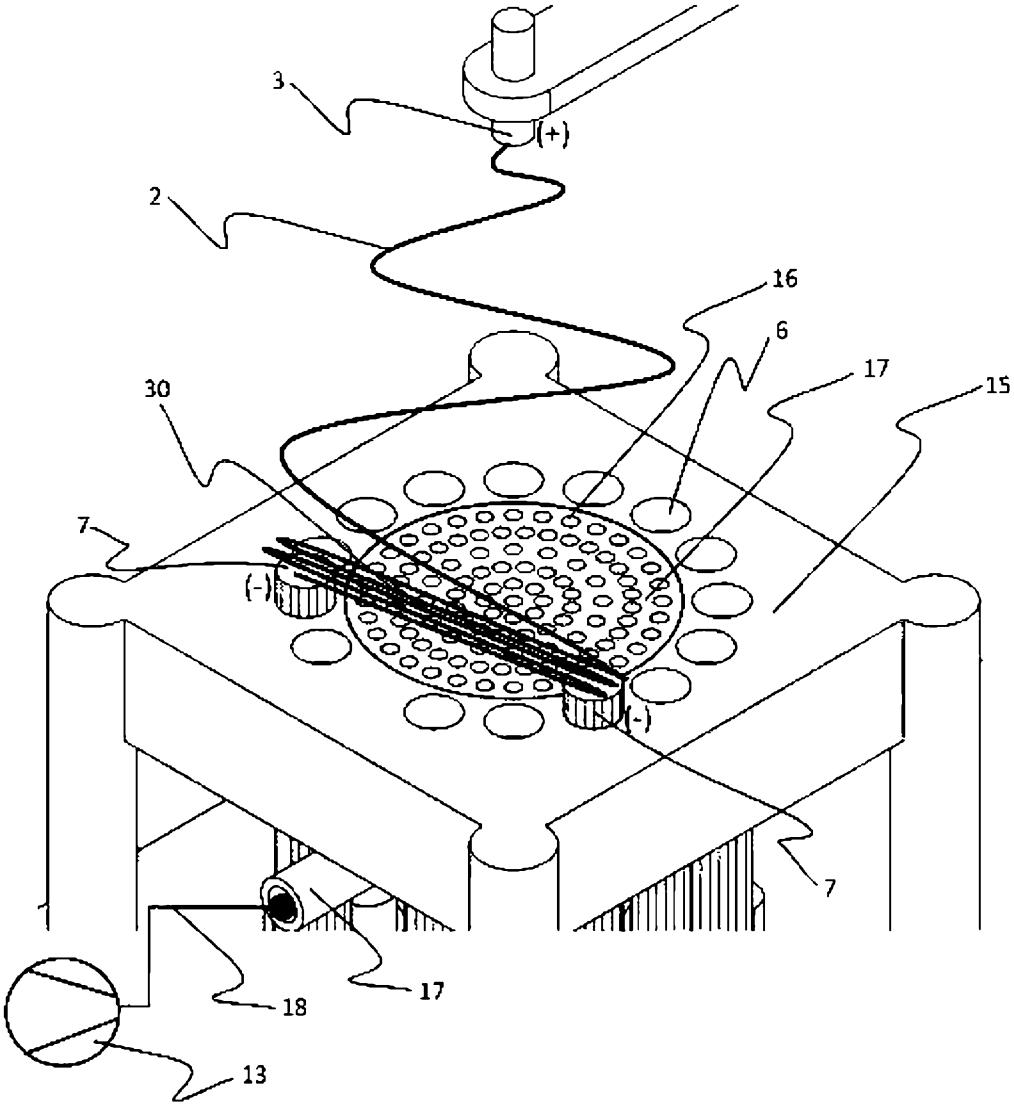


Fig. 4

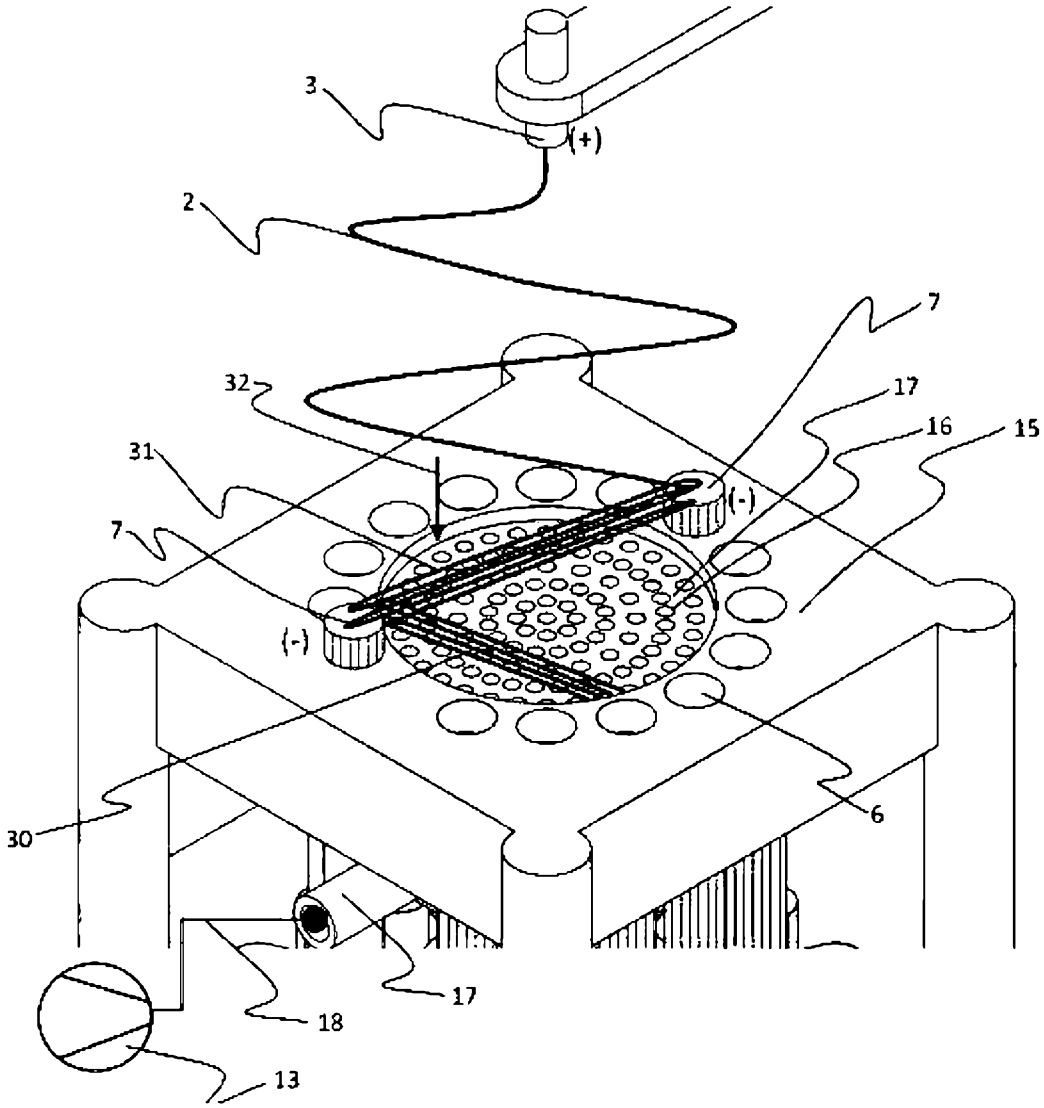


Fig. 5

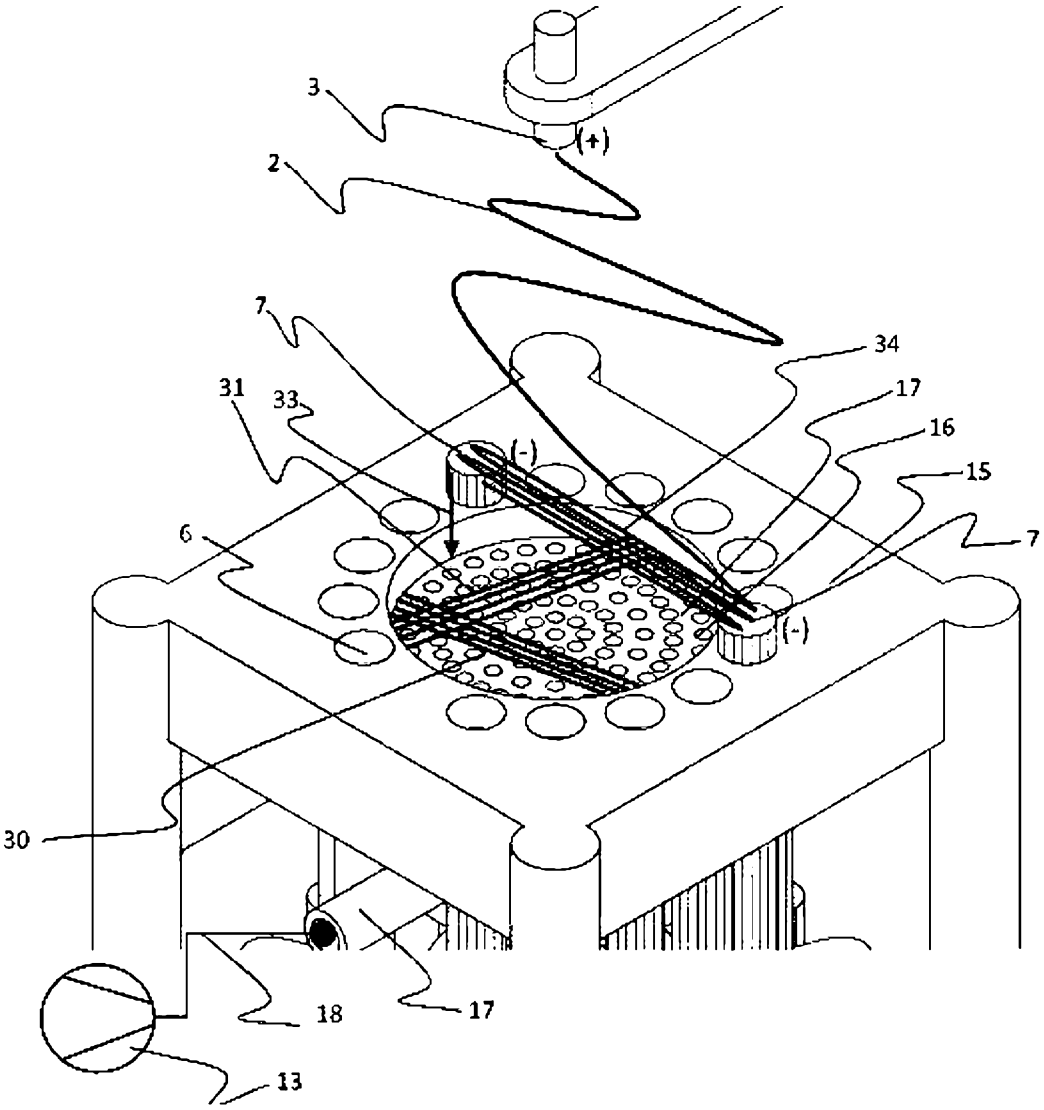


Fig. 6

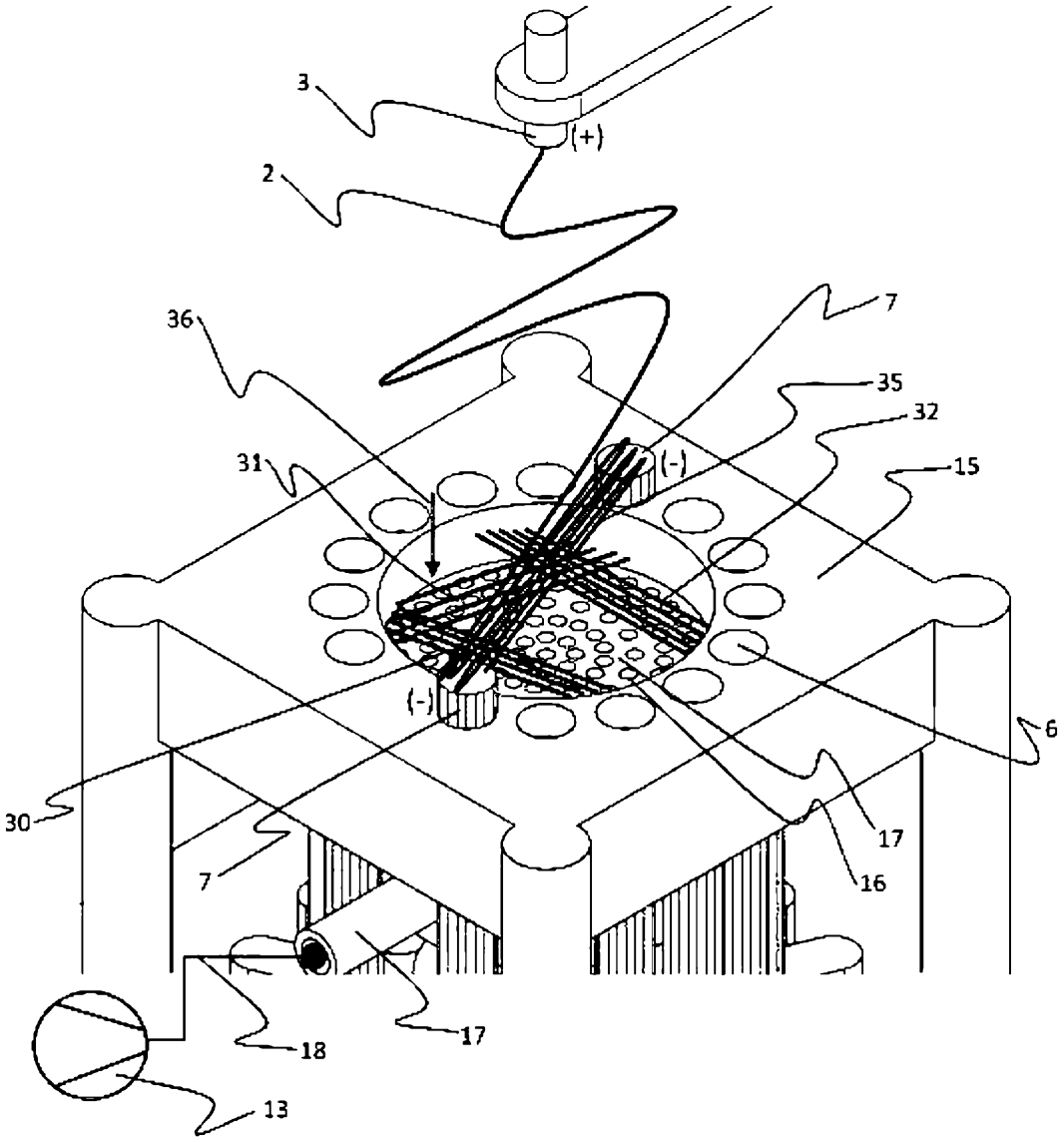


Fig. 7

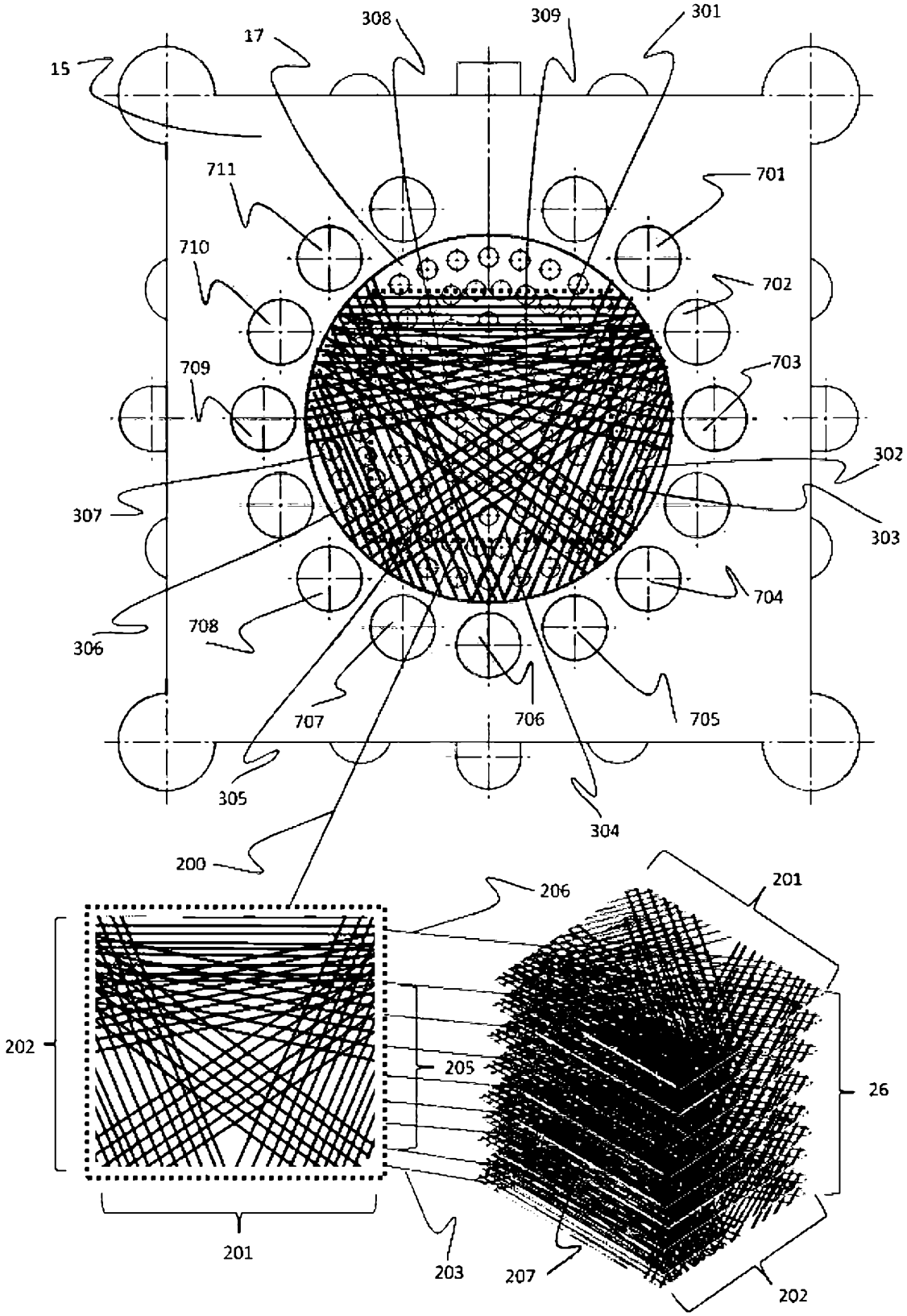

15
17
308
309
301
711
701
710
702
709
703
302
307
303
704
708
306
707
706
705
305
304
200
206
201
202
205
26
201
203
207
202

Fig. 8

DESCRIÇÃO

SISTEMA DE FABRICAÇÃO EM LARGA ESCALA DE MATRIZES TRIDIMENSIONAIS DE FIBRAS ALINHADAS POR ELETROFIAÇÃO

Domínio técnico da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e processo de eletrofiação, em contínuo, para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

A partir da aplicação da invenção é possível obter-se matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas.

Desta forma, a presente invenção tem aplicação em áreas variadas, na fabricação de produtos ou estruturas, à escala nanométrica, que dependem da área de superfície elevada, como por exemplo em biotecnologia, na área farmacêutica, em investigação, área de engenharia de tecidos e em medicina, em particular na medicina regenerativa, como por exemplo, na terapia celular, na produção de tecido cartilaginoso e relacionados, em especial para substituição e fortalecimento de articulações.

Estado da arte

Dentre os principais temas de interesse no processamento de materiais poliméricos está a produção de estruturas poliméricas micro ou nanoestruturadas, em especial nanofibras ou nanofios. As propriedades únicas dos nanomateriais associadas às diferentes possibilidades de morfologias e funcionalidades descortinam uma série de possibilidades de novas aplicações e impulsionam o avanço no processamento destas nanoestruturas.

Neste aspeto, o método de fiação eletrostática ou eletrofiação mostra-se muito vantajoso, uma vez que as fibras obtidas através desta técnica exibem elevada área superficial, aliada a um baixo custo de produção e possibilidade de serem formadas a partir de uma grande variedade de polímeros ou compósitos. Esta técnica baseia-se na aplicação de campos elétricos de alta tensão (5-50 KV) e baixa corrente (0,5-1 μA) para a produção fibras de diâmetros muito reduzidos. Neste processo as forças eletroestáticas controlam a formação e deposição destas fibras.

O documento US2349950A descreve um arranjo experimental básico, em que o diagrama proposto já apresenta uma configuração formada por numa fonte de alta tensão, solução polimérica e um sistema de aterramento.

Atualmente, a configuração fundamental de um processo genérico de eletrodeposição consiste numa seringa, onde é introduzida o polímero fundido ou solução polimérica, que é conectada a um tubo capilar, uma bomba difusora, a qual controla o caudal da solução polimérica a ser fornecido, de

