



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PRODUÇÃO DE NANOFIBRAS DE PVA VIA ELETROFIAÇÃO DE BAIXO CUSTO:
EFEITO DA VISCOSIDADE E DISTÂNCIA DE TRABALHO NA MORFOLOGIA**

ADRIEL THOMAS DOS SANTOS

Foz do Iguaçu
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

ENGENHARIA DE MATERIAIS

**PRODUÇÃO DE NANOFIBRAS DE PVA VIA ELETROFIAÇÃO DE BAIXO CUSTO:
EFEITO DA VISCOSIDADE E DISTÂNCIA DE TRABALHO NA MORFOLOGIA**

ADRIEL THOMAS DOS SANTOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dra. Priscila Lemes

Foz do Iguaçu
2025

ADRIEL THOMAS DOS SANTOS

**PRODUÇÃO DE NANOFIBRAS DE PVA VIA ELETROFIAÇÃO DE BAIXO CUSTO:
EFEITO DA VISCOSIDADE E DISTÂNCIA DE TRABALHO NA MORFOLOGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof. Dra. Priscila Lemes
UNILA

Prof. Dra. Liliane Cristina Battirola
UNIOESTE

Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu
UNILA

Foz do Iguaçu, 08 de dezembro de 2025.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal da Integração Latino-Americana (UNILA) que foi a minha casa nos últimos anos.

À minha orientadora Dra. Priscila, à banca examinadora e a todos os professores do curso que plantaram uma semente, e agora eu colho os frutos.

Aos meus familiares que sempre me apoiaram em tudo, em especial aos meus pais Adriana e Admilson, que como professores, me ensinaram desde cedo a importância da educação.

À minha madrinha Andréia que foi minha segunda mãe, e ao Charles.

E a minha futura esposa Maria, que já divide a vida há 8 anos comigo.

Mude, mas comece devagar, porque a direção é mais importante que a velocidade. [...] tente o novo todo dia, o novo lado, o novo método, o novo sabor, o novo jeito, o novo prazer, o novo amor. [...] lembre-se que a Vida é uma só. [...] se você não encontrar razões para ser livre, invente-as. Seja criativo.

Edson Marques, Mude

RESUMO

A eletrofiação (*electrospinning*) é uma técnica consolidada para a produção de nanoestruturas, contudo, o elevado custo dos equipamentos comerciais limita seu acesso em ambientes educacionais e de pesquisa com recursos escassos. Este trabalho teve como objetivo desenvolver, construir e validar um dispositivo de eletrofiação portátil e de baixo custo, totalizando um investimento de R\$ 215,50. O equipamento operou com uma fonte de alta tensão fixa de 10 kV e um sistema de injeção manual, controlado visualmente pela estabilidade do Cone de Taylor. Para a validação experimental, foram processadas soluções aquosas de álcool polivinílico (PVA) com massa molar de 104.500 g/mol nas concentrações de 5, 10 e 15% (m/m), variando-se a distância de trabalho em 5, 10 e 15 cm. As análises morfológicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) demonstraram que a concentração de 5% resultou apenas na formação de gotas (*electrospraying*), indicando um regime diluído insuficiente para o emaranhamento de cadeias. A concentração de 10% revelou-se ótima (regime semidiluído emaranhado), produzindo nanofibras uniformes com diâmetro médio de 209 nm. Já a solução de 15% apresentou fibras espessas e fundidas, devido à alta viscosidade e dificuldade de evaporação do solvente nas condições de umidade (58%) e temperatura (20°C) do ensaio. Contrariando a literatura clássica, observou-se que o aumento da distância de trabalho resultou no aumento do diâmetro das fibras, fenômeno justificado pela redução da intensidade do campo elétrico (de 2 kV/cm para 0,66 kV/cm) em um sistema de voltagem fixa. Conclui-se que o dispositivo desenvolvido é tecnicamente viável para a produção de nanofibras, validando a substituição da bomba de infusão pela alimentação manual para fins didáticos e aplicações exploratórias.

Palavras-chave: Eletrofiação; instrumentação de baixo custo; PVA; nanofibras; morfologia.

RESUMEN

El electrohilado (*electrospinning*) es una técnica consolidada para la producción de nanoestructuras; sin embargo, el alto costo de los equipos comerciales limita su acceso en entornos educativos y de investigación con recursos escasos. Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar, construir y validar un dispositivo de electrohilado portátil y de bajo costo, totalizando una inversión de R\$ 215,50. El equipo operó con una fuente de alta tensión fija de 10 kV y un sistema de inyección manual, controlado visualmente por la estabilidad del Cono de Taylor. Para la validación experimental, se procesaron soluciones acuosas de Poli(alcohol vinílico) (PVA) con masa molar de 104.500 g/mol en concentraciones de 5, 10 y 15% (m/m), variando la distancia de trabajo en 5, 10 y 15 cm. Los análisis morfológicos por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) demostraron que la concentración del 5% resultó solo en la formación de gotas (*electrospraying*), indicando un régimen diluido insuficiente para el entrelazamiento de cadenas. La concentración del 10% resultó óptima (régimen semidiluido entrelazado), produciendo nanofibras uniformes con diámetro medio de 209 nm. Por otro lado, la solución del 15% presentó fibras gruesas y fundidas, debido a la alta viscosidad y la dificultad de evaporación del solvente en las condiciones de humedad (58%) y temperatura (20°C) del ensayo. Contrariamente a la literatura clásica, se observó que el aumento de la distancia de trabajo resultó en el aumento del diámetro de las fibras, fenómeno justificado por la reducción de la intensidad del campo eléctrico (de 2 kV/cm a 0,66 kV/cm) en un sistema de voltaje fijo. Se concluye que el dispositivo desarrollado es técnicamente viable para la producción de nanofibras, validando la sustitución de la bomba de jeringa por la alimentación manual para fines didácticos y aplicaciones exploratorias.

Palabras clave: Electrohilado; instrumentación de bajo costo; PVA; nanofibras; morfología.

ABSTRACT

Electrospinning is a consolidated technique to produce nanostructures; however, the high cost of commercial equipment limits its access in educational and research environments with scarce resources. This work aimed to develop, build, and validate a low-cost portable electrospinning device, totaling an investment of BRL 215.50. The equipment operated with a fixed high-voltage power supply of 10 kV and a manual injection system, visually controlled by the stability of the Taylor Cone. For experimental validation, aqueous solutions of Poly(vinyl alcohol) (PVA) with a molar mass of 104,500 g/mol were processed at concentrations of 5, 10, and 15% (w/w), varying the working distance at 5, 10, and 15 cm. Morphological analyses by Scanning Electron Microscopy (SEM) demonstrated that the 5% concentration resulted only in the formation of droplets (electrospraying), indicating a dilute regime insufficient for chain entanglement. The 10% concentration proved to be optimal (semidilute entangled regime), producing uniform nanofibers with an average diameter of 209 nm. Conversely, the 15% solution presented thick and fused fibers due to high viscosity and difficulty in solvent evaporation under the test conditions of humidity (58%) and temperature (20°C). Contrary to classical literature, it was observed that increasing the working distance resulted in increased fiber diameter, a phenomenon justified by the reduction in electric field strength (from 2 kV/cm to 0.66 kV/cm) in a fixed-voltage system. It is concluded that the developed device is technically viable for nanofiber production, validating the replacement of the syringe pump with manual feeding for didactic purposes and exploratory applications.

Keywords: Electrospinning; low-cost instrumentation; PVA; nanofibers; morphology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação das classificações de nanomateriais.	15
Figura 2 - Diagrama do a) aparato para dispersar fluidos eletricamente carregados (patente US692631A) e do b) aparato para preparar fios artificiais (patente US1975504A).	16
Figura 3 - Esquema da construção de um modelo simplificado de eletrofiação.	16
Figura 4 - Fotografias da evolução do formato de uma gota de uma solução de óxido de polietileno (PEO) conforme aplicado um campo elétrico.	17
Figura 5 – Esquema do processo de eletrofiação.	18
Figura 6 – Representação visual dos regimes de emaranhamento das cadeias poliméricas.	20
Figura 7 – Imagens MEV do PVA (M_w 88.000; Grau de hidrólise 98%) com diferentes concentrações: a) 6, b) 8, c) 10, d)12, e) 13, f) 14 % (ampliação de 5.000x).	21
Figura 8 - Imagens MEV de fibras de PVA a 10% (p/v) em diferentes distâncias de coleta. a) 5, b) 10, c) 15 e d) 20 cm.	23
Figura 9 - Fotografias de aplicação <i>in situ</i> utilizando um equipamento portátil de eletrofiação. a) Eletrofiação <i>in situ</i> na ferida do rato. b) Formação do cone de Taylor e das fibras. c) Membranas eletrofiadas. d) Membrana retirada da ferida do rato.	24
Figura 10 – Equipamentos de eletrofiação. a) equipamento simplificado e portátil com fonte de 10kV. b) equipamento convencional da DBM eletrotech com bomba de seringa.	25
Figura 11 - Representação das peças necessárias para compor a fonte de alta tensão. .	30
Figura 12 - Janela com as ferramentas e análise da imagem morfológica do Software ImageJ.	32
Figura 13 – Fotografia do protótipo de eletrofiação.	33
Figura 14 - Vistas do protótipo de eletrofiação de baixo custo.	34
Figura 15 - Fotografia do processo de eletrofiação com solução de 5% (m/m) de PVA. ..	36
Figura 16 – Fotografia do processo de eletrofiação com solução de 10% (m/m) de PVA.	37
Figura 17 - Fotografia do processo de eletrofiação com solução de 15% (m/m) de PVA.	37
Figura 18 – Imagens morfológicas das soluções de PVA eletrofiadas a 5 cm de distância de trabalho com ampliação de 15.000 X. a) 10% de PVA. b) 15% de PVA.	38
Figura 19 – Imagens MEV das redes de nanofibras de soluções de PVA em concentrações de 10 e 15% e distâncias de trabalho de 5, 10 e 15 cm. Ampliação de 10.000x.	39
Figura 20 - Relação entre concentração, distância de trabalho e diâmetro médio das mantas nanofibrosas.	40
Figura 21 – Amostras de PVA 10% (m/m) coletadas a 5 cm com ampliações de a) 20.000x.	

b) 10.000x. c) 2.500x. d) 1.000x. A 10 cm e) 20.000x. f) 10.000x. g) 2.500x. h) 1.000x. E a 15 cm i) 20.000x. j) 10.000x. k) 2.500x. l) 1.000x.46

