

ELETROFIAÇÃO: HISTÓRICO E FUNDAMENTOS

DOI: 10.22533/at.ed.5282313121

Luiza Amim Mercante

Instituto de Química, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador – BA

Daniel Souza Correa

Laboratório Nacional de Nanotecnologia para o Agronegócio (LNNA), Embrapa Instrumentação, São Carlos – SP

1.1 Introdução

As pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de materiais nanoestruturados com desempenho aprimorado estão em constante expansão, abrangendo áreas como química, física, biologia, eletrônica, ciência e engenharia de materiais. Com o passar dos anos, novos métodos de síntese, bem como ferramentas para caracterização e manipulação foram desenvolvidos, permitindo a obtenção e aplicação de diferentes nanomateriais com novas estruturas, morfologias, composições e propriedades para aplicações em diversas áreas da ciência. O grande interesse nessa classe de materiais se deve ao fato de suas

propriedades serem significativamente diferentes daquelas apresentadas por materiais na micro- e macroescala (conhecidos como materiais volumétricos, do inglês, *bulk materials*).^{1,2}

Os nanomateriais são definidos como materiais que apresentam algumas de suas dimensões na nanoescala (ou seja, entre 1 e 100 nm).¹⁻³ Do ponto de vista de sua dimensionalidade, os nanomateriais podem ser classificados em 0D, 1D, 2D e 3D,⁴ conforme ilustrado na Figura 1.1. Os nanomateriais de dimensão zero (0D) apresentam as três dimensões na nanoescala e incluem as nanopartículas e os pontos quânticos (do inglês, *quantum dots*). Os nanomateriais unidimensionais (1D) apresentam uma de suas dimensões fora da nanoescala. Exemplos comuns de nanomateriais 1D incluem nanobastões, nanotubos, nanofios, nanofitas e nanofibras. Já os nanomateriais com apenas uma dimensão na escala nanométrica (e.g., nanofolhas, nanoplacas, filmes finos) são conhecidos como nanomateriais bidimensionais (2D).

A utilização de nanomateriais 0D, 1D e/ou 2D como blocos de construção pode levar a formação de nanoestruturas tridimensionais (3D). Além disso, materiais que apresentam poros de dimensões nanométricas também são classificados como nanoestruturas 3D. Apesar de não possuírem nenhuma dimensão externa na nanoescala, esses materiais apresentam propriedades de sistemas nanoestruturados. Para mais detalhes sobre os nanomateriais e suas propriedades, recomendamos aos leitores alguns artigos de revisão e capítulos de livros disponíveis na literatura.^{1,5-9}

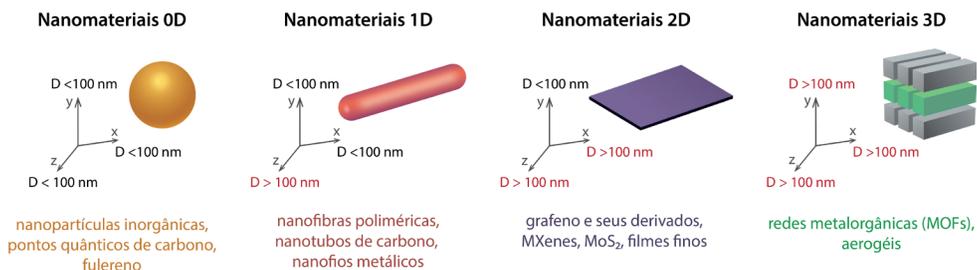


Figura 1.1. Representação de nanomateriais 0D, 1D, 2D e 3D, onde D = dimensão do material.

Dentre as diferentes nanoestruturas, os nanomateriais 1D têm atraído cada vez mais atenção por suas vantagens relacionadas à grande área de superfície específica, propriedades mecânicas aprimoradas, transporte eficiente de elétrons ao longo de uma direção, possibilidade de construção de nanodispositivos, entre outras.^{10,11} Diferentemente de outros nanomateriais, o desenvolvimento de nanoestruturas 1D foi lento até a década de 1990 devido às dificuldades de síntese de nanoestruturas com morfologia, pureza e composição química adequadas/controladas.¹² A partir da década de 1990, muitas estratégias sintéticas foram desenvolvidas visando preparar vários tipos de nanomateriais 1D.¹³⁻¹⁶ Dentre essas, a eletrofiação se destaca por ser um método simples, versátil e de baixo custo para a produção de mantas de micro/nanofibras (Fig. 1.2a-b) com elevada porosidade e alta relação área de superfície/volume, as quais podem estar dispostas de forma randômica (Fig. 1.2c) ou orientada (Fig. 1.2d). Em geral, a eletrofiação permite a produção de fibras contínuas com estruturas cilíndricas e diâmetros variando de dezenas de nanômetros a vários micrômetros. No entanto, fibras com diâmetros inferiores a 1 nm também já foram obtidas pela técnica.¹⁷ Na literatura, as fibras eletrofiadas são frequentemente denominadas nanofibras quando seus diâmetros são inferiores a 500 nm, enquanto que fibras ultrafinas são aquelas com diâmetros inferiores a 1 μm .¹⁸