modo a que seja mantido sempre uma gota de solução na ponta do tubo capilar, um coletor metálico, mantido a potencial zero (aterrado), onde serão recolhidas as fibras produzidas, uma fonte de alta tensão, responsável por produzir uma diferença de potencial entre a ponta do tubo capilar e o coletor. Com a aplicação do campo elétrico entre o tubo capilar e o coletor a gota de solução fica sujeita a orientação de cargas na sua superfície.
Conforme a intensidade do campo aumenta, o balanço das cargas eletrostáticas ao qual a gota está sujeita, nomeadamente a força de tensão superficial da solução e a força exercida pelo campo elétrico aplicado, começa a sofrer um desequilíbrio e, a partir de um determinado valor crítico de campo elétrico, é projetado um jato de material polimérico do tubo capilar e acelerado em direção ao coletor.

Durante a trajetória até o coletor, o jato com a solução polimérica sofre evaporação de grande parte do seu solvente, garantindo assim que as fibras formadas tenham rigidez suficiente para suportarem o próprio peso. Para além disso, o solvente que permanece na solução, como humidade, permite a adesão de umas fibras às outras, à medida que são depositadas em camadas, formando uma teia não tecida. Nesta configuração básica as fibras eletrofiadas formam uma manta ou tecido bidimensional, com orientação aleatória, devido a instabilidade da trajetória do jato.

O interesse no processo de eletrofiação tem crescido muito rapidamente desde a década de 1990. Esforços multidisciplinares, tanto na área da investigação académica quanto orientados para aplicações específicas, têm gerado um enorme número de publicações científicas, submissões de patentes e um aumento significativo da exploração da técnica

por parte das empresas de produtos de filtragem, medicina regenerativa, vestuário de proteção, catálise, entre outras.

As redes de fibras orientadas apresentam possibilidade de desenvolvimento de propriedades anisotrópicas nos materiais. Estas relações são bastante óbvias no campo da engenharia dos tecidos.

Exemplos típicos incluem produção de malhas poliméricas, contendo fibras alinhadas, utilizadas como substratos para cultura e regeneração de células neurais, devido a natureza inerentemente anisotrópica dos nervos e seus mecanismos de regeneração. Nestas aplicações de bioengenharia é requisito fundamental que o material de "*scaffold*" tenha uma estrutura tridimensional de porosidade controlada, para que seja possível o desenvolvimento da construção celular tridimensional em toda a profundidade da matriz.