Figura 22 – Amostras de PVA 15% (m/m) coletadas a 5 cm com ampliações de a) 20.000x. b) 10.000x. c) 2.500x. d) 1.000x. A 10 cm e) 20.000x. f) 10.000x. g) 2.500x. h) 1.000x. E a 15 cm i) 20.000x. j) 10.000x. k) 2.500x. l) 1.000x.47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista dos componentes do equipamento de eletrofição de baixo custo com seus respectivos custos unitários.....	34
Tabela 2 - Valores de viscosidade de soluções de PVA com diferentes concentrações e o spindle utilizado para realizar as medições.	36
Tabela 3 – Valores de diâmetro médio da rede de nanofibras de PVA eletrofiadas em concentrações de 5, 10 e 15% a 5, 10 e 15 cm de distância de trabalho sob tensão de 10kV.	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVO GERAL	13
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 NANOFIBRAS E PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO	14
2.2 PARÂMETROS CRÍTICOS DA ELETROFIAÇÃO.....	18
2.2.1 Parâmetros da Solução	19
2.2.1.1 <i>Massa Molar</i>	19
2.2.1.2 <i>Concentração e Viscosidade</i>	19
2.2.1.3 <i>Condutividade</i>	21
2.2.2 Parâmetros de Processo	22
2.2.2.1 <i>Tensão Elétrica</i>	22
2.2.2.2 <i>Distância de Trabalho</i>	22
2.2.2.3 <i>Vazão</i>	24
2.2.2.4 <i>Coletor</i>	25
2.2.3 Parâmetros Ambientais.....	26
2.2.3.1 <i>Temperatura</i>	26
2.2.3.2 <i>Umidade</i>	26
2.3 MATERIAIS PARA ELETROFIAÇÃO	27
2.3.1 Polímeros usados na eletrofiação.....	27
2.3.2. Álcool polivinílico (PVA)	27
3. METODOLOGIA	29
3.1 MATERIAIS.....	29
3.2 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ELETROFIAÇÃO DE BAIXO CUSTO	29
3.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES POLIMÉRICAS	30
3.4 PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO	31
3.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS NANOFIBRAS.....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO	33
4.2 CONCENTRAÇÃO E VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO POLIMÉRICA	35
4.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE TRABALHO NA MORFOLOGIA	38
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41

REFERÊNCIAS	43
APÊNDICES.....	46
APÊNDICE A – IMAGENS MEV DE AMOSTRAS DE PVA	46

1 INTRODUÇÃO

A nanociência é a área multidisciplinar que estuda os materiais na escala nanométrica, suas propriedades, vantagens e efeitos práticos (Associação Brasileira De Normas Técnicas, 2024). Dentro das divisões da nanociência, encontram-se as nanofibras, que são uma classe que explora as altas áreas superficiais e conseqüentemente a reatividade em diversas aplicações. De modo geral, a redução do diâmetro das fibras da escala macro para nano promove um maior controle sobre a porosidade em mantas, e uma maior razão área/volume, aprimorando o encapsulamento de aditivos (Ramakrishna *et al.*, 2005).

Dentre as técnicas utilizadas para produção de nanofibras, destaca-se a eletrofição pela versatilidade. Esta técnica usa fontes de alta tensão para induzir um efeito denominado Cone de Taylor em uma gota de solução polimérica estirada por um capilar. O Cone de Taylor é responsável por criar uma estrutura de menisco cônico e ejetar um jato da gota, reduzindo seu diâmetro durante a trajetória pelo ar em direção a um coletor metálico. Assim, conforme a fibra é depositada na placa fixa, cria-se uma manta porosa, que pode ser retirada do coletor e utilizada em diversas aplicações (Reneker; Yarin, 2008).

Uma barreira para a acessibilidade da técnica é o custo elevado de investimento em equipamentos comerciais. Levando isso em consideração, diferentes trabalhos nos últimos anos têm concentrado esforços na redução de custos das peças que compõem um eletrofiador. Dentre essas, a fonte de alta tensão, o aparato para promover a vazão da solução e o tipo de coletor são os principais mecanismos que habilitam a formação das nanofibras.

Equipamentos simplificados, como o construído por Santos (2023), podem ser equiparados aos convencionais a certos níveis. Resultados positivos estão sendo publicados, demonstrando a capacidade de protótipos de criarem redes de nanofibras equivalentes. Com isso em mente, cada vez mais artigos discutem os efeitos do processo, pois as variáveis, principalmente a vazão, não permitem um controle preciso do resultado.

Por fim as aplicações podem extrapolar o esperado, desde liberação rápida ou controlada de fármacos, até filtração de certos elementos. A técnica tem se mostrado importante para a evolução de diversas áreas da física, química e biomédica, explicitando as vantagens da nanotecnologia.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e caracterizar nanofibras de PVA/água deionizada utilizando um sistema de eletrofição de baixo custo, avaliando a influência dos parâmetros de solução e processo na morfologia das fibras.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Construir um sistema de eletrofição de baixo custo.
- b) Eletrofiar soluções de PVA/água deionizada.
- c) Investigar o efeito da concentração e viscosidade na morfologia das fibras.
- d) Analisar a variação do diâmetro médio das fibras com o aumento da viscosidade e distância de trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

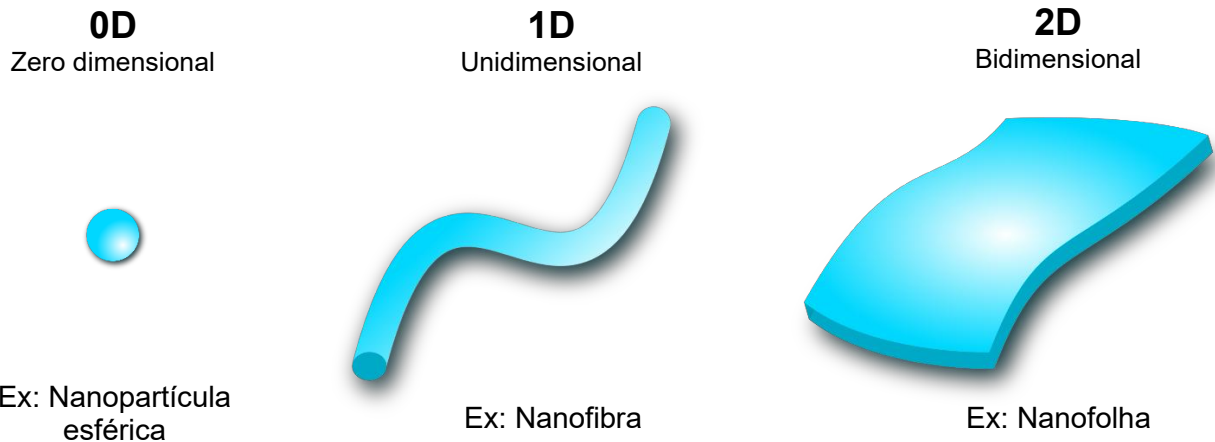
2.1 NANOFIBRAS E PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO

A nanociência é o estudo dos fenômenos físicos e químicos necessários para formar nanoestruturas. Historicamente, esse campo ganhou contornos definidos quando Taniguchi (1974) associou o termo 'nano' à tecnologia, surgindo uma área responsável por produzir, controlar e modificar a matéria em escala nanométrica. Desde então, a nanotecnologia aprimorou diversos setores emergentes, com aplicações em engenharia, medicina, agricultura e meio ambiente.

Para fins de padronização, as nanoestruturas são definidas como materiais que apresentam pelo menos uma das suas dimensões na escala nanométrica, que, segundo a norma vigente ABNT NBR ISO 80004-1 (2024), é considerada de 1 até 100 nm. Embora essa dimensão reduzida confira aos materiais propriedades e funções inovadoras, no contexto específico das nanofibras, as características funcionais ainda são observadas após os 100 nm. Por essa razão, pesquisadores de referência como Ramakrishna *et al.* (2005) consideram como nanofibras aquelas com diâmetros até 500 nm, definição que será adotada neste trabalho.

Tratando dimensionalmente, para classificar nanomateriais é realizado a distinção de acordo com a quantidade de dimensões fora da nanoescala. Dentre os nanomateriais, as nanofibras se destacam por permitir a criação de estruturas porosas com alta área superficial. São classificadas como nanomateriais unidimensionais (1D), onde o comprimento extrapola os 100 nm. Além disso, a redução no diâmetro da seção da fibra representa um aumento significativo na sua área superficial, resultando em uma elevada razão área/volume e conseqüentemente na reatividade da fibra (Huang *et al.*, 2003). Na Figura 1 é possível verificar a diferença entre as principais categorias de nanomateriais.

Figura 1 - Representação das classificações de nanomateriais.



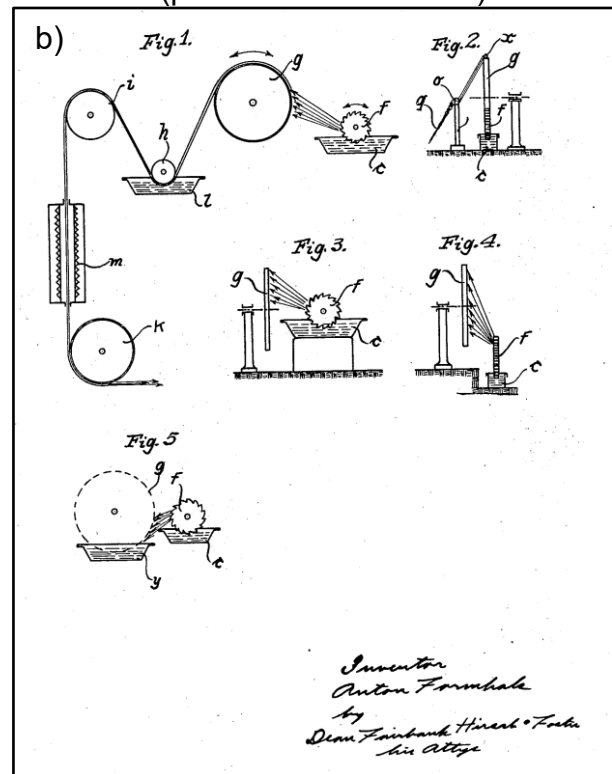
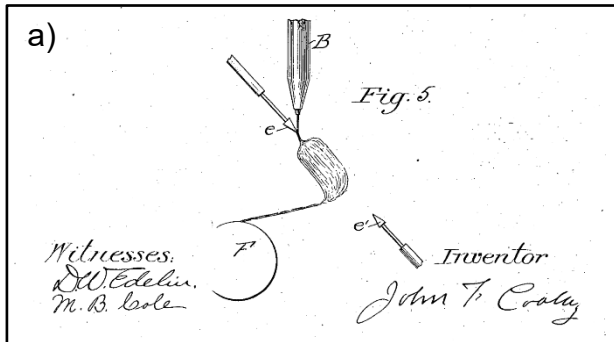
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Para a formação de nanofibras, utiliza-se principalmente a abordagem *top-down* da nanotecnologia, ou de “cima para baixo”, onde ocorre o refino do material na escala macro até atingir a nanométrica, utilizando-se de alguns fenômenos. A Eletrofiação é um exemplo clássico dessa abordagem, pois parte de cadeias poliméricas de PVA, já constituídas e solubilizadas em água, para formar uma rede de nanofibras (Ramakrishna *et al.*, 2005).