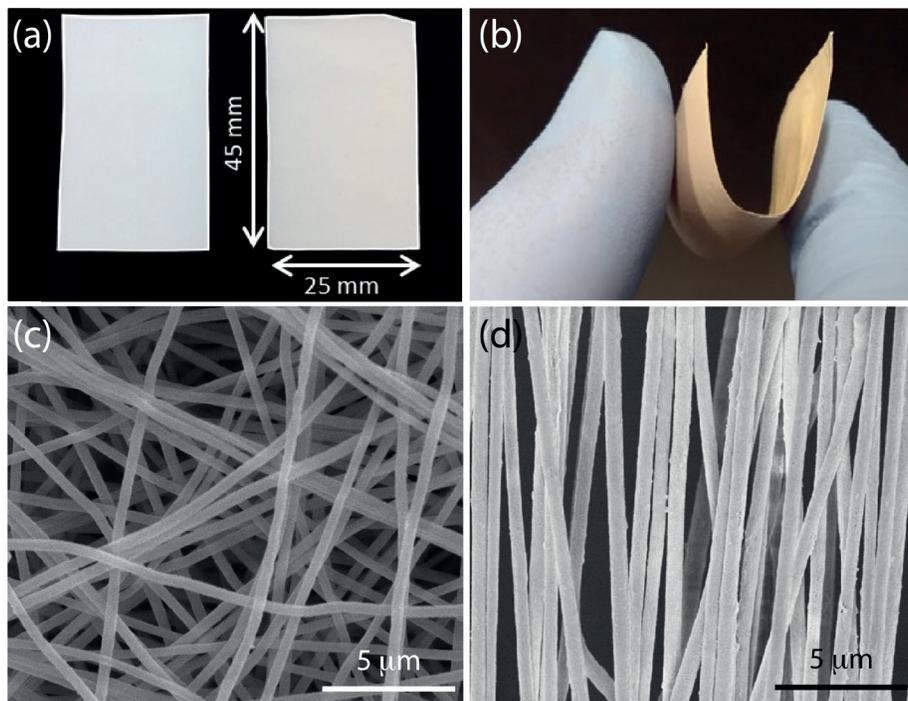


Figura 1.2. (a,b) Fotografias de mantas de poli(ácido láctico). Reimpressa com permissão da referência ¹⁹. Imagens de microscopia eletrônica de varredura de fibras (c) randomicamente orientadas²⁰ e (d) alinhadas²¹ de poliacrilonitrila. (c) Reimpressa com permissão da referência ²⁰. Copyright 2022 American Chemical Society. (d) Reimpressa da referência ²¹ sob os termos da licença Creative Commons 4.0 (CC BY). Copyright 2017 Y. Song, *et al.*

A técnica de eletrofiiação permite a obtenção de fibras com comprimento contínuo, diâmetro ajustável, composição diversa e controlável, e fácil funcionalização podendo, portanto, apresentar propriedades customizáveis.^{22–28} Motivado por essas interessantes características, o interesse global na técnica de eletrofiiação tem crescido a cada ano, de tal forma que mais de 39 mil artigos e patentes foram publicados nos últimos 20 anos, sendo aproximadamente 50% desses trabalhos nos últimos 5 anos (Fig. 1.3a). Os avanços nessa linha de pesquisa têm possibilitado a aplicação de fibras eletrofiadas em diversas áreas, incluindo meio ambiente, biomedicina, energia, sensores e alimentos (Fig. 1.3b).