Muitos dos esforços têm-se concentrado na produção de fibras alinhadas e com padronização controlada, devido ao seu excecional potencial para elaboração de dispositivos funcionais, como por exemplo os apresentados nos documentos US20120009292A1, US20110142806A1 e US2016004706A1.

Têm sido sugeridas várias abordagens para promover o alinhamento das mantas de fibras eletrofiadas, de entre as quais o processo de "*air gap electrospinning*", que prevê a configuração de elétrodos paralelos espaçados, com as fibras estiradas no espaçamento entre as placas, tem sido o método mais utilizado para depositar e coletar estas fibras.

A publicação de um trabalho pioneiro de Dan Li e colaboradores (Li, et al., Nanoletters, 2003, 3:8, 1167)

mostrou que dois efeitos favoreciam a produção e deposição de nanofibras bem alinhadas entre o espaço dos elétrodos dispostos em paralelo, nomeadamente o efeito do direcionamento de deposição das nanofibras, causada pela deformação do campo elétrico entre o tubo capilar e o coletor, e a acumulação das cargas ao longo das nanofibras depositadas, que favorece o arranjo paralelo entre elas, devido a repulsão eletrostática.

Uma variação interessante desse sistema de montagem é o coletor para produção de matrizes de fibras, cujo sistema compreende elétrodos dispostos num plano separados por 90°. O funcionamento baseia-se na ligação do terminal terra aos elétrodos dispostos na mesma linha. As fibras eletrofiadas são coletadas entre os elétrodos, que estão ligados à terra, e esta ligação é alternada entre os pares de elétrodos com intervalos de tempos definidos, permitindo a formação de uma malha com camadas de fibras com diferentes arranjos (Li, et al., Adv. Matter, 2004, 16:4, 361).

Neste sentido, o documento US20110018174A1 divulga a produção de fibras eletrofiadas alinhadas, com controlo de localização e orientação das fibras, sendo, para este efeito, utilizado um dispositivo que fornece uma voltagem em função do tempo selecionado, em que essa voltagem é aplicada a um coletor com múltiplos elétrodos. No entanto, o referido documento não divulga um processo com a capacidade de formar uma matriz tridimensional de fibras alinhadas com qualquer espessura desejada.

Outras estratégias para a formação de matrizes tridimensionais de fibras alinhadas têm sido objeto de estudos, principalmente no campo da medicina regenerativa,

como, por exemplo os artigos: Sheikh, et.al., Nanomedicine,2015, 11, e Li, et.al., Mater. Sci. Eng. C.,2016,68.

Neste sentido também o documento US 8580181B1 divulga um método para a formação de matrizes tridimensionais de nanofibras alinhadas com uma estrutura aberta e solta.

Embora as configurações acima descritas contemplem a formação de múltiplas camadas de fibras alinhadas umas sobre as outras, no espaço entre os elétrodos, ainda se verifica a existência de alguns problemas com a formação de matrizes tridimensionais. As limitações dos processos atuais de eletrofiação de fibras alinhadas relacionam-se, sobretudo com o facto de que, à medida que as fibras alinhadas e carregadas eletricamente são depositadas umas sobre as outras, a carga elétrica crescente tende a repelir as novas fibras de serem depositadas, impedindo o seu correto alinhamento e limitando a sua espessura a poucos décimos de milímetro da matriz de fibras formada.

Para determinadas aplicações, como exemplo a engenharia de tecidos, é necessária a formação de matrizes de fibras com elevada espessura, na ordem de vários milímetros, com controlo do alinhamento das fibras ao longo da espessura, e com a possibilidade de se controlar o grau de compactação (porosidade) entre as camadas fibras alinhadas depositadas.

Desta forma, existe a necessidade de se desenvolver e implementar um processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que permita produzir diversos padrões de alinhamento das fibras, ao longo

da espessura da matriz, formando estruturas tridimensionais com espessuras controlada.

A presente invenção propõe resolver os problemas do estado da técnica, acima descritos, através da implementação de um sistema e processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras, ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas.

Sumário da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e processo de eletrofiação, em contínuo, para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas.

O sistema da presente invenção compreende um tubo capilar de eletrofiação, um conjunto de multi-elétrodos, em que cada elétrodo apresenta um movimento controlado de exposição ou retração-ocultação em relação ao tubo de eletrofiação, e uma mesa coletora central das fibras eletrofiadas, que compreende orifícios sujeitos a pressão de vácuo, com possibilidade de regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação e os elétrodos em posição de exposição, e com movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar, de acordo com a **reivindicação 1.**

O sistema da presente invenção, através do movimento controlado de exposição ou retração-ocultação dos elétrodos, em relação ao tubo de eletrofiação, com produção de vácuo

controlado aplicado aos orifícios da mesa coletora central, permite segurar as fibras à mesa, assim como obter um determinado grau de compactação (e logo porosidade na direção vertical) necessário a determinadas aplicações das fibras. Para além disso, o movimento controlado de descida da mesa permite a formação das estruturas tridimensionais de fibras alinhadas.

A **formação de matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas ocorre quando, um ou mais pares de elétrodos são expostos ao tubo capilar de eletrofiação, formando-se assim uma camada de fibras alinhadas bidimensional, sobre as quais são depositadas sucessivamente, outras camadas formadas pela exposição de um ou mais pares de elétrodos ao tubo capilar, acompanhado, subsequentemente, pelo movimento controlado de afastamento da mesa coletora central do tubo de eletrofiação, após cada camada de fibras depositada, de acordo com a **reivindicação 3.**

Desta forma, o processo da presente invenção permite a obtenção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, que podem apresentar diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz, sendo esta espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas, de acordo com a **reivindicação 13.**

As matrizes produzidas têm **aplicação** em diversas áreas, como na biotecnologia, na área farmacêutica, em investigação, na área de engenharia de tecidos e em medicina, em particular na medicina regenerativa, como por exemplo, na terapia celular e na produção de tecido cartilaginoso e relacionados, em

especial para substituição e fortalecimento articulações, de acordo com a **reivindicação 15**.

Para além disso, o processo da presente invenção, através da utilização do sistema de eletrofiação proposto, tem a vantagem adicional de ser versátil, simples, barato e de funcionar em modo contínuo, não sendo, portanto, necessário produzir séries de camadas com um determinado alinhamento proceder à adição de outras camadas, com diferente alinhamento, para se obter matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas com diversos padrões de alinhamento das fibras e diferentes espessuras.

Breve descrição das figuras

Figura 1: Representação esquemática de uma forma de realização de um sistema de eletrofiação, de acordo com a presente invenção, com dois elétrodos expostos, em que os seguintes números representam:

1 sistema de eletrofiação;
2 fibra eletrofiada;
3 tubo capilar de eletrofiação;
4 ligação de polaridade positiva entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e uma fonte de alimentação (não representada);
5 suporte do tubo capilar de eletrofiação (3), apoiado na base de fixação (8);
6 orifícios do suporte periférico, onde estão inseridos os multi-elétrodos (7,14);
7 elétrodo em posição de exposição, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade negativa;

8 base de fixação de todo o sistema de eletrofiação (1);
9 unidade de controlo computorizada de todo o sistema de eletrofiação (1);
10 bobine de indução para geração da força eletromagnética para o sistema de eletrofiação (1);
11 íman permanente solidário com um elétrodo (7,14);
12 atuador do movimento linear da mesa coletora central (17);
13 bomba de vácuo com regulação de pressão;
14 elétrodo em posição de retração-ocultação, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
15 suporte periférico da mesa coletora (17), em material isolante;
16 orifícios na superfície da mesa coletora central (17), que ligam à câmara no seu interior (não representada);
17 mesa coletora central; e
18 canal de ligação entre a câmara interior (não representada) da mesa coletora central (17) e a bomba de vácuo (13).

Figura 2: Representação esquemática de uma secção longitudinal do sistema de eletrofiação (1), de acordo com uma forma de realização preferencial da presente invenção, em que:

- A fibra eletrofiada (2) encontra-se entre os dois elétrodos expostos com polaridade negativa (7) e a mesa coletora (17) com a sua superfície (19) recoberta com os orifícios (16) ligados à câmara (21) no seu interior, que é sujeita a pressão de vácuo, na posição mais próxima do tubo capilar de eletrofiação (3);

- Dois elétrodos encontram-se em posição de exposição (7) na superfície (20) do suporte periférico (15), um elétrodo encontra-se em posição de ocultação (14);
- o atuador (12) do movimento linear (24) da mesa coletora (17),
- os sentidos as forças eletromagnéticas de atração (23) e repulsão (22) geradas entre a extremidade dos elétrodos (7)(14) com íman permanente (11) e as bobines eletromagnéticas (10);

Figura 3: Representação esquemática de uma secção longitudinal do sistema de eletrofiação (1), de acordo com uma forma de realização preferencial da presente invenção, em que:
- a fibra eletrofiada (2) encontra-se depositada entre os dois elétrodos expostos (7) e a mesa coletora central (17), recoberta com os orifícios (16), ligados à câmara (21), no seu interior, numa posição mais afastada do tubo capilar de eletrofiação (3);
- o sentido da força de sucção (25), de fixação-compactação das diferentes camadas de fibras (27) (28) (29), gerada pelo efeito da pressão de vácuo presente na câmara (21), e a espessura (26) da matriz de fibras formada após a deposição de diferentes camadas (27) (28) (29) de fibras alinhadas.

Figura 4: Representação esquemática de uma das formas de realização do processo de eletrofiação da invenção, em que:
- uma primeira camada de fibras alinhadas (30) se encontra entre dois elétrodos expostos (7), com polaridade negativa, pertencentes ao conjunto de multi-elétrodos, os quais se encontram em posição oculta nos orifícios (6) do suporte periférico (15), com a mesa coletora central (17) na

posição de funcionamento mais próxima do tubo capilar de eletrofiação (3);
- a mesa coletora central (17) por intermédio da sua câmara (21) ligada.

Figura 5: Representação esquemática das fibras alinhadas da primeira camada (30) fixas à superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da superfície (19) da mesa coletora central (17), por efeito do vácuo presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (32) do atuador (12), e **é seguida pela deposição da segunda camada de fibras alinhadas** (31), entre os dois elétrodos expostos (7) e pelo movimento de afastamento da mesa (32).

Figura 6: Representação esquemática das fibras alinhadas da primeira camada (30) e segunda camada (31) fixas na superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da superfície (19) da mesa coletora central (17), pelo efeito do vácuo presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12), e é **seguida pela deposição da terceira camada de fibras alinhadas (31)**, entre os dois elétrodos expostos (7).

Figura 7: Representação esquemática das fibras alinhadas da **primeira camada (30)**, **segunda camada (31)** e **terceira camada (32)**, fixas na superfície (19) da mesa coletora central (17), por ação da força de sucção (25) gerada nos orifícios (16) da

superfície (19) da mesa coletora central (17), pelo efeito da pressão de vácuo, presente na câmara (21) da mesa coletora central (17), a qual, após um determinado período de tempo, se afastou do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (36) do atuador (12), e é seguida pela **deposição da quarta camada de fibras alinhadas (35)** entre os dois elétrodos expostos (7);

Figura 8: Representação esquemática da vista superior da mesa coletora central (17) e suporte periférico de elétrodos (15) **com a representação de nove alinhamentos de fibras** (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309), **depositados de forma sequencial em camadas**, sendo o alinhamento (301) obtido pela exposição dos elétrodos (702) e (710), o alinhamento (302) obtido pela exposição dos elétrodos (702) e (705), o alinhamento (303) obtido pela exposição dos elétrodos (701) e (706), o alinhamento (304) obtido pela exposição dos elétrodos (701) e (706), o alinhamento (305) obtido pela exposição dos elétrodos (708) e (702), o alinhamento (306) obtido pela exposição dos elétrodos (706) e (711), o alinhamento (307) obtido pela exposição dos elétrodos (710) e (707), o alinhamento (308) obtido pela exposição dos elétrodos (709) e (702), o alinhamento (309) obtido pela exposição dos elétrodos (710) e (703), em que o conjunto destas nove camadas forma um padrão de alinhamentos (200), o qual é repetido sucessivas vezes, entre o primeiro (203), intermédios (205) e último (206) padrão, resultando assim na espessura (26) da matriz tridimensional, que é delimitado por as dimensões (202) e (201).