O princípio fundamental de dispersão elétrica de fluidos foi originalmente patenteado por John F. Cooley (1902), e posteriormente aprimorado por Formhals (1934), que depositou uma série de patentes descrevendo um eletrofiador e utilizando soluções poliméricas para criar fibras conforme é observado na Figura 2. Mais tarde, nos anos 90, foram Reneker, Doshi e Chun (1993; 1996) os responsáveis por redescobrir a técnica e consolidá-la para formação de fibras com diâmetros nanométricos. Atualmente, diversos setores industriais de ponta já se aproveitam das vantagens da eletrofiação, produzindo filtros e materiais avançados para biomedicina.

A técnica de Eletrofiação baseia-se no uso das forças eletrostáticas para transformar soluções, principalmente poliméricas, em fibras. O processo inicia com a formação de uma gota da solução na ponta de um capilar, que deve ser mantida estável pela tensão superficial. Com isso, um jato de polímero é ejetado quando aplicado uma alta tensão (tipicamente algo entre 5 e 30 kV) entre o capilar e o coletor metálico. Assim, a gota é carregada eletricamente, induzindo uma repulsão que se opõe à tensão superficial. E deste modo, um jato é ejetado da gota em direção a placa, que no trajeto evapora o solvente e sofre um efeito de chicoteamento (*whipping*), reduzindo ainda mais seu diâmetro. Por fim, no coletor é formado uma rede de nanofibras não tecida (Bhardwaj; Kundu, 2010; Cho *et al.*, 2025; Ko; Wan, 2014; Mercante; Corrêa, 2023; Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022).

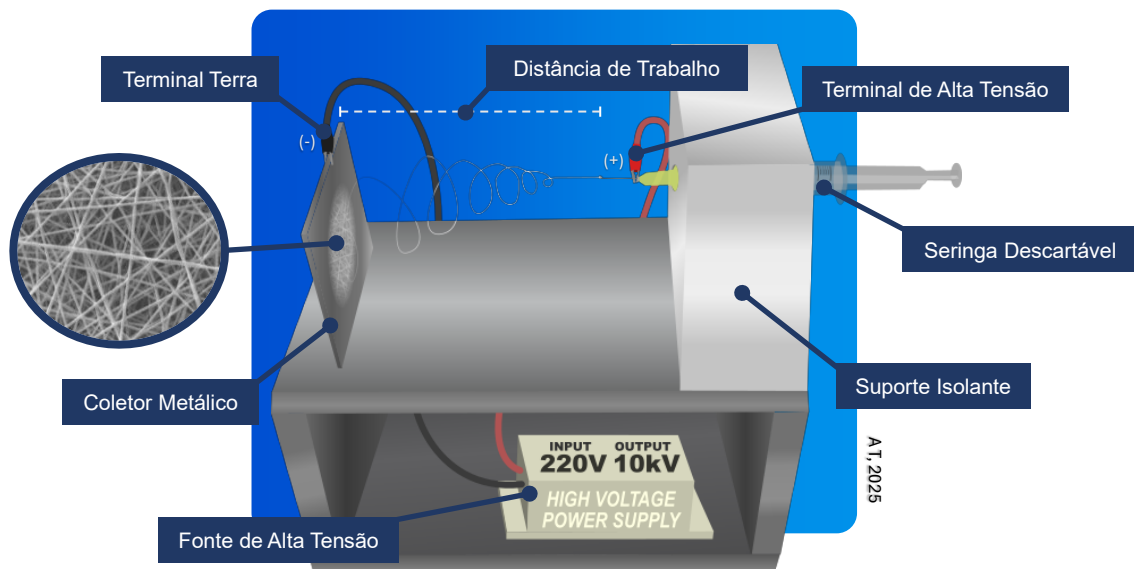
Figura 2 - Diagrama do a) aparato para dispersar fluidos eletricamente carregados (patente US692631A) e do b) aparato para preparar fios artificiais (patente US1975504A).



Fonte: Adaptado de a) Cooley (1902) e b) Formhals (1934).

O equipamento de Eletrofiação é de construção simples, conforme ilustrado na Figura 3. Consiste em uma fonte de alta tensão (5 a 30 kV), um aparato para promover a vazão da solução, que pode ser a gravidade, bomba de seringa ou manualmente, e por fim um coletor metálico, que irá receber as fibras (Subbiah *et al.*, 2005).

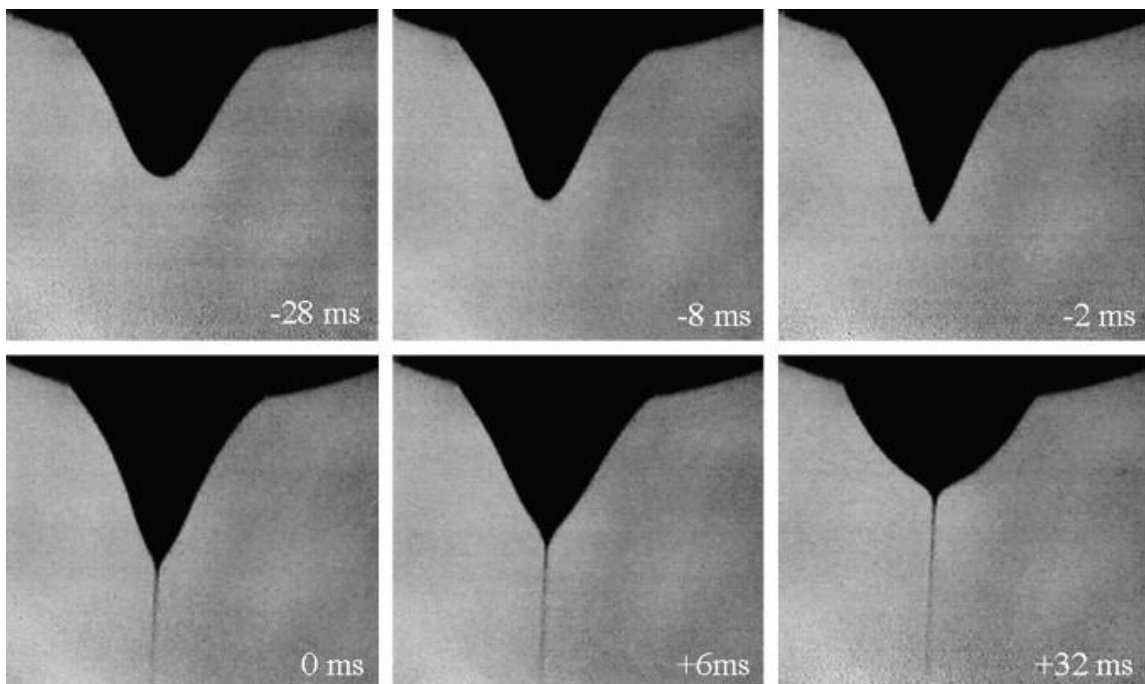
Figura 3 - Esquema da construção de um modelo simplificado de eletrofiação.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025)

O principal fenômeno aparente na eletrofiacção é o Cone de Taylor. Geoffrey Ingram Taylor introduziu esse conceito em 1964, onde descreveu como sendo uma estrutura geométrica de um menisco cônico, do qual o jato escapa. Na Figura 4 é possível observar a formação do Cone de Taylor, onde os pesquisadores registraram o mecanismo a partir de uma solução de óxido de polietileno (PEO). Nos primeiros milissegundos a gota acumula íons do eletrodo por todo seu volume, e conforme o campo elétrico é elevado acima de um limiar crítico, inicia-se a formação do jato, resultado da remoção dos íons em direção ao coletor. Após o curto período de movimento das cargas, as componentes radiais das forças de Coulomb são responsáveis por remover o excesso de íons, isso ocorre para satisfazer as condições de equilíbrio, onde o campo elétrico dentro do fluido deve ser zero. Com isso há uma estabilização e a gota volta a aparecer, agora com a presença do Cone de Taylor (Reneker; Yarin, 2008).

Figura 4 - Fotografias da evolução do formato de uma gota de uma solução de óxido de polietileno (PEO) conforme aplicado um campo elétrico.

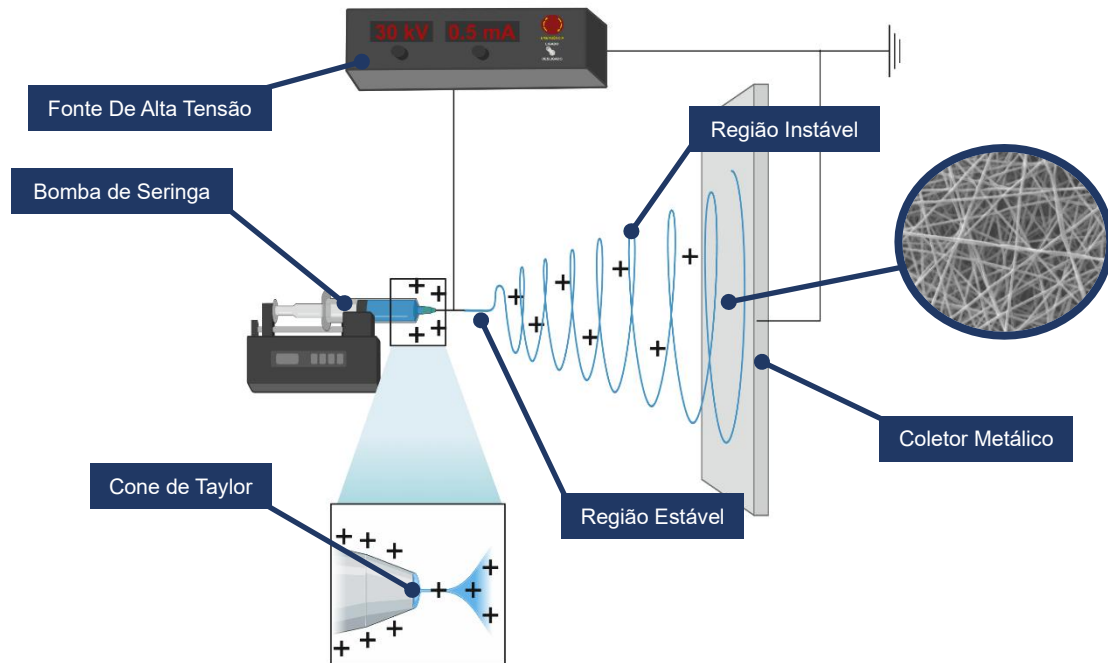


Fonte: Reneker; Yarin, p. 2389 (2008).