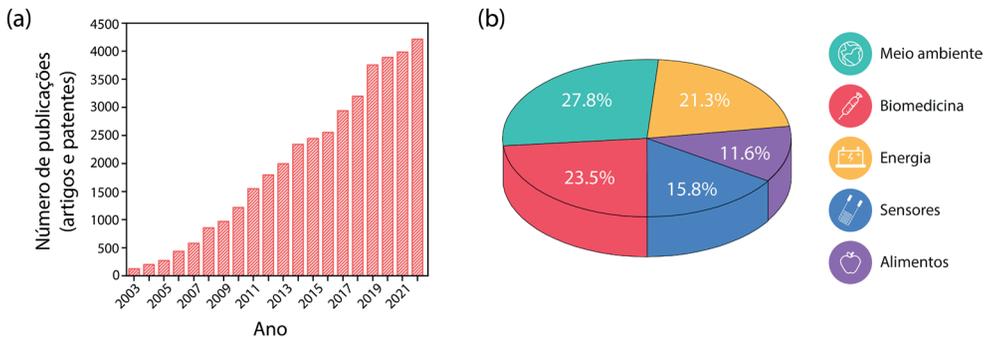


Figura 1.3. (a) Número de publicações científicas e patentes em função do ano relacionadas à técnica de eletrofiação. (b) Distribuição das publicações de acordo com as principais aplicação de fibras eletrofiadas. Pesquisa realizada na base de dados *Web of Science* usando a palavra-chave *electrospinning*, considerando dados até dezembro de 2022.

1.2 Aspectos históricos do processo de eletrofiação

A eletrofiação envolve um processo eletrohidrodinâmico (maiores detalhes no Capítulo 3), no qual uma gota de um líquido é eletrificada para gerar um jato, o qual passa por processos de estiramento e alongamento levando a formação de fibras. A técnica de eletrofiação pode ser considerada uma variante da eletropulverização (do inglês, *electrospray*), uma vez que ambas dependem do uso de um potencial elétrico para gerar jatos de líquido. A principal diferença entre os métodos reside na viscoelasticidade do líquido envolvido e, portanto, no comportamento do jato. No processo de eletrofiação, o jato deve ser mantido de forma contínua para produzir fibras. Já na eletropulverização, o jato se quebra em gotas, levando à formação de partículas.¹⁸

A Figura 1.4 apresenta um breve resumo de alguns importantes marcos históricos relacionados ao desenvolvimento da eletrofiação. O princípio físico que fundamenta o processo foi descrito pela primeira vez em 1600 por William Gilbert, o qual observou o movimento de uma gota de um líquido sob a influência de um campo elétrico produzido pela fricção do âmbar.²⁹ No século XVIII, vários trabalhos fundamentais sobre a movimentação de fluidos por forças eletrostáticas foram reportados, incluindo os de Stephen Gray,³⁰ Abbé Nollet³¹ e George Bose.³² Eles se dedicaram a estudar a relação entre tensão superficial e força eletrostática e seu efeito na emissão de gotículas de superfícies líquidas por meio da aplicação de alta voltagem.²²

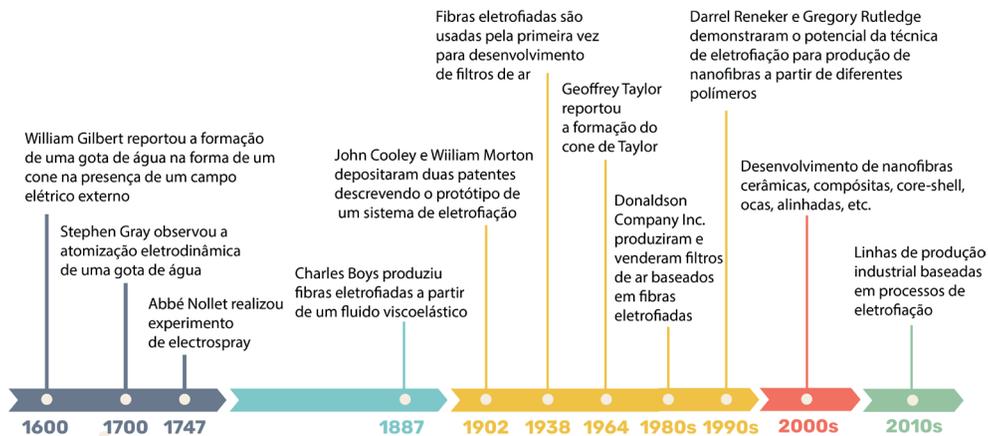


Figura 1.4. Breve resumo da história do desenvolvimento da técnica de eletrofição. Adaptada com permissão da referência ¹⁸. Copyright 2019 American Chemical Society.