Descrição da invenção

A presente invenção diz respeito a um sistema e a um processo de eletrofiação em contínuo para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, em particular para engenharia de tecidos, com possibilidade de produzir diversos padrões de alinhamento das fibras ao longo da espessura da matriz formando estruturas tridimensionais com espessuras controlada.

O sistema da presente invenção compreende um módulo de formação de fibras, que pode ser constituído basicamente por uma seringa para conter uma solução polimérica, conectada a uma bomba injetora, ligada a um tubo capilar de eletrofiação, que está ligado a uma fonte de tensão, configurada para fornecer polaridade positiva, estando o referido módulo alinhado longitudinalmente com o suporte periférico em material isolante em onde se encontram inseridos longitudinalmente em orifícios na sua superfície multi-elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento individual controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação comtemplando duas posições, uma de exposição e outra de retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, assim como a possibilidade de ativação seletiva das polaridades negativas dos referidos elétrodos, quando estes elétrodos estão na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, o alinhamento e distribuição deste elétrodos no suporte periférico delimitam a área e forma da mesa coletora central de fibras.

A fibra de material polimérico, formada por eletrofiação a partir do tubo capilar com polaridade positiva, desloca-se por ação de um campo elétrico em direção a um módulo coletor, que é constituído por um suporte periférico em material isolante onde se encontram inseridos longitudinalmente multi-

elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação permitindo a sua exposição ou retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, uma mesa coletora central delimitada pelo suporte periférico dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios que se estendem desde a sua superfície superior até uma câmara no seu interior estando esta câmara ligada uma bomba de vácuo com controlo de pressão, esta mesa coletora central possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar permitindo o seu afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação.

O suporte periférico dos multi-elétrodos e a mesa coletora central são montados sobre uma plataforma fixa onde se apoia o suporte, de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação permitindo a regulação da distância entre o tubo capilar de eletrofiação e os multi-elétrodos.

O movimento de exposição e retração-ocultação dos elétrodos inseridos em orifícios no suporte periférico ao tubo capilar de eletrofiação resulta de uma força eletromagnética controlada que se desenvolve na extremidade do elétrodo oposta a superfície superior do suporte periférico por ação do fluxo magnético entre um íman permanente solidário com o elétrodo e uma bobine de indução fixa na região inferior do suporte periférico.

O depósito e alinhamento do fluxo de fibras é realizado quando um ou mais pares de elétrodos são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, e as suas respetivas polaridades negativas são ativadas, de acordo

com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim uma camada de fibras bidimensional alinhadas.

O movimento de retração-ocultação do elétrodos, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, para o interior do seu orifício no suporte periférico dos multi-elétrodos permite o apoio-deposito das fibras sobre a mesa coletora central seguida da separação das fibras da extremidade do elétrodo.

O movimento controlado de afastamento da superfície superior da mesa coletora central do tubo capilar de eletrofiação, após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada, permite a acumulação de sucessivas camadas de fibras sobre a mesa coletora central permitindo assim a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras em que a sua espessura está dependente do número de camadas de fibras bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema de vácuo.

As sucessivas camadas bidimensionais de fibras depositadas no módulo coletor, de acordo com o referido processo de eletrofiação, são mantidas em posição na mesa coletora central, entre os multi-elétrodos, por ação do vácuo gerado nos orifícios da superfície superior da mesa coletora central que comunicam com uma câmara no seu interior conectada à bomba de vácuo.

O controlo da pressão na bomba de vácuo tem igualmente o propósito de controlar o grau de compactação entre as camadas de fibras bidimensionais formadas e logo a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

O controlo da distância entre o tubo capilar de eletrofiação com polaridade positiva e o módulo coletor, o controlo dos movimentos de exposição e retração-ocultação dos elétrodos com polaridade negativa relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, o controlo do movimento da superfície superior da mesa coletora central em referência ao tubo capilar de eletrofiação, o controlo da polaridade negativa aplicada aos multi-elétrodos e o controlo da pressão da bomba de vácuo são efetuados por uma unidade de controlo computorizada que em função do alinhamento de fibras desejado para cada camada bidimensional depositada e da espessura da matriz pretendia programa a sequência de todos os movimentos, pressão de vácuo e polaridade dos elétrodos necessários com base num programa computacional desenvolvido para o efeito.

A presente invenção possui a capacidade de formar matrizes de fibras alinhadas de qualquer espessura em contínuo e com e qualquer padrão de alinhamento ao longo dessa espessura, pelo facto de combinar diferentes particularidades técnicas, entre elas se destacam a utilização de multi-elétrodos distribuídos espacialmente com a possibilidade de movimentos individuais e controlados de exposição e retração-ocultação ao tubo capilar de eletrofiação, permitindo assim a possibilidade de controlo do alinhamento das fibras depositadas, o apoio e depósito das fibras sobre a mesa coletora central e a separação das fibras das extremidades dos elétrodos aquando do movimento de retração, sendo a superfície da mesa coletora provida orifícios sujeitos a pressão de vácuo, que por um lado permitem a fixação das fibras à mesa e também permite o controlo do grau de compactação (porosidade) entre as diferentes camadas de fibras depositadas, estando esta capacidade associada também ao movimento de afastamento da

mesa coletora relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, permitindo assim a deposição sucessiva de camadas de fibras alinhadas até a espessura desejada.

1. Sistema de eletrofiação para a produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas

O sistema da presente invenção compreende, de uma forma genérica:

- um **módulo de formação de fibras**, que compreende um recipiente para contenção e fornecimento polímero fundido ou solução polimérica, tipicamente uma seringa, e uma bomba injetora, ligada a um tubo capilar de eletrofiação, ligado a uma fonte de tensão, configurada para fornecer polaridade positiva;
- um **conjunto multi-elétrodos**, que compreende vários elétrodos com polaridade negativa;
- um **módulo coletor**, para recolha das fibras produzidas;
- uma fonte de alimentação do sistema de eletrofiação; e
- uma bomba de vácuo.

Para além dos referidos elementos, o sistema da presente invenção compreende ainda um íman permanente, solidário com cada um dos elétrodos, para gerar as forças de atração e repulsão entre as extremidades dos elétrodos e as bobines eletromagnéticas, também presentes no sistema, uma unidade de controlo computorizada e a eletrónica necessária ao seu adequado funcionamento, atuadores, nomeadamente o atuador do movimento linear da mesa coletora central, bem como toda a cabelagem elétrica para distribuição de energia aos vários componentes do sistema.

De uma forma mais particular, o sistema (1) da presente invenção compreende:

- um módulo de formação de fibras com um **tubo capilar de eletrofiação** (3);
- um **conjunto multi-elétrodos**;
- um **módulo coletor**, para recolha das fibras produzidas;
- uma bomba de vácuo (13) para regulação de pressão;

Em que:

a) **O conjunto multi-elétrodos**, o qual se encontra inserido num suporte periférico (15), compreende:

(i) vários elétrodos (7) (14), sendo cada um dotado de movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3);

(ii) vários imanes (11), estando cada um destes imanes solidário com um elétrodo (7,14), para geração de força eletromagnética (22, 23), em conjunto com a bobine de indução (10), controlada pela unidade computorizada (9);

b) O **módulo coletor** compreende:

(i) um suporte periférico (15), onde se encontram inseridos, longitudinalmente, em orifícios (6) na sua superfície (20), os elétrodos (7) (14), estando o referido suporte (15) montado sobre uma plataforma fixa (8), onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3), para regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);

(ii) uma mesa coletora central (17), delimitada pelo referido suporte periférico (15), definindo uma região de acumulação das fibras eletrofiadas, e que ainda apresenta orifícios (16), que se estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21);

(iii) uma câmara (21), que se encontra no interior da mesa central (17), estando esta câmara ligada, por um canal (18), a uma bomba de vácuo (13);

em que:

- cada um dos elétrodos é capaz de estar independentemente exposto (7) ou retraído/ocultado (14), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
- a bomba de vácuo (13) exerce uma pressão de vácuo controlado sobre os orifícios (16); e
- a mesa coletora central (17), apresenta movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar (3), permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

O **sistema de eletrofiação (1)** compreendendo a fibra (2) de material polimérico formada por eletrofiação a partir do tubo capilar (3) com polaridade positiva desloca-se por ação de um campo elétrico em direção a um módulo coletor, que é constituído por um suporte periférico (15) em material isolante onde se encontram inseridos longitudinalmente em orifícios (6) na sua superfície (20) multi-elétrodos (7) (14) sendo cada elétrodo (7) (14) dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3) permitindo a sua exposição (7) ou retração-ocultação (14) relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), uma mesa coletora central (17) delimitada pelo suporte periférico (15) dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios (16) que se

estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21) no seu interior estando esta câmara ligada por um canal (18) a uma bomba de vácuo (13) com controlo de pressão, esta mesa coletora central (17) possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar (3) permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

Numa forma de realização, o presente sistema e processo de eletrofiação em contínuo é constituído pelo suporte periférico (15) dos multi-elétrodos montado sobre uma plataforma fixa (8) onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3) permitindo a regulação da distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7) ao tubo capilar de eletrofiação (3).

Numa forma de realização, o movimento de exposição (22) e retração-ocultação (23) dos elétrodos (7) e (14) inseridos em orifícios (6) do suporte periférico (15) ao tubo capilar de eletrofiação (3) resulta de uma força eletromagnética (22) (23) controlada pela unidade de controlo computorizada (9) que se desenvolve na extremidade do elétrodo (7) (14) oposta a superfície superior (20) do suporte periférico (15) por ação do fluxo magnético entre um íman permanente (11) solidário com o elétrodo (7) (14) e uma bobine de indução (10) posicionada na região inferior do suporte periférico (15).

Numa forma de realização, o depósito e alinhamento do fluxo de fibras (2) é realizado quando um ou mais pares de elétrodos (7) são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), e as suas respetivas

polaridades negativas são ativadas pela unidade de controlo computorizada (8), de acordo com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim camadas sucessivas de fibras bidimensional alinhadas (27)(28)(29)(30)(31)(34)(35).

Numa forma de realização, o movimento de retração-ocultação do elétrodos (23), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3) para o interior do seu orifício (6) no suporte periférico (15) permite o apoio-deposito das fibras (27) (28) (29)(30)(31)(33)(35) sobre a superfície (19) mesa coletora central (17) seguida da separação-libertação das fibras da extremidade dos elétrodos (7).

O movimento (24)(32)(33)(36)controlado de afastamento da superfície (19) da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35), permite a acumulação de sucessivas camadas de fibras (27)(28) (29)(30)(31)(33)(35) sobre a mesa coletora central (17) permitindo assim a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras (207) em que a sua espessura (26) está dependente do número de camadas de fibras (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35)bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema de vácuo (13).

As sucessivas camadas bidimensionais de fibras depositadas (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35) na mesa coletora central (17) são mantidas em posição na mesa coletora central (17) por ação de uma força de sucção (25) gerada pela pressão de vácuo nos orifícios da superfície (19)da mesa coletora central (17) que comunicam com uma câmara (21) no seu interior conectada por um canal (18) à bomba de vácuo (13).