Após a ejeção do jato, outros fenômenos governam a trajetória até o coletor. Uma região estável inicialmente reta é resultado da aceleração pelas forças de Coulomb, que atuam a frente, puxando o jato. À medida que o jato se estende, uma região instável se apresenta, dominada pelo efeito de chicoteamento, onde a fibra é alongada ao mesmo tempo que o solvente evapora. Por fim, as fibras solidificam e são depositadas de forma

alinhadas ou não em um coletor metálico conforme é possível observar na Figura 5 (Cho *et al.*, 2025; Reneker; Yarin, 2008).

Figura 5 – Esquema do processo de eletrofiação.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A deposição final ocorre em um substrato condutor, como papel alumínio, constituindo uma rede de nanofibras, que quando espessa, possibilita a retirada com o auxílio de uma pinça, disponibilizando-a para o uso em análises e aplicações topológicas.

O processo é controlável, onde é possível determinar o diâmetro das fibras e até a configuração estrutural variando alguns parâmetros. E é esse o foco dos estudos recentes, em como os parâmetros da solução, do processo e ambientais interferem no resultado do produto, para que possa ser previsível a morfologia e consequentemente reproduzível em larga escala.

2.2 PARÂMETROS CRÍTICOS DA ELETROFIAÇÃO

Diversas variáveis são investigadas nos trabalhos relacionados a eletrofiação, devido principalmente a suas influências nos diâmetros e morfologias das fibras. São classificadas em três principais grupos: parâmetros da solução; parâmetros do processo; e parâmetros ambientais.

Para tratar esses parâmetros objetivamente, é preciso destacar qual resultado é

considerado o ideal. No caso, fibras com diâmetros consistentes, controláveis e com superfície livre de defeitos são geralmente obtidas com a compatibilidade de diversas variáveis (Huang *et al.*, 2003). Fundamentalmente, a compreensão de como os parâmetros afetam, recai na necessidade de controlar o diâmetro da fibra em conjunto com a porosidade. Portanto, otimizar o processo permite ao pesquisador prever a morfologia e até propriedades químicas e elétricas.

2.2.1 Parâmetros da Solução

Alguns parâmetros da solução afetam diretamente o processo de eletrofiação, como é o caso da massa molecular, da concentração, da viscosidade e da condutividade do polímero.

2.2.1.1 Massa molar

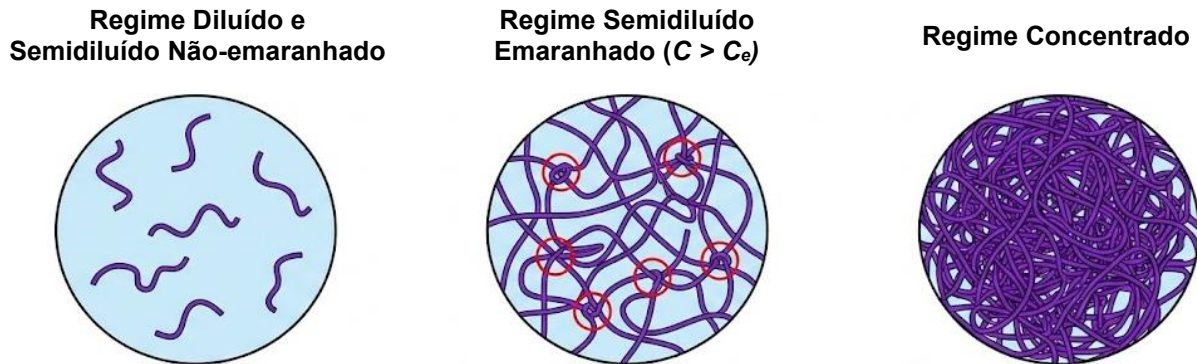
A massa molar média ponderada (M_w), ou peso molecular, é uma propriedade do polímero que reflete o comprimento médio das cadeias poliméricas. Na eletrofiação, a massa molar dita o grau de emaranhamento das cadeias (*chain entanglement*). Esse fator é responsável por manter o jato coeso enquanto é estirado pelas forças eletrostáticas (Shenoy *et al.*, 2005).

2.2.1.2 Concentração e viscosidade

A concentração é a quantidade de polímero presente na solução que pode ser identificada como uma relação massa/massa ou massa/volume. Já a viscosidade é a medida da resistência interna de um fluido ao fluxo. Para a eletrofiação, a literatura estabelece que a formação de fibras depende dos emaranhamentos das cadeias, que precisam ser fortes o suficiente para resistir ao estiramento e evitar a ruptura do jato. Embora sejam grandezas distintas, elas estão intrinsecamente correlacionadas pela massa molar do polímero. A viscosidade atua como uma medida macroscópica da interação molecular: em soluções de polímeros de alta massa molar, como o PVA utilizado neste trabalho (M_w 104.500 g/mol), um pequeno incremento na concentração gera um aumento exponencial na viscosidade, devido à formação de emaranhamentos físicos entre as cadeias (Shenoy *et al.*, 2005).

A literatura classifica o comportamento da solução em regimes críticos baseados na densidade desses emaranhamentos, que ditam a morfologia final. Na Figura 6 é possível verificar a representação da distribuição das cadeias poliméricas em uma solução. Essa divisão é importante para entender os resultados morfológicos da Figura 7.

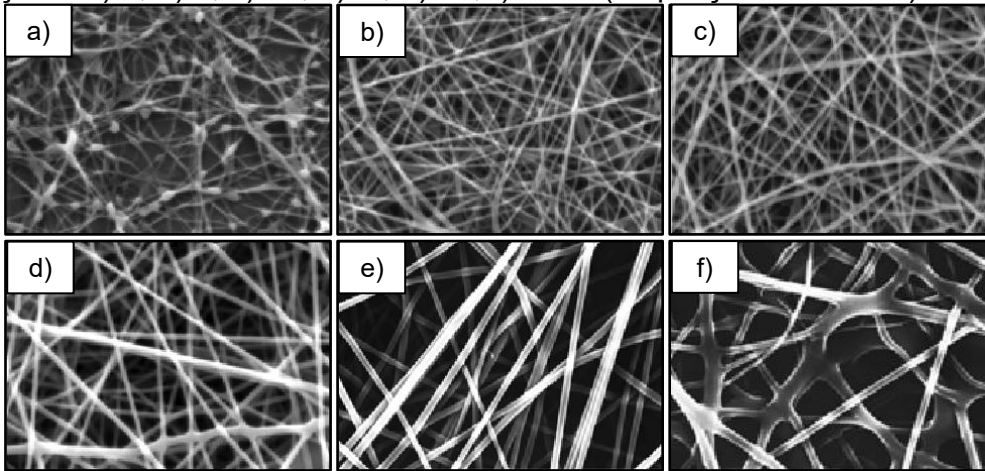
Figura 6 – Representação visual dos regimes de emaranhamento das cadeias poliméricas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

1. **Regime Diluído e Semidiluído Não-Emaranhado:** Quando a concentração é baixa, as cadeias poliméricas estão dispersas ou apenas se tocam levemente, sem formar "nós" robustos. Nessa condição, a viscosidade é insuficiente para estabilizar o jato contra a tensão superficial. As forças viscoelásticas perdem a competição para a Instabilidade de Rayleigh, fazendo com que o jato se rompa em gotas durante o voo. O resultado é o processo de eletropulverização ou a formação de fibras defeituosas com grânulos como se observa na Figura 7a (Ahmadi Bonakdar; Rodrigue, 2024; Mercante; Corrêa, 2023).
2. **Regime Semidiluído Emaranhado ($C > C_e$):** Ao ultrapassar a concentração crítica de emaranhamento (C_e), forma-se uma rede topológica coesa de cadeias. Essa rede confere à solução a elasticidade necessária para suportar o estiramento eletrostático sem se fragmentar, permitindo a formação de fibras contínuas, uniformes e livres de defeitos (Rwei; Huang, 2012). As Figuras 7b, 7c, 7d e 7e evidenciam esse regime, mostrando a evolução da coesão da fibra para redes homogêneas.
3. **Regime Concentrado:** Em concentrações excessivas, a alta densidade de polímero eleva a viscosidade a níveis que dificultam a ejeção do jato e, crucialmente, retardam a difusão das moléculas de solvente para a superfície da fibra. Isso resulta em evaporação incompleta, gerando fibras espessas que chegam úmidas ao coletor e se fundem, como é o caso da Figura 7f (Sanfelice; Pavinatto; Corrêa, 2022).

Figura 7 – Imagens MEV do PVA (M_w 88.000; Grau de hidrólise 98%) com diferentes concentrações: a) 6, b) 8, c) 10, d) 12, e) 13, f) 14 % (ampliação de 5.000x).



Fonte: Adaptado de Rwei; Huang, p. 46 (2012).

Estudos específicos com PVA validam essa janela de processamento. Santos (2023), ao investigar PVA de massa molar similar (M_w 86.000-124.000 g/mol), demonstrou que soluções com viscosidade muito baixa (~ 21 cP) resultaram apenas em projeção de gotas, enquanto viscosidades intermediárias (~ 185 cP) produziram fibras íntegras. O autor observou ainda que viscosidades excessivas (~ 1131 cP) dificultaram a formação estável do Cone de Taylor.

Corroborando esses limites, Rwei (2012) estabeleceu que, para PVA de alto peso molecular, a janela de eletrofiabilidade situa-se estritamente entre 6% e 14%. Abaixo de 6%, a falta de emaranhamento impede a formação de fibras; acima de 14%, a alta viscosidade e a retenção de solvente tornam o processo inviável, resultando em fibras planas e fundidas. Portanto, a viscosidade deve ser ajustada para equilibrar a tensão superficial (evitando gotas) e a taxa de evaporação (evitando fusão das fibras).