Entre 1879 e 1882, Lord Rayleigh publicou uma série de trabalhos relacionados com o comportamento de gotículas carregadas. No trabalho de 1882, ele calculou a carga máxima (limite de Rayleigh) que uma gota de líquido poderia carregar antes que jatos fossem ejetados da superfície do líquido.³³ Cooley e Morton patentearam em 1900 e 1902, respectivamente, os primeiros dispositivos de eletrofição.³⁴ Mais tarde, entre 1929 e 1944, importantes contribuições para o desenvolvimento da técnica foram dadas por Formhals, que depositou 22 patentes cobrindo inúmeros aspectos do processo de eletrofição.³⁵ Em 1936, Norton solicitou a patente do processo de eletrofição por fusão. Em 1938, Rozenblum e Petryanov-Sokolov reportaram a produção de fibras eletrofiadas de acetato de celulose, as quais, em 1939, foram produzidas em larga escala pela fábrica Tver Carriage Works para fabricação de membranas filtrantes para a produção de máscaras de gás, que desde então são conhecidas na Rússia como “filtros de Petryanov”.³⁶ Mais tarde, de 1964 a 1966, Taylor publicou uma série de trabalhos descrevendo matematicamente a mudança de forma esférica para cônica de uma gota de solução polimérica/polímero fundido sob a influência de um campo elétrico.¹⁸ Especificamente, ele mostrou que se o campo elétrico aumentasse além de um nível crítico, a gota esférica evoluiria gradualmente para um cone (comumente referido como cone de Taylor) do qual emanaria um jato líquido.

Nos anos 90, vários trabalhos, notavelmente aqueles liderados por Darrell Reneker e Gregory Rutledge,³⁷⁻⁴⁴ foram fundamentais para que a eletrofição ganhasse atenção substancial tanto da academia quanto da comunidade industrial. Isso foi possível graças à maior acessibilidade a microscópios eletrônicos capazes de caracterizar a morfologia/tamanho de fibras em escala nanométrica. Em 1996, por exemplo, Reneker e Chun empregaram a técnica de eletrofição para produção de fibras a partir de mais de 20 polímeros, incluindo óxido de polietileno, poliamida, poliimida, poliaramida e polianilina.³⁸ O processo de eletrofição coaxial foi introduzido pela primeira vez em 2003, possibilitando

a obtenção de nanofibras a partir de dois ou mais tipos de soluções poliméricas.⁴⁵ Em 2004, Jirsak *et al.*⁴⁶ inventou uma tecnologia de eletrofiação sem agulha e, em seguida, a empresa tcheca Elmarco produziu a primeira máquina de eletrofiação industrial do mundo, a Nanospider™. Desde então, diversos trabalhos e patentes envolvendo a técnica de eletrofiação foram publicados, evidenciando seu potencial na obtenção de micro/nanofibras para aplicações variadas.

1.3 Princípios da técnica de eletrofiação

A configuração mais simples de um sistema de eletrofiação consiste em quatro componentes principais: uma fonte de alta tensão, uma bomba de seringa, um capilar (geralmente, uma agulha hipodérmica com ponta plana) e um coletor metálico,²⁶ conforme ilustrado na Figura 1.5a.

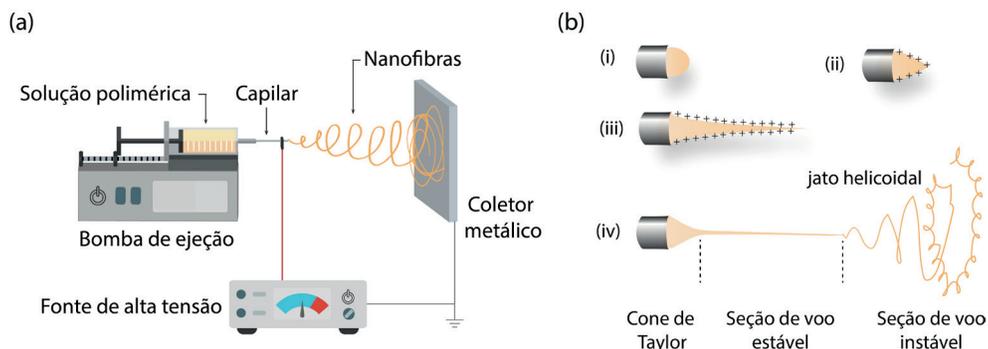


Figura 1.5. (a) Esquema de um aparato típico de eletrofiação. Adaptada da referência²⁶ sob os termos da licença Creative Commons 3.0 Brasil (CC BY 3.0 BR). Copyright 2020 L.A. Mercante, *et al.* (b) Esquema das etapas envolvidas no processo de eletrofiação para formação de fibras ultrafinas: (i) a gota da solução polimérica é mantida na ponta do capilar por forças de tensão superficial, (ii) a aplicação do campo elétrico cria cargas na superfície do líquido e, conforme a intensidade do campo aumenta, a gota hemisférica é convertida em forma cônica (cone de Taylor), (iii) quando as forças eletrostáticas repulsivas superam a força de tensão superficial da solução, um jato de fluido carregado é ejetado da ponta do cone de Taylor, (iv) o qual é estendido na direção do campo elétrico à medida que se move em direção ao coletor.