O controlo da pressão na bomba de vácuo (13) tem igualmente o propósito de controlar a forças de sucção (25) sobre as fibras e o grau de compactação entre as camadas de fibras (27)(28)(29)(30)(31)(33)(35) bidimensionais formadas e logo a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

O controlo da distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva através do seu suporte (5) e os multi-eletródos expostos (7) com carga negativa, o controlo dos movimentos de exposição (22) e retração-ocultação (23) dos elétrodos (7) com polaridade negativa relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3), o controlo do movimento da superfície (19) da mesa coletora central (17), em referência ao tubo capilar de eletrofiação (3), o controlo da polaridade negativa aplicada aos elétrodos (7) e o controlo da pressão da bomba de vácuo (13) são efetuados por uma unidade de controlo computorizada (8) que em função do alinhamento (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308)(309) de fibras desejado para cada camada bidimensional depositada (27)(28)(29) (30) (31)(33)(35) e da espessura (26) da matriz pretendia programa a sequência de todos os movimentos, pressão de vácuo e polaridade dos elétrodos necessários com base num programa computacional desenvolvido para o efeito.

2. Processo de obtenção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas

O processo da presente invenção realiza-se em várias etapas com utilização do sistema de eletrofiação (1), tal como descrito na secção anterior.

A produção de matrizes tridimensionais de fibras (2) poliméricas alinhadas ocorre quando um ou mais pares de elétrodos (7,14) são expostos ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, formando-se assim uma camada bidimensional de fibras alinhadas, as quais são mantidas em posição adequada, na mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos, por ação da força de sucção gerada pela pressão do vácuo nos seus orifícios.

O movimento controlado de afastamento da mesa coletora central (17) do tubo de eletrofiação (3), após cada camada de fibras depositada, permite a acumulação de sucessivas camadas e a formação de uma matriz tridimensional com espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas está controlado pela pressão vácuo.

Desta forma, o processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas da presente invenção compreende os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma primeira camada de fibras alinhadas (30);
b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);

d) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma segunda camada (31) de fibras alinhadas;
e) aplicação de pressão de vácuo à camada (31) de fibras alinhadas, obtida em (d), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14).

A produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, com mais de duas camadas, é realizada pela repetição dos passos (a), (b) e (c), tantas vezes quanto o número de camadas desejadas, ao processo tal como acima descrito.

Desta forma, para se obter uma matriz com três camadas, o processo da presente invenção compreende os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma primeira camada de fibras alinhadas (30);
b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);
d) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma segunda camada (31) de fibras alinhadas;

e) aplicação de pressão de vácuo à camada (32) de fibras alinhadas, obtida em (d), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);
f) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3), de acordo com a orientação das fibras desejada, para formação de uma terceira camada (33) de fibras alinhadas;
g) aplicação de pressão de vácuo à camada (33) de fibras alinhadas, obtida em (f), através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), após o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14).

Para obtenção de matrizes com camadas múltiplas e padrões de alinhamento utiliza-se um ou mais pares de elétrodos que são expostos (7) ao tubo capilar (3), contendo uma determinada solução polimérica, em que a composição e a concentração do polímero em solução, bem como os solventes usados, variam em função do fim a que a matriz se destina.

Aos elétrodos, localizados em orifícios superficiais (16) e distribuídos radialmente em torno da mesa de coletora central (17), com uma determinada área, é aplicada uma determinada voltagem negativa, também esta selecionada de acordo com o tipo de fibra e matriz a produzir.

Cada um dos diferentes alinhamentos das camadas bidimensionais de fibras é obtido por a exposição (7) sequencial, de um número de elétrodos selecionados, ao tubo capilar de eletrofiação (3) durante um determinado período, também este selecionado em função do fim a que as fibras e as matrizes se destinam.

As várias camadas de fibras bidimensionais depositadas resultam assim da realização de ciclos consecutivos de vários tipos de alinhamento, que é obtido pela combinação das variáveis ou dos fatores de produção acima descritos.

É assim possível obter vários alinhamentos de fibras (301) (302) (303) (304) (305) (306) (307) (308) (309) depositados de forma sequencial em camadas, sendo cada um dos alinhamentos obtido pela exposição (7) de diferentes elétrodos ao tubo capilar de fiação (3).

O conjunto de diferentes camadas, alinhadas de maneira distinta, forma um padrão de alinhamentos (200), o qual é repetido sucessivas vezes entre o primeiro (203), intermédios (205) e último (206) padrão, resultando assim a espessura (26) da matriz tridimensional, que é delimitada pelas dimensões (202) e (201) da mesa coletora central (17).

O processo de produção de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas decorre em contínuo pela realização sucessiva dos vários passos para a formação camadas bidimensionais de fibras poliméricas, de acordo com o acima descrito.

3. Caracterização das matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas,

A espessura das matrizes obtidas varia assim, não apenas em função do tipo e quantidade de polímero usado, mas também em função do número de camadas de fibras depositadas, da espessura dessas fibras e do grau de compactação entre camadas, sendo cada um destes aspetos, controlados pela

pressão vácuo exercido nas camadas de fibras depositadas na mesa coletora central.

Por outro lado, o alinhamento das fibras de cada camada é controlado pelos diferentes movimentos e número de elétrodos expostos e/ou ocultos em cada ciclo de formação de fibras.

Em conclusão, através da implementação do sistema e do processo da presente invenção é possível obter matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, as quais podem apresentar diversos padrões de alinhamento, ao longo da espessura da matriz podendo ser esta espessura também variável.

Exemplo: Produção de uma matriz polimérica de fibras alinhadas

O presente exemplo refere-se à produção de uma matriz composta por 27 camadas de fibras poliméricas alinhadas para engenharia de cartilagem, com uma espessura total de 3.24 mm.

O polímero usado para fabricar a matriz foi policaprolactona (PCL) com um peso molecular de 80.000 Da.

O PCL foi dissolvido com concentrações de 12% de diclorometano (DCM) e dimetilformamido (DMF) com um rácio de 1:1 (v:v) após 12 horas em agitação à temperatura ambiente.

Em seguida, procedeu-se à eletrofiação do polímero fundido, com recurso a um tubo capilar (3) com um fluxo de 2.5 mL/h, uma voltagem de 25 kV e uma distância de trabalho de 15 cm relativamente à mesa coletora central (17).

Nesta configuração do sistema de eletrofiação (1), a mesa coletora central (17) possui um diâmetro de 8mm, sendo os orifícios (16) na sua superfície sujeitos a uma pressão de vácuo de 3300 Pa.

Para a formação de cada camada de fibras foram utilizados 11 elétrodos (701), (702), (703), (704), (705), (706), (707), (708), (709), (710) e (711) distribuídos radialmente em torno da mesa (tal como representados na figura 8), tendo cada elétrodo um diâmetro medio de 1.5mm.

Na sua posição de exposição (7) ao tubo capilar de eletrofiação (3) os referidos elétrodos foram sujeitos a uma voltagem negativa de -3kV.

Cada um dos diferentes alinhamentos das camadas bidimensionais de fibras foi obtido por a exposição (7) sequencial de pares de elétrodos ao tubo capilar de eletrofiação (3) durante 2,3 min.

As 27 camadas de fibras bidimensionais depositadas resultaram da realização de 3 ciclos consecutivos (3 vezes) de 9 padrões de alinhamento (301), (302), (303), (304), (305), (306), (307), (308) e (309) por esta ordem, sendo:

- o alinhamento (301) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (702) e (710);
- alinhamento (302) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (702) e (705);
- o alinhamento (303) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (701) e (706);
- o alinhamento (304) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (701) e (706);

- o alinhamento (305) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (708) e (702);
- o alinhamento (306) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (706) e (711);
- o alinhamento (307) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (710) e (707);
- o alinhamento (308) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (709) e (702); e
- o alinhamento (309) obtido pela exposição (7) dos elétrodos (710) e (703).

No final da deposição de cada camada de fibras alinhadas a mesa coletora central (17) afastou-se do tubo capilar de eletrofiação cerca de 0.12 mm, sendo este o valor correspondente à espessura média de cada camada de fibras dimensional depositada.

No total a mesa coletora central afastou-se cerca de 3.24 mm, o correspondente à espessura da matriz obtida no final das 27 camadas depositadas.

A matriz tridimensional de fibras alinhadas obtida neste exemplo exibe, tal como a cartilagem nativa, um alinhamento preferencial das fibras na sua zona superficial paralelo a superfície, na zona intermédia não apresenta qualquer alinhamento preferencial, e na zona mais profunda as fibras estão alinhadas de uma forma verticalizada relativamente à superfície.

Lisboa, 11 de dezembro de 2019.

REIVINDICAÇÕES

1. **Um sistema de electrofiação** (1) que compreende (a) um módulo de formação de fibras, (b) um conjunto multi-elétrodos, (c) um módulo coletor, para recolha das fibras depositadas, uma fonte de alimentação, uma bomba de vácuo (13), **caracterizado por:**

   a) O módulo de formação de fibras compreender, um tubo capilar de eletrofiação (3) com polaridade positiva;

   b) O conjunto multi-elétrodos se encontrar inserido num suporte periférico (15) e compreender:

   - vários elétrodos (7) (14), sendo cada um destes elétrodos dotado de movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação (3);
   - vários imanes (11), estando cada um destes imanes solidário com um elétrodo (7,14), para geração de força eletromagnética (22, 23), em conjunto com a bobine de indução (10), controlada pela unidade computorizada (9);

   c) O módulo coletor compreender:

   - um suporte periférico (15), onde se encontram inseridos, longitudinalmente, em orifícios (6) na sua superfície (20), os elétrodos (7) (14), estando o referido suporte (15) montado sobre uma plataforma fixa (8), onde se apoia o suporte (5), de comprimento regulável, do tubo capilar de eletrofiação (3), para regular a distância entre o tubo capilar de eletrofiação (3) e os elétrodos em posição de exposição (7), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
   - uma mesa coletora central (17), delimitada pelo referido suporte periférico (15), definindo uma região de acumulação das fibras eletrofiadas, e que

ainda apresenta orifícios (16), que se estendem desde a sua superfície (19) até uma câmara (21);

- uma câmara (21), que se encontra no interior da mesa central (17), estando esta câmara ligada, por um canal (18), a uma bomba de vácuo (13);

em que:

- cada um dos elétrodos é capaz de estar independentemente exposto (7) ou retraído/ocultado (14), relativamente ao tubo capilar de eletrofiação (3);
- a bomba de vácuo (13) exerce uma pressão de vácuo controlado sobre os orifícios (16); e
- a mesa coletora central (17), apresenta movimento controlado, na direção do eixo do tubo capilar (3), permitindo o seu movimento (24) de afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação (3).

2. **Sistema de electrofiação** (1) de acordo com a reivindicação anterior que compreende unidade de controlo computorizada (9) e programa de computador.

3. **Um processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** compreender os seguintes passos:

a) exposição de um ou mais pares de elétrodos (7) ao tubo capilar (3) contendo uma solução de um determinado polímero adequado à função da matriz a produzir, sendo essa exposição feita de acordo com a orientação das fibras desejada, por aplicação de uma voltagem negativa aos elétrodos selecionados, durante um determinado tempo, para formação camadas de fibras alinhadas (30);

b) aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas obtida em (a) através dos orifícios (16) da mesa coletora central (17), com o movimento de retração-ocultação dos elétrodos (14);

c) afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3), por ação do movimento (33) do atuador (12);

d) Repetição de ciclos de exposição (7) sequencial de pares de elétrodos ao tubo capilar de eletrofiação (3) de (a), aplicação de pressão de vácuo à camada de fibras alinhadas de (b) e afastamento da mesa coletora central (17) do tubo capilar de eletrofiação (3) de (c), tantas vezes quanto o necessário para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido;

e) Repetição dos ciclos, tal como o descrito nos passos (a), (b) e (c), tantas vezes quanto o necessário, em que pelo menos, um dos fatores de eletrofiação é modificado em relação aos definidos no passo (a), (b) ou (c), para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido, sendo este alinhamento diferente do obtido no descrito nos passos (a), (b), (c) e (d);

f) Repetição de ciclos de exposição de (e), tantas vezes quanto o necessário, em que, pelo menos, um dos fatores de eletrofiação é modificado em relação aos definidos no ciclo anterior, para formar uma matriz de camadas bidimensionais de fibras (2), com o alinhamento requerido, sendo este alinhamento diferente do obtido no ciclo anterior

em que:

o movimento controlado de afastamento da mesa coletora central do tubo de eletrofiação após cada camada de

fibras depositada permite a acumulação de sucessivas camadas e a formação de uma matriz tridimensional com espessura dependente do número de camadas de fibras depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas é controlado pela pressão vácuo e a pressão de vácuo segura as fibras à mesa.

4. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com a reivindicação anterior, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o suporte periférico possuir um conjunto de multi-elétrodos sendo cada elétrodo dotado de movimento individual controlado na direção do eixo do tubo capilar de eletrofiação comtemplando duas posições, uma de exposição e outra de retração-ocultação relativamente ao tubo capilar de eletrofiação.

5. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 ou 4, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** a mesa coletora central estar delimitada pelo suporte periférico dos multi-elétrodos que consiste na região de acumulação das fibras eletrofiadas integrando esta orifícios que se estendem desde a sua superfície até uma cavidade no seu interior estando esta cavidade ligada uma bomba de vácuo com controlo de pressão, em que a mesa coletora central possui movimento controlado na direção do eixo do tubo capilar permitindo o seu afastamento ou aproximação do tubo capilar de eletrofiação.

6. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 5, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento de exposição e retração-ocultação dos elétrodos inseridos em orifícios no suporte periférico ao tubo capilar de eletrofiação resultar de força eletromagnética controlada que se desenvolve na extremidade do elétrodo oposta a superfície superior do suporte periférico por ação do fluxo magnético entre um íman permanente solidário com o elétrodo e uma bobine de indução posicionada na região inferior do suporte periférico.

7. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 6, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o depósito e alinhamento do fluxo de fibras ser realizado quando um ou mais pares de elétrodos são mantidos na posição exposta relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, e as suas respetivas polaridades negativas são ativadas, de acordo com a orientação de deposição das fibras desejada formando assim uma camada de fibras bidimensional alinhadas.

8. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 7, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento de retração-ocultação dos elétrodos, relativamente ao tubo capilar de eletrofiação, para o interior do seu orifício no suporte

periférico apoiar e depositar as fibras sobre a mesa coletora central seguida da separação das fibras das extremidades dos elétrodos.

9. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 8, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o movimento controlado de afastamento da superfície da mesa coletora central do tubo capilar de eletrofiação, após cada camada bidimensional de fibras alinhadas depositada, acumular sucessivas camadas de fibras sobre a mesa coletora central para a formação de uma estrutura de matriz tridimensional de fibras em que a sua espessura está dependente do número de camadas de fibras bidimensionais depositadas, da espessura das fibras e do grau de compactação entre camadas desejado por ação do sistema e pressão de vácuo.

10. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 9, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** as sucessivas camadas de fibras depositadas no módulo coletor serem mantidas em posição na mesa coletora central, por ação da força de sucção gerado nos orifícios da superfície da mesa coletora central por ação da pressão de vácuo gerada na câmara interior da mesa coletora central que comunicam com a bomba de vácuo.

11. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 10, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** o controlo da pressão na bomba de vácuo controlar o grau de compactação entre as camadas de fibras bidimensionais formadas e a porosidade na direção perpendicular ao plano da camada de fibras depositada.

12. **Processo para produção** de matrizes tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas em contínuo de acordo com qualquer uma das reivindicações anteriores 3 a 11, que decorre no sistema de qualquer uma das reivindicações 1 ou 2 **caracterizado por** os parâmetros serem controlados por unidade de controlo computorizada (9) e os movimentos dos elétrodos serem controlados por programa de computador.

13. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas **caracterizadas por** apresentarem 27 camadas de fibras poliméricas bidimensionais, com 9 padrões de alinhamento (301), (302), (303), (304), (305), (306), (307), (308) e (309), com uma espessura total de 3,24 mm.

14. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação anterior, **caracterizadas por** apresentarem um alinhamento preferencial das fibras, (i) em paralelo na sua zona superficial, (ii) não apresentarem qualquer alinhamento preferencial na zona intermédia, e (iii) na zona mais profunda as fibras estarem alinhadas de uma forma verticalizada relativamente à superfície.

15. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com o descrito em qualquer uma das reivindicações 13 ou 14, **caracterizadas por** serem aplicadas em medicina.

16. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação 15, caracterizadas por serem aplicadas em medicina regenerativa.

17. **Matrizes** tridimensionais de fibras poliméricas alinhadas, de acordo com a reivindicação 15, caracterizadas por serem aplicadas na engenharia de cartilagem.

Lisboa, 11 de dezembro de 2019.