2.2.1.3 Condutividade

A condutividade está principalmente associada aos íons derivados do solvente, ou de aditivos. A literatura indica que aumentar a condutividade de uma solução polimérica resulta em uma diminuição no diâmetro médio das nanofibras. Isso porque os íons presentes aumentam o transporte de carga do jato, reduzindo a tensão necessária para eletrofiar. Entretanto, um aumento acima de um limiar crítico, corrobora para a instabilidade, dificultando a eletrofiação (Bhardwaj; Kundu, 2010).

2.2.2 Parâmetros de Processo

Variáveis do processo como voltagem, distância de trabalho, tipo de vazão e de coletor são fundamentais para determinar a estrutura das membranas.

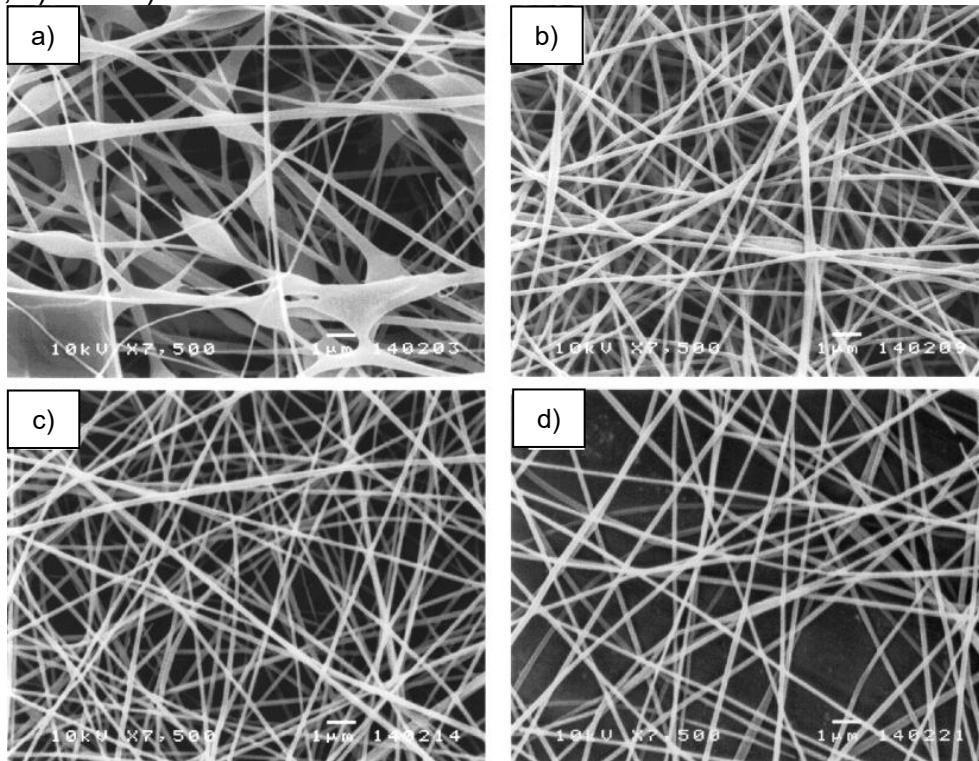
2.2.2.1 Tensão elétrica

A tensão elétrica que é aplicada afeta diretamente a morfologia das fibras. Quando os valores de tensão excedem um limiar crítico, a formação do jato se inicia da ponta do cone de Taylor. A tensão afeta tanto as cargas na solução quanto o campo elétrico ao qual a fibra estará exposta durante sua trajetória. Em média, o diâmetro das fibras diminui com o aumento da tensão aplicada, e ainda, ocorre a uniformidade da membrana. Entretanto para trabalhos com tensões fixas, o importante é a estabilidade do campo elétrico, uma vez que o jato precisa ser homogêneo (Türkoğlu *et al.*, 2024). Ao invés de variar a tensão, conforme a distância aumenta, o campo que atua sobre o cone de Taylor é reduzido. Como por exemplo, em voltagens de 10 kV, é possível obter campos de 2 kV/cm para 5 cm de distância de trabalho, que diminui para 0,66 kV/cm, quando a distância aumenta para 15 cm.

2.2.2.2 Distância de trabalho

A distância de trabalho é o comprimento entre a ponta da agulha e o coletor metálico. Esse parâmetro afeta o processo de eletrofiação de três formas principais: ele ajusta a intensidade do campo elétrico, que é uma propriedade inversamente proporcional; controla o tempo de evaporação do solvente, aumentando a trajetória do jato, permitindo sua solidificação; e define o quanto as cadeias poliméricas serão estiradas pelo chicoteamento. Embora seja um tema controverso na literatura, encontrar uma distância ótima é crucial. Conforme é possível observar na Figura 5, distâncias muito curtas levam a secagem incompleta, resultando em defeitos morfológicos como a fusão das fibras, aparição de grânulos, ou com diâmetros maiores. Já o aumento na distância, permite a consolidação das fibras, resultando em uma rede uniforme (Türkoğlu *et al.*, 2024).

Figura 8 - Imagens MEV de fibras de PVA a 10% (p/v) em diferentes distâncias de coleta. a) 5, b) 10, c) 15 e d) 20 cm.



Fonte: Adaptado de Supaphol; Chuangchote (2008).

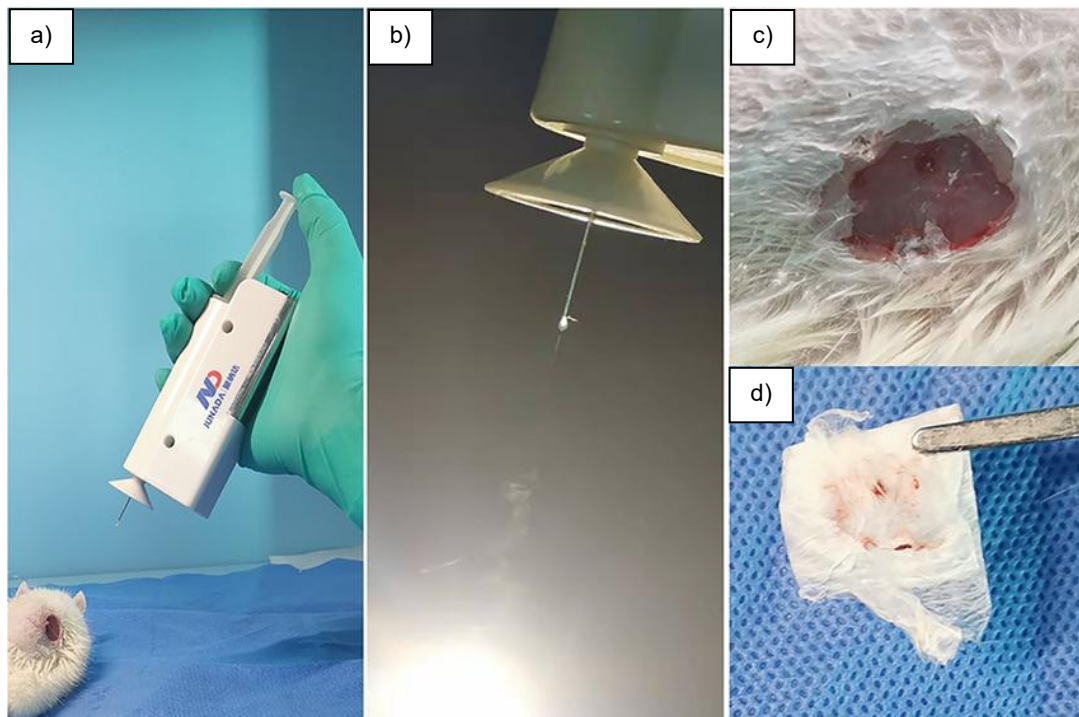
Sob a ótica da evaporação, distâncias maiores são teoricamente benéficas. O aumento do trajeto fornece mais tempo para que o solvente migre do interior para a superfície do jato e evapore. Em distâncias muito curtas, o tempo de voo é insuficiente para a secagem, resultando na deposição de fibras úmidas que sofrem fusão ou formam filmes planos com presença de grânulos, conforme observado por Türkoğlu *et al.* (2024). Portanto, existe uma distância mínima crítica necessária para garantir a formação de fibras cilíndricas e sólidas.

Entretanto, em equipamentos onde a tensão aplicada é mantida fixa, o aumento da distância resulta inevitavelmente na redução da intensidade do campo elétrico, regido pela lei $E = V/d$. Um campo elétrico mais fraco exerce menor força de tração eletrostática o jato polimérico. Santos (2023) relatou em seu trabalho que, ao afastar o coletor sem compensar a voltagem, a redução no estiramento do jato supera o efeito da evaporação, resultando, contra intuitivamente, em fibras com diâmetros maiores. Assim, a distância ótima não é a máxima possível, mas sim aquela que mantém um campo elétrico forte o suficiente (tipicamente $> 1 \text{ kV/cm}$) para estirar as fibras até a escala nanométrica.

2.2.2.3 Vazão

Quando se comenta sobre a vazão do sistema, é importante notar que existem diversas formas de promover o fluxo da solução. O método mais utilizado é com uma bomba de seringa, um dispositivo que utiliza um motor de passo com precisão micrométrica para pressionar a seringa a vazões muito baixas e constantes. Também é possível aproveitar da gravidade, a partir da solução escorrendo por um capilar, o que permite ao equipamento uma redução de custo. E outra técnica pouco investigada é utilizar o operador como um promotor da vazão, essa abordagem é complicada e não reproduzível, porém diversos dispositivos de eletrofiação estão sendo construídos para aplicação *in situ*, onde o paciente recebe a deposição das nanofibras diretamente no local a partir de um aparato do tamanho de uma mão humana, conforme é possível ver na Figura 9. Isso anula qualquer custo, a não ser da seringa, e para pesquisa, se torna uma vantagem em fases experimentais, onde a eletrofiabilidade do conjunto polímero/solvente está sendo investigada.

Figura 9 - Fotografias de aplicação *in situ* utilizando um equipamento portátil de eletrofiação. a) Eletrofiação *in situ* na ferida do rato. b) Formação do Cone de Taylor e das fibras. c) Membranas eletrofiadas. d) Membrana retirada da ferida do rato.