Durante o processo de eletrofiação, a solução polimérica é forçada a passar pelo capilar levando à formação de uma gota, a qual é mantida na ponta do mesmo por forças de tensão superficial (Fig. 1.5b(i)).⁴⁷ Em seguida, a aplicação do campo elétrico na extremidade do capilar induz a formação de cargas na superfície do líquido. Com o aumento gradual da tensão elétrica, mais cargas são acumuladas, elevando a densidade das cargas superficiais que residem na gota. Enquanto a tensão superficial favorece a forma esférica da gota, para minimizar a energia livre de superfície total da gota, a repulsão eletrostática tende a deformar a gota, de modo que sua área de superfície é aumentada para atenuar a repulsão.⁴⁸ Teoricamente, a diferença entre a tensão superficial da gota e

sua força repulsiva, ΔP , é dada pela equação:^{25,41}

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} - \frac{e^2}{32\varepsilon_0\pi^2R^4} ,$$

onde γ é a tensão superficial (mN m^{-1}), R é o raio da gota (m), e é a carga da gota (C), e ε_0 é a constante dielétrica (F m^{-1}).

Quando o campo elétrico aplicado atinge um valor crítico (V_c), a superfície hemisférica do fluido na ponta do capilar se alonga, adquirindo um formato cônico, conhecido como cone de Taylor (Fig. 1.5b(ii)). Neste caso, V_c pode ser calculado a partir da seguinte equação:^{18,25}

$$V_c^2 = \frac{4H^2}{L^2} \left(\left(\ln \frac{2L}{R} \right) - \frac{3}{2} \right) (0,117\pi\gamma)R_0 ,$$

onde H é a distância entre a ponta do capilar e o coletor (cm), L é o comprimento do capilar (cm) e R é o raio externo do capilar (cm). É importante destacar que V_c depende das propriedades do líquido (maiores detalhes no Capítulo 2), ou seja, quando um líquido viscoso é usado, a tensão elétrica precisa atingir um valor crítico capaz de gerar uma força de repulsão eletrostática forte o suficiente para vencer a força de tensão superficial somada à força viscoelástica do líquido.¹⁸ Quando as forças eletrostáticas repulsivas finalmente superam a força de tensão superficial da solução, um jato do fluido carregado é ejetado da ponta do cone de Taylor (Fig. 1.5b(iii)). O jato é estendido na direção do campo elétrico à medida que se move em direção ao coletor. Conforme ilustrado na Figura 1.5b(iv), o jato inicialmente segue em uma linha aproximadamente reta (também conhecida como seção de voo estável), e esse espaço é conhecido como região de campo próximo. Para que o jato se mantenha, as propriedades viscoelásticas do fluido devem ser capazes de suprimir a instabilidade de Rayleigh, evitando assim a ruptura do fluxo do líquido em gotículas.⁴⁹ Durante a aceleração do jato como uma linha reta, a tensão superficial e a força viscoelástica no jato tendem a impedir que ele se mova para frente. Como resultado, sua aceleração é gradualmente atenuada. Quando a aceleração cai para zero ou se torna constante, qualquer pequena perturbação é capaz de desestabilizar o movimento retilíneo do jato, o qual entra no regime de campo distante (também conhecido como seção de voo instável).²² Neste ponto, o jato começa a divergir e se mover ao longo de uma trajetória espiral (Fig. 1.5(iv)). Na região de campo distante, três tipos de instabilidade podem afetar o jato eletricamente carregado: a clássica instabilidade de Rayleigh e as instabilidades axissimétricas e de flexão (chicoteamento).^{43,44} As interações entre as cargas presentes no jato e o campo elétrico externo governam esses três tipos de instabilidades, fazendo com que o jato se alongue na direção de seu eixo.

Durante o processo de alongamento, o jato solidifica, formando fibras, devido à evaporação do solvente ou pelo resfriamento do polímero fundido. Quando o processo de solidificação é lento, o alongamento do jato carregado pode durar mais tempo levando à

formação de fibras com menores diâmetros. A etapa final do processo consiste na deposição de fibras no coletor aterrado. As morfologias das fibras são determinadas principalmente pelo estágio de instabilidade de flexão em que as fibras se encontram quando são depositadas.¹⁸ Após a deposição, a maioria das cargas nas fibras são rapidamente dissipadas através do coletor aterrado. No entanto, devido à baixa condutividade elétrica da maioria dos materiais empregados para obtenção de fibras, uma quantidade mensurável de cargas residuais pode permanecer na superfície das fibras coletadas.⁵⁰ Esse acúmulo de cargas residuais tende a repelir jatos com carga semelhante. Como resultado, a espessura de uma manta de fibras de polímeros isolantes é geralmente da ordem de 0,5 a 1 mm.^{18,50} Uma discussão mais detalhada sobre as etapas do processo de eletrofiação pode ser encontrada em trabalhos disponíveis na literatura.^{18,25,54,38,40,41,47,48,51-53}

Diferentes parâmetros podem influenciar a morfologia das fibras eletrofiadas resultantes, os quais podem ser amplamente classificados em: parâmetros de solução, condições de processamento e parâmetros ambientais. Com o entendimento desses parâmetros, é possível produzir estruturas fibrosas com diferentes tamanhos e morfologias, como será apresentado no Capítulo 2.