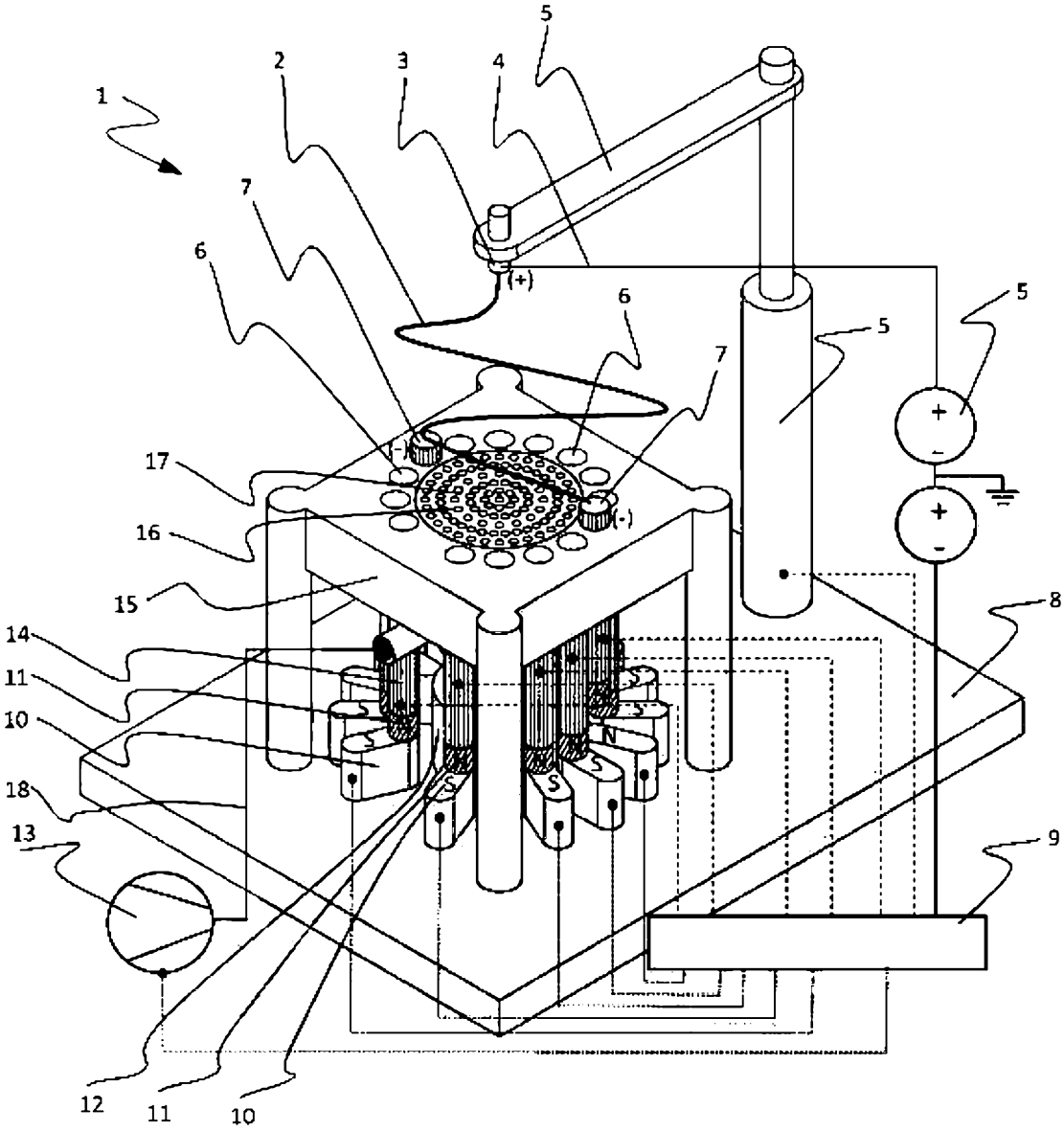


Fig. 1

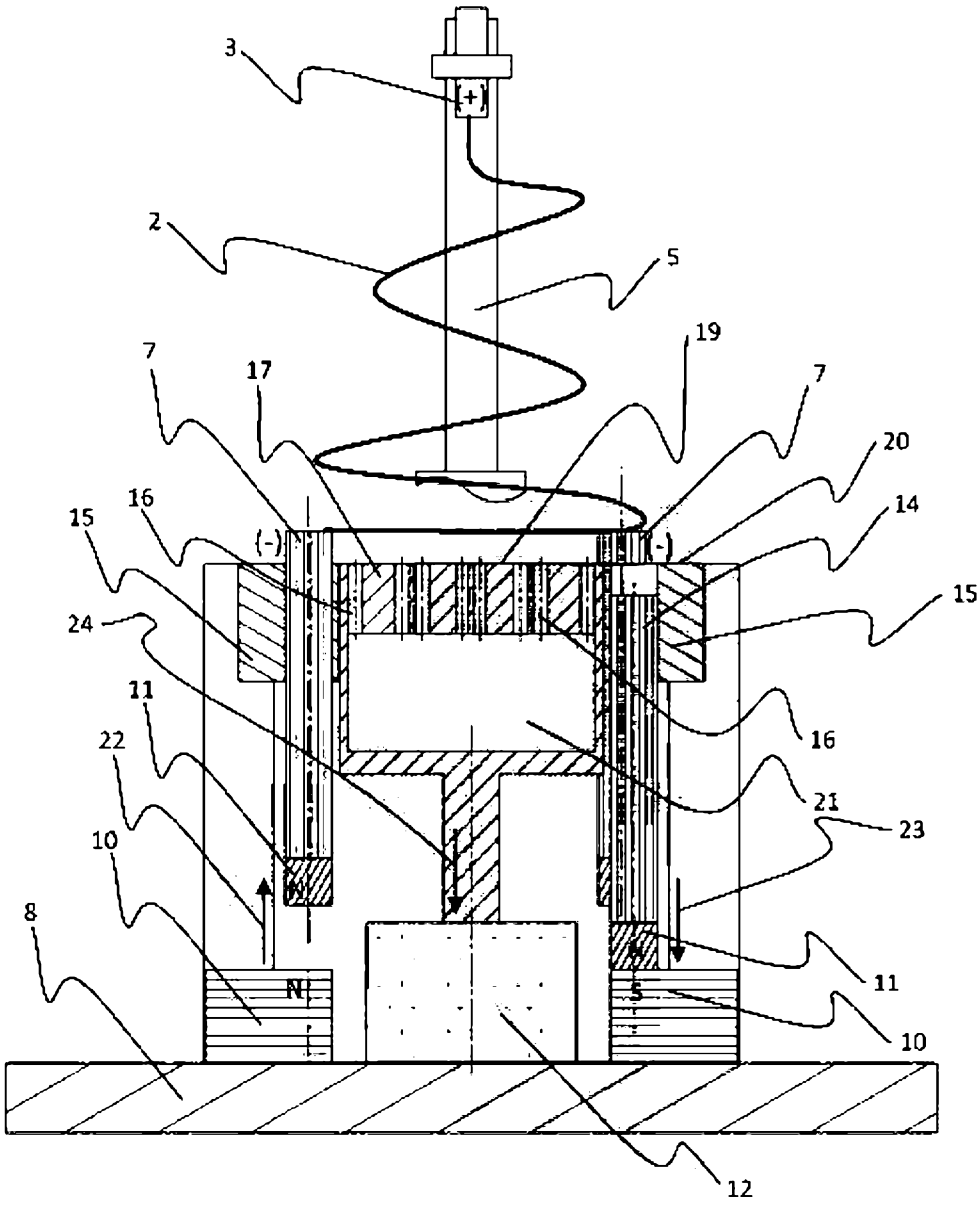


Fig. 2

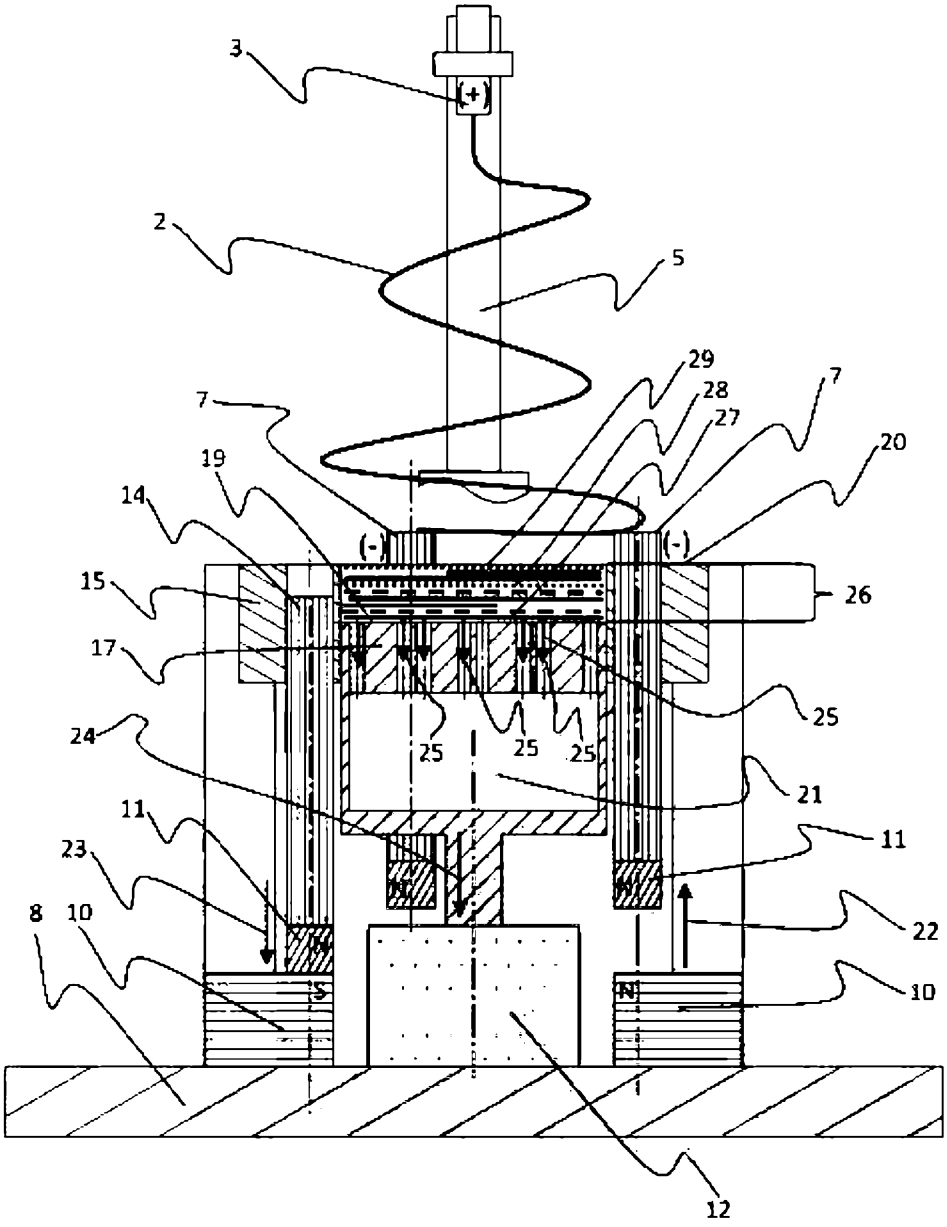

3
(+)
2
5
29
28
27
7
7
20
19
14
(-)
(-)
15
26
17
25
25
25
25
24
21
11
11
23
22
8
10
10
12