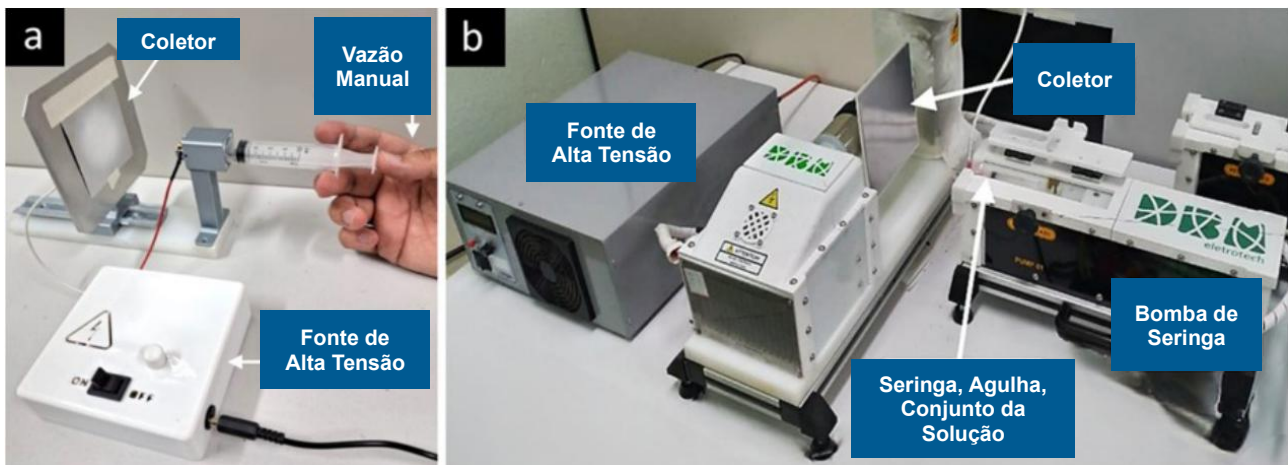


Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2022).

A taxa de alimentação da solução desempenha um papel crítico na estabilidade do processo de eletrofiação. Fluxos insuficientes impedem a manutenção da gota na ponta do

capilar, enquanto vazões excessivas podem causar o acúmulo de polímero na agulha, desestabilizando a formação do Cone de Taylor e favorecendo o surgimento de defeitos estruturais, como grânulos. Em seus estudos, Santos (2023) obteve fibras contínuas e com diâmetros médios muito baixos a partir de soluções aquosas de PVA à 9% (m/m). Foi utilizado um equipamento portátil de eletrofição e comparado com um equipamento convencional da DBM eletrotech, conforme destacado na Figura 10. Os resultados morfológicos demonstraram fibras homogêneas com diâmetro médio de 147 ± 11 nm do equipamento portátil, e de $134,2 \pm 10,4$ nm do equipamento convencional.

Figura 10 – Equipamentos de eletrofição. a) equipamento simplificado e portátil com fonte de 10kV. b) equipamento convencional da DBM eletrotech com bomba de seringa.



Fonte: Adaptado e traduzido de Santos (2023).

2.2.2.4 Coletor

As nanofibras podem ser encontradas de forma alinhadas ou desalinhadas, a depender da configuração do coletor utilizado. Para placas fixas, a coleta resulta em uma manta não tecida sem uma ordem direcional, já para obter uma estrutura ordenada, existem alguns meios mecânicos, magnéticos e eletroestáticos. O uso de um coletor rotativo, alinha as fibras na direção da rotação. O uso de campos magnéticos, que depende da adição de nanopartículas sensíveis, permite também organizar uniaxialmente a membrana (Xue *et al.*, 2017). Portanto, a escolha do equipamento está fundamentada na possível aplicação da manta. Para simplificação do processo, modelos baseados em coletores metálicos fixos são favoráveis, pela sua simplicidade e facilidade para análises posteriores.

2.2.3 Parâmetros Ambientais

A temperatura e umidade relativa interferem significativamente no processo de eletrofiação. Enquanto a temperatura afeta tanto a dissolução do polímero, como a viscosidade, a umidade relativa cria um trajeto instável.

2.2.3.1 Temperatura

A temperatura atua diretamente na reologia das soluções. O comportamento da viscosidade em função da temperatura segue, geralmente, a relação de Arrhenius, onde o aumento da temperatura fornece energia térmica suficiente para superar as forças intermoleculares, reduzindo a viscosidade da solução. Em muitos casos, essa redução facilita o fluxo e o estiramento do jato, favorecendo a obtenção de nanofibras, desde que a taxa de evaporação do solvente seja controlada para evitar o entupimento da agulha (Bhardwaj; Kundu, 2010).

2.2.3.2 Umidade

A umidade relativa (UR) exerce uma influência dual e determinante na eletrofiação, especialmente para polímeros hidrofílicos como o PVA dissolvidos em água. A UR atua simultaneamente na termodinâmica da evaporação e na eletrostática do processo.

Primeiramente, a umidade controla a taxa de transferência de massa do solvente. A força motriz para a secagem do jato é a diferença de pressão de vapor entre a superfície da fibra e o ambiente. Em condições de umidade elevada, a atmosfera já se encontra saturada de vapor d'água, o que retarda drasticamente a evaporação do solvente durante o "tempo de voo". Para o PVA, que é altamente higroscópico, isso frequentemente resulta na deposição de fibras ainda úmidas no coletor. Essas fibras, ao se tocarem, sofrem coalescência, fundindo-se e perdendo sua morfologia cilíndrica individual para formar estruturas achatadas ou filmes (Pelipenko *et al.*, 2013).

Em segundo lugar, a umidade altera a rigidez dielétrica do ar. A presença de moléculas polares de água facilita a ionização do meio, reduzindo o campo elétrico máximo suportável antes da ruptura. Em umidades excessivas, isso pode levar a descargas corona ou arcos elétricos que desestabilizam o jato (Lobo; Boniya, 2018). Por outro lado, umidades muito baixas (< 30%) aceleram a secagem excessivamente, podendo causar a solidificação

do polímero ainda na ponta da agulha, interrompendo o processo. Portanto, a literatura sugere uma faixa intermediária (tipicamente 40 a 60%) como ideal para garantir tanto a estabilidade elétrica quanto a secagem adequada das fibras de PVA (Pelipenko *et al.*, 2013).

2.3 MATERIAIS PARA ELETROFIAÇÃO

A eletrofiação é uma técnica versátil, capaz de produzir nanofibras a partir de diversas classes de materiais, como polímeros, óxidos metálicos, compósitos, cerâmicas, entre outros (Cho *et al.*, 2025).

2.3.1 Polímeros usados na eletrofiação

Polímeros formam a base para as estruturas nanofibrosas. São materiais de fácil manuseio, apresentam solubilidade facilitada em diversos solventes, e suas propriedades térmicas e químicas são configuráveis conforme a necessidade. Existe uma ampla gama de polímeros usados em eletrofiação, geralmente identificados pela capacidade de formar nanofibras.

Os polímeros naturais, como colágeno, gelatina e quitosana são frequentemente selecionados devido sua excelente biocompatibilidade e baixa imunogenicidade. São utilizados por suas capacidades de ligação celular, devido a presença de sequências proteicas específicas. No entanto, sua utilização apresenta desafios técnicos: geralmente possuem baixa resistência mecânica, altas taxas de degradação *in vivo* e variabilidade nas propriedades físico-químicas entre diferentes lotes, dificultando a reprodutibilidade do processo de eletrofiação. Em comparação, polímeros sintéticos, como os poliésteres biodegradáveis (PLA, PCL, PU, PLGA, entre outros) são alternativas aos naturais. Eles permitem maior controle sobre a viscoelasticidade, resistência mecânica e cinética de degradação, sendo facilmente adaptáveis para aplicações que exigem maior integridade estrutural (Bhardwaj; Kundu, 2010).

2.3.2. Álcool polivinílico (PVA)

O álcool polivinílico (PVA) é um polímero sintético semicristalino, obtido pela hidrólise do acetato de polivinila, sendo reconhecido por sua biodegradabilidade, biocompatibilidade

e atoxicidade. Suas propriedades físico-químicas são intrinsecamente dependentes de dois fatores estruturais: o grau de hidrólise e a massa molar (M_w). O grau de hidrólise define a solubilidade e a cristalização; tipos parcialmente hidrolisados (87 a 89%), como o utilizado neste trabalho, possuem grupos acetato residuais que reduzem a regularidade da cadeia, facilitando a solubilidade em água e diminuindo a tendência à cristalização excessiva em comparação aos totalmente hidrolisados (Acik, 2020). Já a massa molar influencia diretamente a reologia: para altos pesos moleculares ($M_w > 100.000$ g/mol), a viscosidade da solução aumenta exponencialmente com a concentração, favorecendo o emaranhamento das cadeias necessário para a eletrospinação.

A estrutura química do PVA é rica em grupos hidroxila (-OH), o que lhe confere alta hidrofiliabilidade e permite o uso da água como solvente universal, eliminando a necessidade de solventes orgânicos tóxicos. Contudo, o uso de soluções aquosas impõe um desafio técnico ao processo: a água possui uma elevada tensão superficial (~ 72 mN/m). Para obter nanofibras íntegras, as forças viscoelásticas da solução de PVA devem ser suficientes para superar essa tensão superficial; caso contrário, o jato tende a colapsar em gotas ou grânulos, fenômeno comum em soluções de baixa concentração ou baixo emaranhamento (Ding *et al.*, 2002).

Em termos de aplicação, membranas de PVA puro apresentam alta higroscopicidade. Essa afinidade com a água pode reduzir sua resistência mecânica em ambientes úmidos e causar a rápida dissolução em contato com fluidos corporais. Embora essa característica limite aplicações estruturais, ela torna-se uma vantagem estratégica para sistemas de liberação imediata de fármacos. Nanofibras de PVA podem encapsular ativos cosméticos ou terapêuticos, dissolvendo-se instantaneamente na pele úmida ou no exsudato de feridas, liberando o ativo eficientemente sem gerar resíduos (Tao; Shivkumar, 2007).

3. METODOLOGIA

Este capítulo descreve detalhadamente os materiais utilizados, a construção do protótipo de eletrofiação de baixo custo, o preparo das soluções poliméricas, os procedimentos de eletrofiação e a caracterização morfológica das nanofibras. Os parâmetros experimentais foram definidos de modo a permitir a análise da influência da concentração polimérica e da distância de trabalho sobre a formação das nanofibras de PVA.