1.4 Considerações finais

Os avanços na área de eletrofiação são decorrentes de um esforço interdisciplinar, o qual vem possibilitando explorar as potencialidades de micro/nanofibras de diferentes tamanhos, morfologias e composições em diferentes aplicações. Acreditamos que essa exploração é facilitada quando conceitos básicos necessários para entender as abordagens de fabricação/aplicação são disponibilizados de forma didática. Dessa forma, esse livro tem como objetivo fornecer aos leitores os conceitos subjacentes à produção, caracterização e aplicação de fibras eletrofiadas. Sendo assim, o **Capítulo 2** tem como objetivo dar seguimento ao presente capítulo, fornecendo ao leitor uma visão qualitativa de como os diferentes parâmetros e possíveis variações do aparato experimental influenciam o processo de eletrofiação e as nanofibras resultantes. Além disso, os diversos tipos de fibras e as estratégias para modificação/funcionalização também são abordadas tendo em vista sua importância para aplicações específicas. O **Capítulo 3** apresenta uma visão matemática do processo de eletrofiação capaz de descrever os fenômenos físicos envolvidos no processo. No **Capítulo 4** são apresentadas as principais técnicas de caracterização empregadas para avaliação das características morfológicas, estruturais, mecânicas, térmicas e de superfície de fibras eletrofiadas. O **Capítulo 5** aborda a produção de fibras a partir de biopolímeros e resíduos industriais. Os aspectos envolvidos na obtenção de hidrogéis contendo fibras eletrofiadas para aplicação em liberação controlada de solutos são apresentados no **Capítulo 6**. Diferentes aplicações de fibras eletrofiadas são apresentadas nos dez capítulos seguintes. Especificamente, nos **Capítulos 7 e 8** são

destacadas as aplicações de fibras eletrofiadas na área biomédica. Os **Capítulos 9 e 10** apresentam conceitos e exemplos de fibras eletrofiadas para filtração de ar e remoção de poluentes em meios líquidos, respectivamente. Já a aplicação em processos fotocatalíticos é abordada no **Capítulo 11**. Exemplos de sensores químicos são apresentados no **Capítulo 12**. O uso de fibras eletrofiadas para biofixação de CO₂ em cultivos de microalgas e em embalagens ativas e inteligentes para alimentos é destacado nos Capítulos **13 e 14**, respectivamente. Os Capítulos **15, 16 e 17** abordam o uso de nanofibras em aplicações de energia. No **Capítulo 18** são apresentadas estratégias de processamento avançado de fibras eletrofiadas empregando laser de pulso ultrarrápido, bem como de utilização de nanofibras eletrofiadas em lasers aleatórios. Já o último capítulo (**Capítulo 19**) apresenta os aspectos relacionados à produção de fibras em larga escala por eletrofiação e por outros métodos alternativos.

REFERÊNCIAS

1. Sanfelice, R. C.; Pavinatto, A.; Corrêa, D. S.; In *Nanotecnologia Aplicada a Polímeros*; Sanfelice, R. C.; Pavinatto, A.; Corrêa, D. S., Eds.; Editora Blucher, 2022; pp. 27–48.
2. Rao, C. N. R.; Cheetham, A. K.; *J. Mater. Chem.* **2001**, *11*, 2887.
3. Pokropivny, V. V.; Skorokhod, V. V.; *Phys. E Low-Dimensional Syst. Nanostructures* **2008**, *40*, 2521.
4. Pokropivny, V. V.; Skorokhod, V. V.; *Mater. Sci. Eng. C* **2007**, *27*, 990.
5. Gleiter, H.; *Acta Mater.* **2000**, *48*, 1.
6. Saleh, T. A.; *Environ. Technol. Innov.* **2020**, *20*, 101067.
7. Roduner, E.; *Chem. Soc. Rev.* **2006**, *35*, 583.
8. Van de Voorde, M.; Tulinski, M.; Jurczyk, M.; In *Metrology and Standardization of Nanotechnology*; Mansfield, E.; Kaiser, D. L.; Fujita, D.; Voorde, M. Van de, Eds.; Wiley-VCH Verlag, 2017; pp. 49–74.
9. Dolez, P. I.; In *Nanoengineering: Global Approaches to Health and Safety Issues*; Dolez, P. I., Ed.; Elsevier, 2015; pp. 3–40.
10. Li, Y.; Zhu, J.; Cheng, H.; Li, G.; Cho, H.; Jiang, M.; Gao, Q.; Zhang, X.; *Adv. Mater. Technol.* **2021**, *6*, 2100410.
11. Gong, S.; Cheng, W.; *Adv. Electron. Mater.* **2017**, *3*, 1600314.
12. Li, Z.; Wang, C.; *One-Dimensional Nanostructures Electrospinning Technique and Unique Nanofiber*; Springer, 2013.
13. Li, H.; Ke, Y.; Hu, Y.; *J. Appl. Polym. Sci.* **2006**, *99*, 1018.