Fig. 3

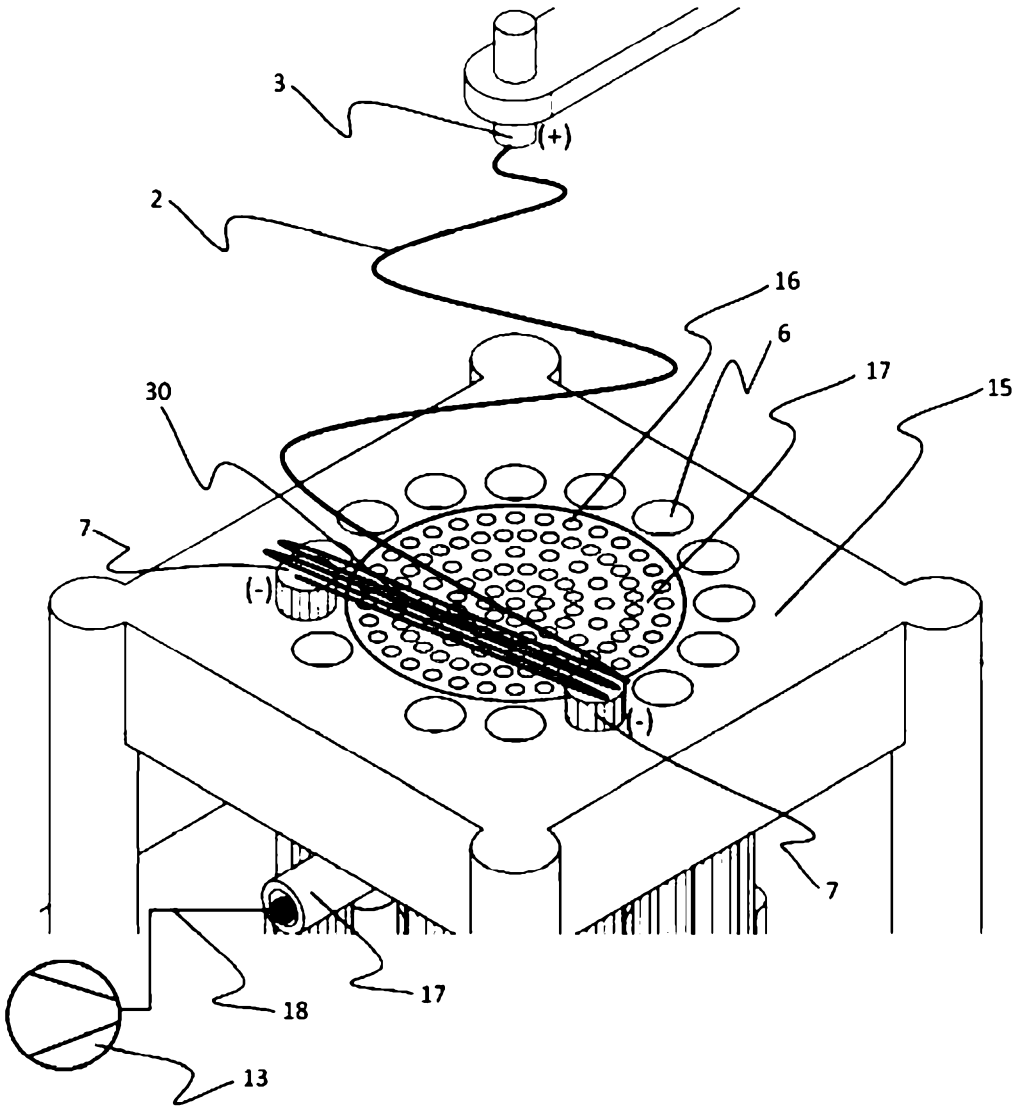


Fig. 4

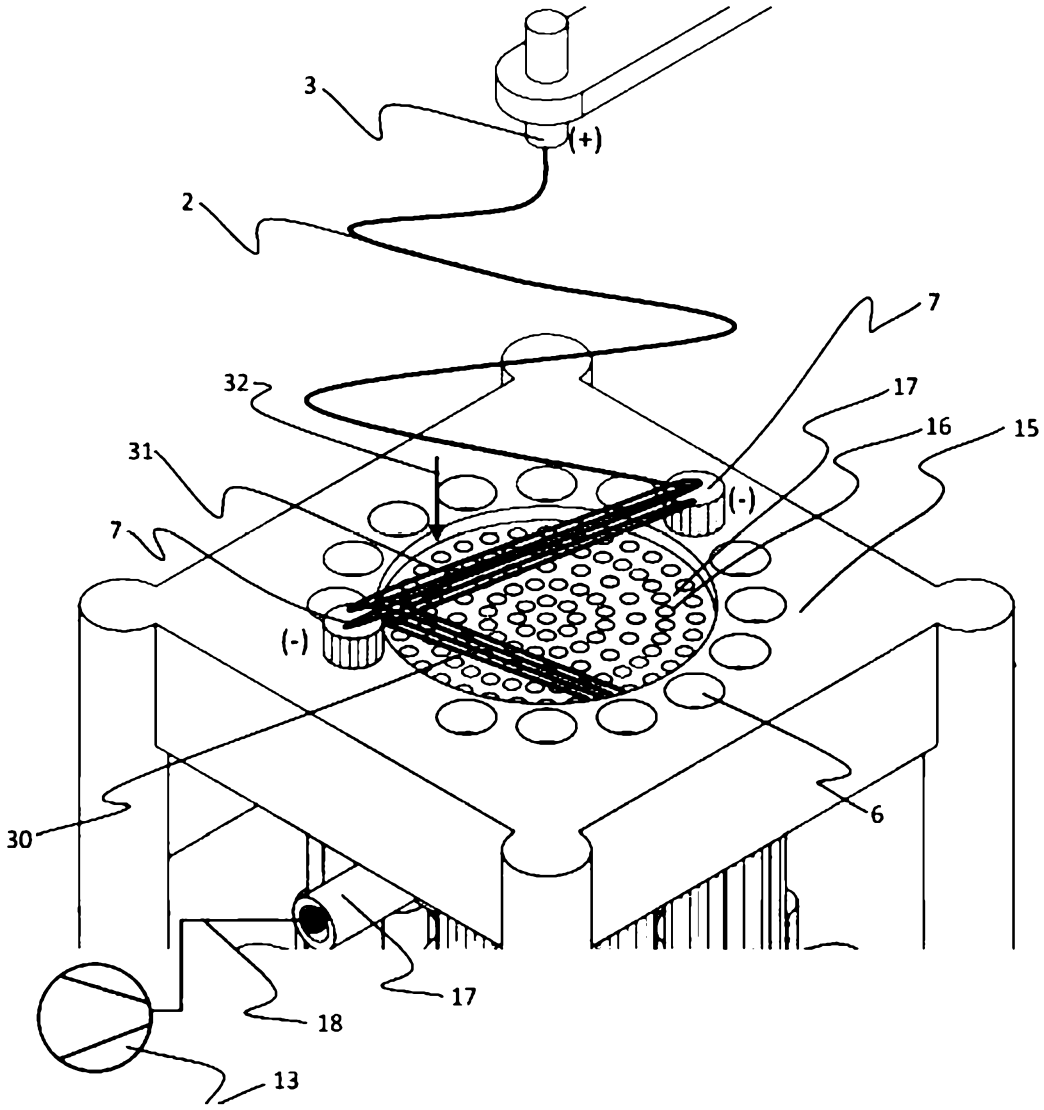


Fig. 5

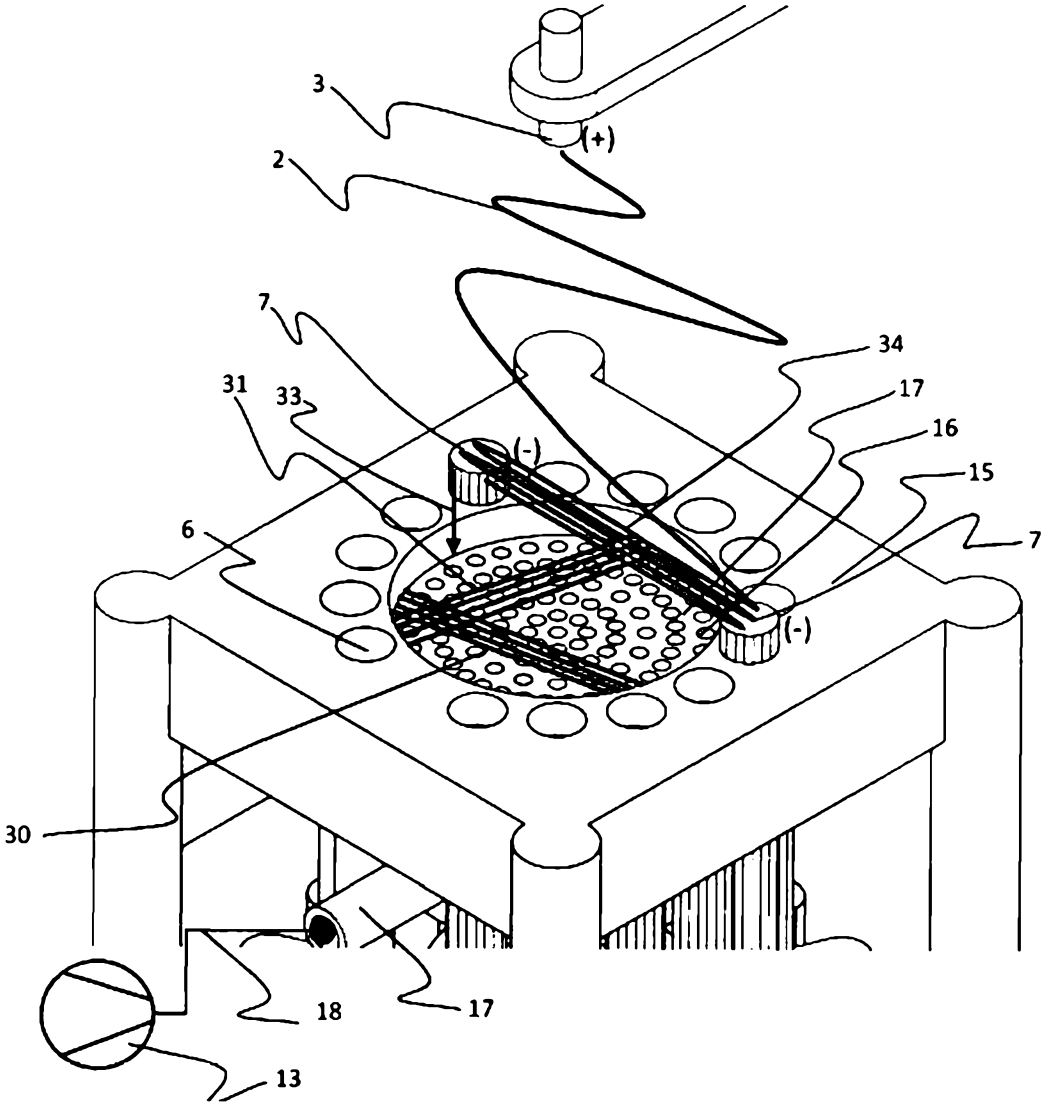


Fig. 6

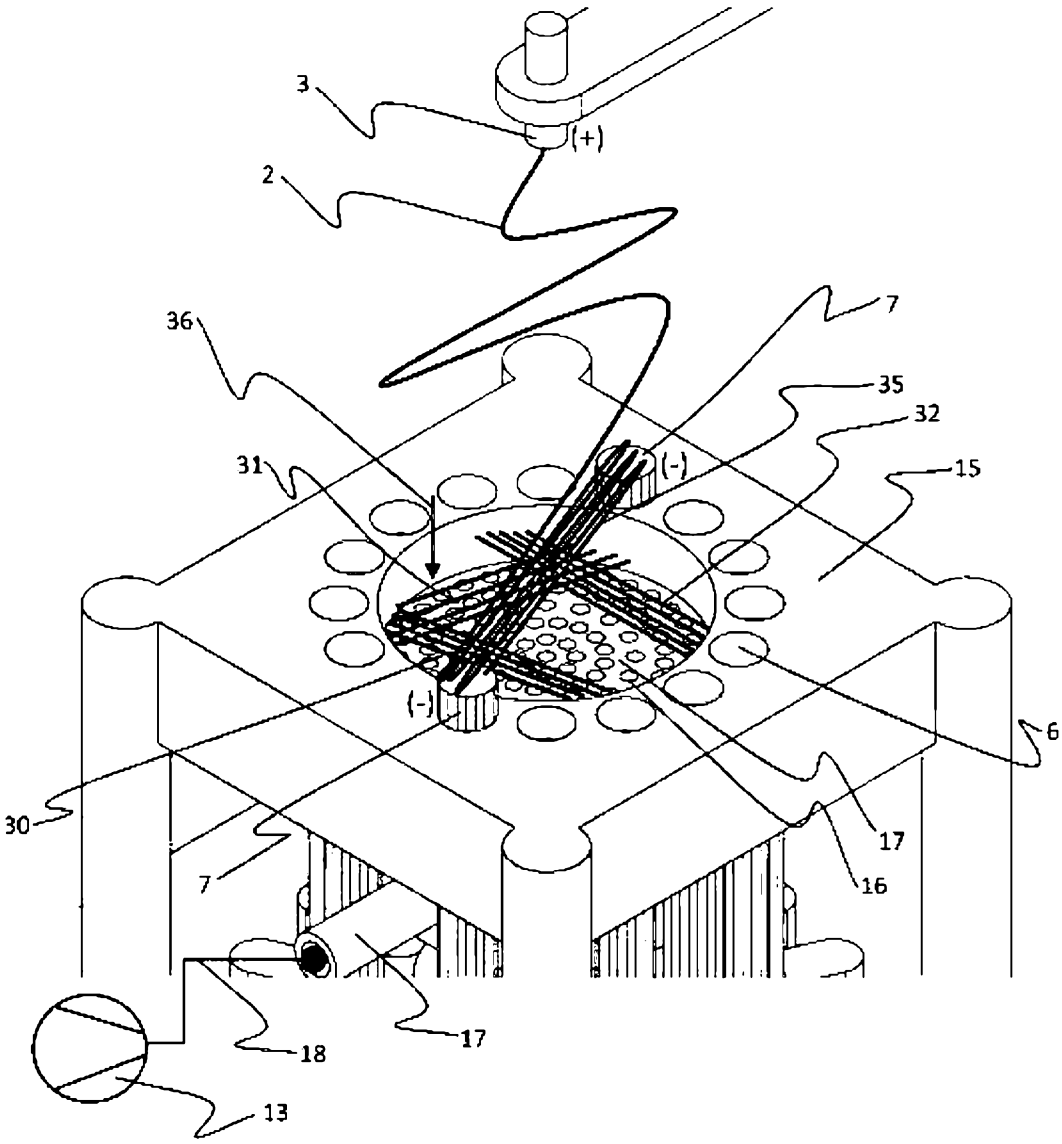


Fig. 7

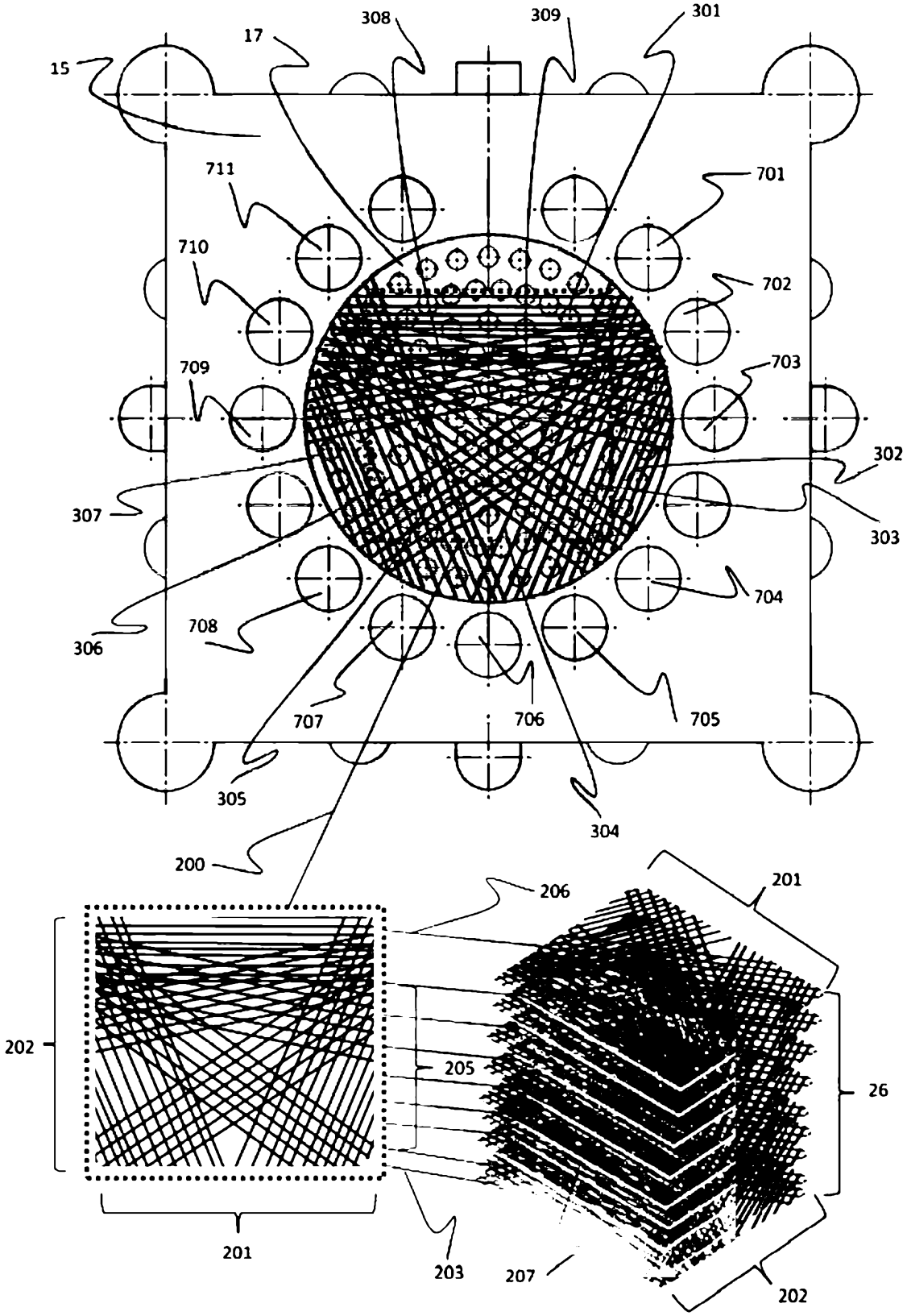

15
17
308
309
301
711
701
710
702
709
703
302
307
303
704
306
708
707
706
705
305
304
200
206
201
202
205
26
201
203
207
202

Fig. 8