3.1 MATERIAIS

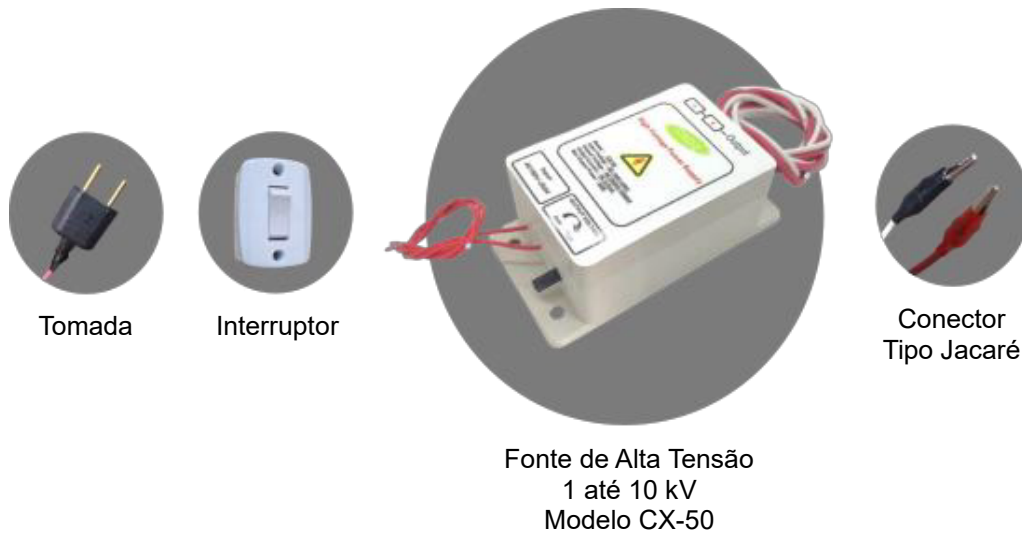
Para construção do dispositivo de eletrofiação, foram utilizados componentes comerciais de baixo custo, com destaque para: Fonte de Alta Tensão (Modelo CX-50, Chengdu Chuangyu Technology), conectores do tipo jacaré, seringas hipodérmicas descartáveis de 5 ml, agulhas metálicas de calibre 30G (0,30 mm de diâmetro interno) e suportes isolantes adaptados.

Como polímero precursor, utilizou-se o álcool polivinílico (PVA) fornecido pela empresa NEON (Ref. 02565), com grau de hidrólise de 87,93% e massa molar média (M_w) de aproximadamente 104.500 g/mol. Como solvente foi utilizado água deionizada (*Milli-Q*).

3.2 CONSTRUÇÃO DO EQUIPAMENTO DE ELETROFIAÇÃO DE BAIXO CUSTO

O protótipo foi desenvolvido com base em um sistema simplificado de eletrofiação horizontal. O núcleo do dispositivo foi criado a partir de uma fonte de alta tensão comercial (Modelo CX-50), operando com entrada de 180 a 250 V (50/60 Hz) e saída de corrente contínua ajustável de 1 a 10 kV. Para garantir a segurança operacional e o isolamento elétrico do sistema, o circuito foi encapsulado em uma estrutura de madeira (dimensões 25 x 13 cm), material selecionado por suas propriedades dielétricas naturais e baixo custo. O acionamento da eletrofiação foi condicionado a um interruptor de segurança, permitindo o corte imediato da corrente em caso de arco voltaico instável. Observa-se na Figura 11 as peças necessárias para completar a fonte onde as juntas elétricas foram isoladas com fita específica.

Figura 11 - Representação das peças necessárias para compor a fonte de alta tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Diferente dos sistemas comerciais que utilizam bombas de infusão de precisão, este projeto adotou um sistema de injeção manual como estratégia central para redução de custos. O suporte da seringa foi projetado com material isolante (espuma) para fixar o corpo da seringa de 5 mL, mantendo a agulha em posição horizontal alinhada ao centro do coletor. A taxa de alimentação foi controlada visualmente pelo operador, buscando manter a formação estável do Cone de Taylor na ponta da agulha, garantindo o equilíbrio entre a vazão e a extração elétrica.

Por fim, o coletor foi construído utilizando uma placa de papelão recoberta por papel alumínio, posicionada opostamente à agulha e conectada ao aterramento físico do circuito. Para permitir o ajuste da distância de trabalho, foi desenvolvido um suporte para a placa com encaixes no vão da caixa de madeira, constituindo uma peça semelhante a guias lineares. Ainda, para coleta da rede de nanofibras, recortes de papel alumínio foram fixados na superfície do coletor, permitindo a remoção sem danificar a estrutura morfológica.

3.3 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES POLIMÉRICAS

Foram preparadas soluções aquosas de PVA nas concentrações de 5, 10 e 15% (m/m), fixando-se a massa total de cada amostra em 200 g. O protocolo de solubilização seguiu as seguintes etapas:

1. Os grânulos de PVA foram primeiro hidratados na água deionizada, polvilhando lentamente por 30 minutos sob agitação magnética moderada, em temperatura

ambiente, evitando a formação de aglomerados.

2. Então o frasco (Erlenmeyer de 250 mL) com a solução foi aquecido dentro de outro frasco (Béquer de 500 mL) em um sistema de banho-maria até 85 °C, agitado a 900 RPM por 2 horas. A solução foi coberta com papel alumínio para evitar a evaporação da água e desbalanceamento das proporções. E ainda foi realizado um furo com uma agulha para evitar o acúmulo de pressão.
3. As soluções foram resfriadas sob agitação lenta (400 RPM) por cerca de 24 horas e, posteriormente, mantidas em repouso por 4 horas para eliminação de bolhas de ar, antes das análises de viscosidade e do processo de eletrofiação.

A caracterização reológica foi realizada utilizando um viscosímetro digital rotacional (Modelo MVD-5, Marte). As leituras foram efetuadas seis vezes nas velocidades de 12, 30 e 60 RPM, considerando-se válidos apenas os dados com torques acima de 20% e abaixo de 100%, faixa recomendada pelo fabricante para assegurar a precisão instrumental e evitar erros de linearidade da mola de medição.

3.4 PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO

Os experimentos foram conduzidos em ambiente laboratorial climatizado (Laboratório PROMAT), com temperatura controlada artificialmente e mantida estável em 20 °C. A umidade relativa do ar (UR) não foi monitorada *in situ* por um higrômetro dedicado. No entanto, segundo dados do Weather Spark (2025), históricos para região de Foz do Iguaçu na data dos ensaios (15/10/2025) indicam uma umidade relativa média de 58%.

A tensão aplicada foi fixada em 10 kV (limite máximo da fonte utilizada). Enquanto a distância de trabalho variou três níveis: 5, 10 e 15 cm. Essa faixa foi selecionada para avaliar a influência do tempo de voo e da intensidade do campo elétrico na formação das fibras. A taxa de alimentação da solução foi controlada manualmente, ajustada visualmente para manter a formação estável do Cone de Taylor na ponta da agulha, garantindo um processo contínuo por 5 minutos para cada amostra.

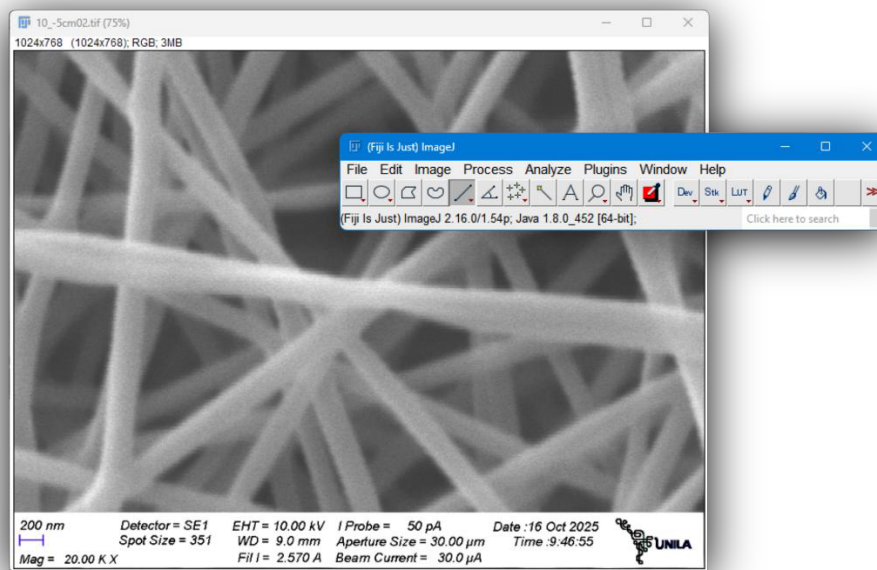
3.5 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA DAS NANOFIBRAS

Para analisar as morfologias em escala nanométrica, imagens foram extraídas por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), Modelo EVO10, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LMEV-UNILA). As amostras foram previamente

fixadas em suportes metálicos e recobertas com uma fina camada de ouro (*sputtering*) para garantir a condutividade elétrica.

A determinação do diâmetro médio das fibras foi realizada através do software de processamento de imagens *ImageJ* (Figura 12). Para cada condição experimental, foram mensuradas 100 fibras aleatórias a partir de micrografias com ampliações de 5.000x a 20.000x.

Figura 12 - Janela com as ferramentas e análise da imagem morfológica do Software *ImageJ*.



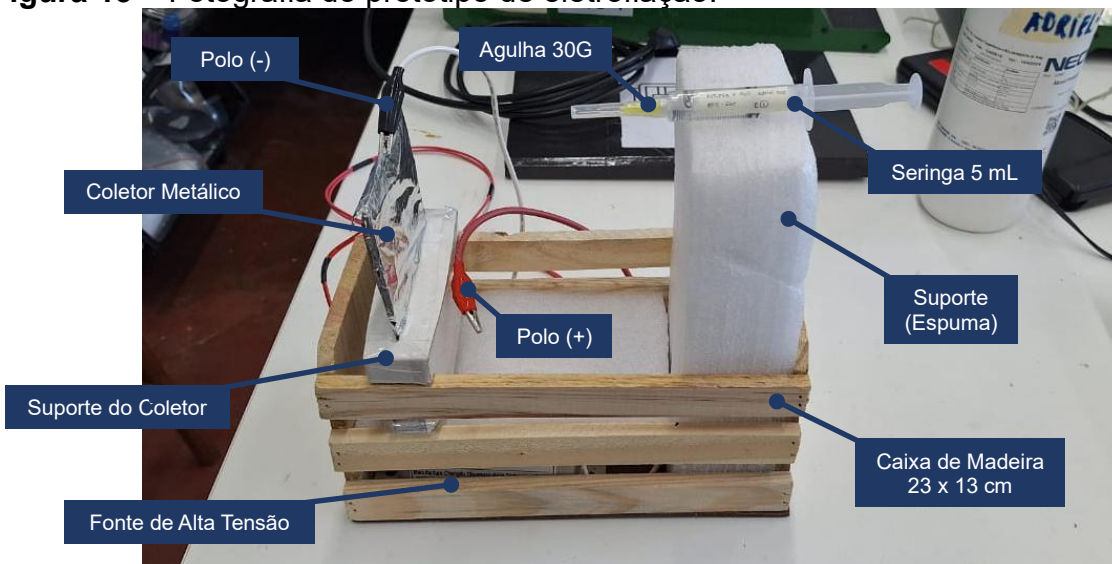
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO DE BAIXO CUSTO

O equipamento de eletrofição foi construído com sucesso utilizando uma estrutura de suporte reaproveitada, um sistema de alimentação manual e uma fonte de alta tensão acessível conforme mostrado na Figura 13. Com essas peças, a configuração final resultou em um dispositivo portátil, compacto e funcional, capaz de operar em bancadas sem a necessidade de infraestrutura complexa de exaustão ou isolamento, conforme se utiliza soluções aquosas não tóxicas.