14. Beachley, V.; Wen, X.; *Prog. Polym. Sci.* **2010**, *35*, 868.
15. Zhao, J.; Han, W.; Chen, H.; Tu, M.; Zeng, R.; Shi, Y.; Cha, Z.; Zhou, C.; *Carbohydr. Polym.* **2011**, *83*, 1541.
16. Rodrigues, B. V. M.; Andre, R. da S.; Mercante, L. A.; Corrêa, D. S.; In *Nanotecnologia Aplicada a Polímeros*; Sanfelice, R. C.; Pavinatto, A.; Corrêa, D. S., Eds.; Editora Blucher, 2022; pp. 197–232.
17. Jian, S.; Zhu, J.; Jiang, S.; Chen, S.; Fang, H.; Song, Y.; Duan, G.; Zhang, Y.; Hou, H.; *RSC Adv.* **2018**, *8*, 4794.
18. Xue, J.; Wu, T.; Dai, Y.; Xia, Y.; *Chem. Rev.* **2019**, *119*, 5298.
19. Locilento, D. A.; Produção E Caracterização De Mantas De Nanofibras Poliméricas Eletrofiadas Contendo Proantocianidinas E Sua Potencial Aplicação No Tratamento De Lesões Cutâneas, Universidade Federal de São Carlos, 2018.
20. Facure, M. H. M.; Mercante, L. A.; Correa, D. S.; *ACS Appl. Nano Mater.* **2022**, *5*, 6376.
21. Song, Y.; Sun, Z.; Xu, L.; Shao, Z.; *Polymers (Basel)*. **2017**, *9*.
22. Si, Y.; Shi, S.; Hu, J.; *Nano Today* **2023**, *48*, 101723.
23. Peng, R.; Zhang, S.; Yao, Y.; Wang, J.; Zhu, X.; Jiang, R.; Zhang, J.; Zhang, W.; Wang, C.; *Chem. Eng. J.* **2023**, *453*, 139669.
24. Medeiros, G. B.; Lima, F. de A.; de Almeida, D. S.; Guerra, V. G.; Aguiar, M. L.; *Membranes (Basel)*. **2022**, *12*, 861.
25. Shi, S.; Si, Y.; Han, Y.; Wu, T.; Iqbal, M. I.; Fei, B.; Li, R. K. Y.; Hu, J.; Qu, J.; *Adv. Mater.* **2022**, *2107938*, 2107938.
26. Mercante, L.; Andre, R.; Macedo, J.; Pavinatto, A.; Correa, D.; *Quim. Nova* **2021**, *44*, 717.
27. Mercante, L. A.; Scagion, V. P.; Migliorini, F. L.; Mattoso, L. H. C.; Correa, D. S.; *TrAC - Trends Anal. Chem.* **2017**, *91*, 91.
28. Costa, R. G. F.; De Oliveira, J. E.; De Paula, G. F.; De Picciani, P. H. S.; De Medeiros, E. S.; Ribeiro, C.; Mattoso, L. H. C.; *Polimeros* **2012**, *22*, 178.
29. Ghosal, K.; Agatemor, C.; Tucker, N.; Kny, E.; In *Electrospinning: From Basic Research to Commercialization*; The Royal Society of Chemistry, 2018; pp. 1–23.
30. Sir, S.; Society, R.; *Philos. Trans. R. Soc. London* **1731**, *37*, 227.
31. Dumont, Q.; Cole, R. B.; *Mass Spectrom. Rev.* **2014**, *33*, 418.
32. Drozin, V. G.; *J. Colloid Sci.* **1955**, *10*, 158.
33. Rayleigh, Lord; *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.* **1882**, *14*, 184.

34. Greiner, A.; Wendorff, J. H.; *Angew. Chemie - Int. Ed.* **2007**, *46*, 5670.
35. Tucker, N.; Stanger, J. J.; Staiger, M. P.; Razzaq, H.; Hofman, K.; *J. Eng. Fiber. Fabr.* **2012**, *7*, 63.
36. Guo, Y.; Wang, X.; Shen, Y.; Dong, K.; Shen, L.; Alzalab, A. A. A.; *J. Mater. Sci.* **2022**, *57*, 58.
37. Doshi, J.; Reneker, D. H.; In *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*; IEEE, 1993; Vol. 3, pp. 1698–1703.
38. Reneker, D. H.; Chun, I.; *Nanotechnology* **1996**, *7*, 216.
39. Fong, H.; Chun, I.; Reneker, D. .; *Polymer (Guildf)*. **1999**, *40*, 4585.
40. Reneker, D. H.; Yarin, A. L.; Fong, H.; Koombhongse, S.; *J. Appl. Phys.* **2000**, *87*, 4531.
41. Yarin, A. L.; Koombhongse, S.; Reneker, D. H.; *J. Appl. Phys.* **2001**, *90*, 4836.
42. Hohman, M. M.; Shin, M.; Rutledge, G.; Brenner, M. P.; *Phys. Fluids* **2001**, *13*, 2221.
43. Hohman, M. M.; Shin, M.; Rutledge, G.; Brenner, M. P.; *Phys. Fluids* **2001**, *13*, 2201.
44. Shin, Y. M.; Hohman, M. M.; Brenner, M. P.; Rutledge, G. C.; *Appl. Phys. Lett.* **2001**, *78*, 1149.
45. Sun, Z.; Zussman, E.; Yarin, A. L.; Wendorff, J. H.; Greiner, A.; *Adv. Mater.* **2003**, *15*, 1929.
46. Oldrich Jirsak; FilipSanetnik; David Lukas; Vaclav, K. L. M. J. C.; Method of nanofibers production from a polymer solution using electrostatic spinning and a device for carrying out the method. **2009**.
47. Rutledge, G. C.; Fridrikh, S. V.; *Adv. Drug Deliv. Rev.* **2007**, *59*, 1384.
48. Reneker, D. H.; Hao, F.; *ACS Symp. Ser.* **2006**, *918*, 1.
49. Ewaldz, E.; Brettmann, B.; *ACS Appl. Polym. Mater.* **2019**, *1*, 298.
50. Han, T.; Reneker, D. H.; Yarin, A. L.; *Polymer (Guildf)*. **2008**, *49*, 2160.
51. Reneker, D. H.; Yarin, A. L.; *Polymer (Guildf)*. **2008**, *49*, 2387.
52. Reneker, D. H.; Yarin, A. L.; Zussman, E.; Xu, H.; *Adv. Appl. Mech.* **2007**, *41*, 43.
53. Yarin, A. L.; Koombhongse, S.; Reneker, D. H.; *J. Appl. Phys.* **2001**, *89*, 3018.
54. Costa, R. G. F.; De Oliveira, J. E.; De Paula, G. F.; De Picciani, P. H. S.; De Medeiros, E. S.; Ribeiro, C.; Mattoso, L. H. C.; *Polimeros* **2012**, *22*, 170.

SOBRE OS AUTORES



LUIZAAMIMMERCANTE: Possui graduação (2008) e doutorado (2013) em Química pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Fez estágio de pesquisa (*visiting scholar*) durante o doutorado na Universidade de Massachussets (UMASS – Amherst/USA). Realizou pós-doutorado no Laboratório Nacional de Nanotecnologia Aplicada ao Agronegócio (LNNA) – Embrapa Instrumentação e no Instituto Catalão de Nanociência e Nanotecnologia (ICN2 – Barcelona/Espanha). É professora do Instituto de Química da Universidade Federal da Bahia (UFBA) desde 2019. Desenvolve pesquisas na área de química de (nano)materiais, com ênfase no desenvolvimento de materiais nanoestruturados para aplicações biomédicas e ambientais.

<http://lattes.cnpq.br/4746829076971556>



DANIEL SOUZA CORRÊA: Possui graduação em Engenharia de Materiais (2004) pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais (2009) pela Universidade de São Paulo (USP), e pós-doutorado no Instituto de Física de São Carlos – USP (2010). Fez estágio de pesquisa (*visiting scholar*) durante o doutorado na Harvard University (USA) e durante a graduação na Friedrich-Schiller-University, Jena (Alemanha). É Pesquisador A da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desde 2010, atuando na unidade Embrapa Instrumentação, e atualmente Chefe de P&D desta unidade. É bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq desde 2012, e também atua como professor orientador credenciado em programas de pós-graduação na UFSCar e na USP. É Editor Associado de 3 revistas científicas internacionais. Tem experiência na área de Ciência e Engenharia de Materiais e Nanotecnologia, com foco em polímeros e nanomateriais compósitos para aplicações na agricultura, meio ambiente e biotecnologia.

<http://lattes.cnpq.br/0461451015026948>