Figura 13 – Fotografia do protótipo de eletrofição.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

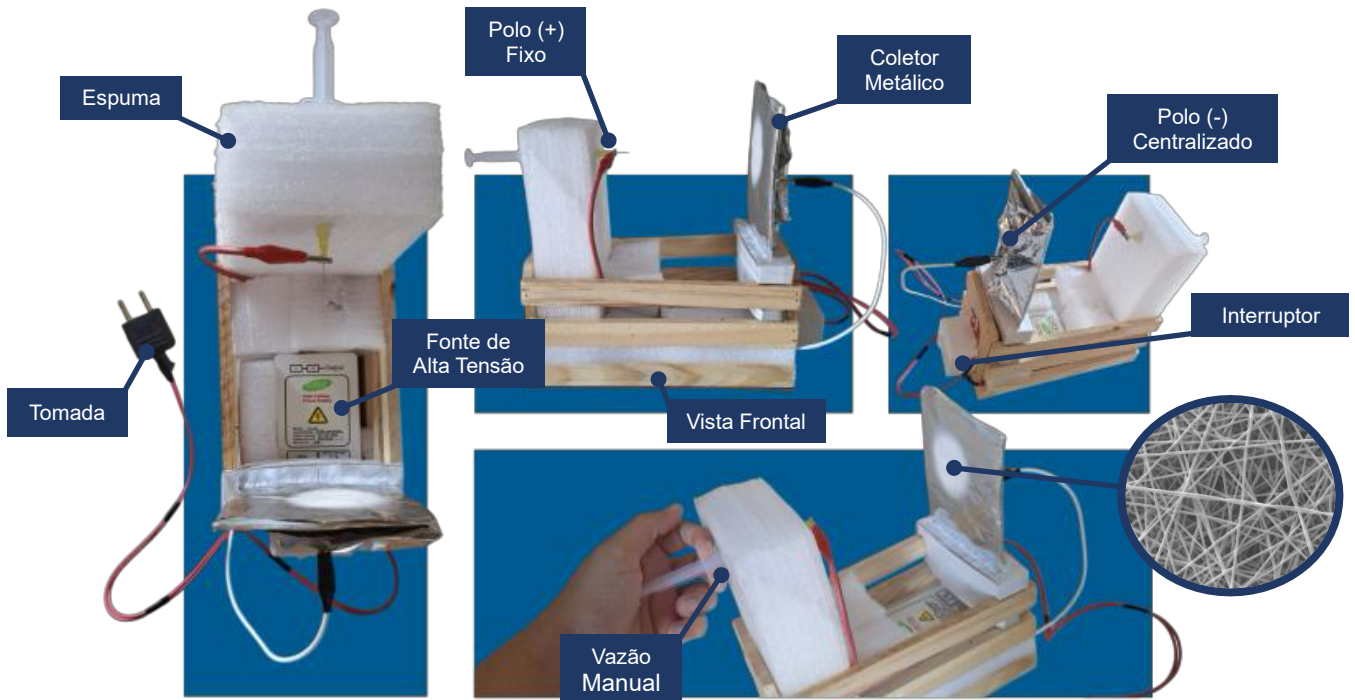
Diferente de sistemas abertos, a montagem das peças em uma caixa de madeira se demonstrou vantajosa para a operação e o transporte. A escolha da madeira como material estrutural não foi apenas econômica, mas técnica, aproveitando suas propriedades dielétricas naturais para isolar o circuito de alta tensão. Por conta disso, durante o processo não foram observadas fugas de corrente ou arcos voltaicos.

O suporte da seringa, o coletor metálico, e principalmente os cabos de saída de tensão foram alocados de uma forma que nada se movimentasse durante a eletrofição. Possibilitando a operação utilizando apenas uma mão para induzir a vazão da solução, reduzindo os riscos de acidente pelo contato com alguma parte energizada.

Observa-se na Figura 14 diversas vistas da construção do protótipo. Note que o interruptor foi fixado na lateral contrária a operação manual, facilitando o acionamento e

interrupção do processo. Internamente, com o que sobrou da espuma, foi preenchido os vazios com pequenos blocos.

Figura 14 - Vistas do protótipo de eletrofiiação de baixo custo.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

O protótipo foi construído com um investimento em materiais de R\$ 215,50 (valor de referência do período de estudo) como observado na Tabela 1, sendo a fonte de alta tensão o principal componente. Esta significativa redução de custos demonstra que a simplificação do sistema de vazão e a seleção criteriosa dos componentes tornam o protótipo uma alternativa eficiente para viabilizar os estudos de eletrofiiação com baixo orçamento.

Tabela 1 - Lista dos componentes do equipamento de eletrofiiação de baixo custo com seus respectivos custos unitários.

Descrição da Peça	Custo Unitário
Fonte de Alta Tensão CX-50 (1 a 10 kV)	R\$ 150,00 (Incluso Taxas e Frete)
Seringa Descartável 5 mL	R\$ 1,00
Agulha 30G	R\$ 0,50
Caixa de Madeira 23 x 13 cm	R\$ 30,00
Tomada 2P 10A 250V	R\$ 5,00
02 Garras Tipo Jacaré	R\$ 10,00
Interruptor	R\$ 5,00

Continua

Descrição da Peça	Custo Unitário
Rolo Papel Alumínio 30 x 400 cm	R\$ 4,00
Bloco de Espuma	Reciclado
Papelão	Reciclado
Custo Total	R\$ 215,50

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Um ponto de discussão central na validação deste equipamento reside na substituição da bomba de infusão de precisão por um sistema de alimentação manual. Embora a literatura clássica preconize o controle rigoroso da vazão (na ordem de mL/min) para garantir a repetibilidade, os resultados práticos obtidos demonstraram que a operação manual, quando assistida visualmente, é viável para a produção de amostras em escala de bancada. Durante os experimentos, a estabilidade do Cone de Taylor serviu como indicador de *feedback* para o operador: sempre que o cone recuava, a pressão no êmbolo era ajustada, mantendo um equilíbrio dinâmico entre a taxa de injeção e a taxa de extração elétrica do jato. Essa abordagem válida o uso do equipamento para fins educacionais e exploratórios, alinhando-se a tendências recentes de pesquisa em dispositivos portáteis para aplicações *in situ* (como curativos aplicados diretamente sobre a pele), onde a portabilidade se sobrepõe à precisão micrométrica da vazão automatizada (Yan *et al.*, 2019).

Por fim, para a janela de tempo utilizada, a morfologia das fibras (discutida nas seções seguintes) comprovou que o dispositivo foi capaz de manter um campo elétrico estável o suficiente para processar soluções poliméricas de viscosidade moderada.

4.2 CONCENTRAÇÃO E VISCOSIDADE DA SOLUÇÃO POLIMÉRICA

A concentração da solução polimérica é o parâmetro que dita a transição entre o regime de formação de gotas para formação de fibras, sendo a viscosidade a manifestação macroscópica das interações moleculares. Na Tabela 2 são apresentadas as relações entre concentração, viscosidade e diâmetro médio obtido a 5 cm de distância de trabalho. Os resultados evidenciam um comportamento não-linear.

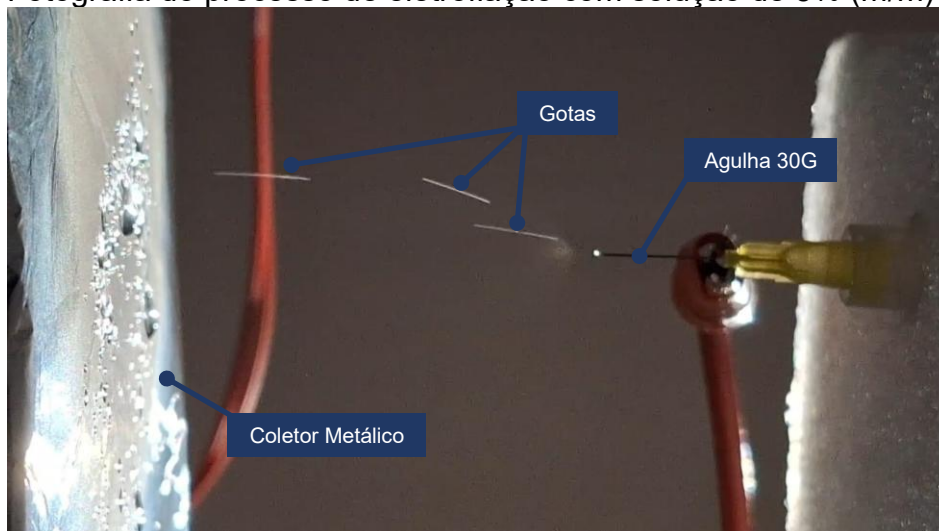
Tabela 2 - Valores de viscosidade de soluções de PVA com diferentes concentrações e o *spindle* utilizado para realizar as medições.

Concentração de PVA (%)	Viscosidade da Solução (cP)	Diâmetro Médio a 5 cm (nm)	<i>Spindle</i>
5	36,86 ± 0,34	Não há	L1
10	501,88 ± 2,80	209,28	L2
15	7884,50 ± 84,15	323,47	L3

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Em relação a eletrofiabilidade, a solução com 5% de PVA apresentou uma viscosidade (36,86 cP) insuficiente para formação do Cone de Taylor. Isso resultou na quebra do jato e na ejeção de gotas, inviabilizando a formação de uma rede fibrosa conforme observa-se na Figura 15. Esse efeito indica que a solução estava abaixo da concentração crítica de emaranhamento (C_e). Nesse estado, as cadeias de PVA de alta massa molar (M_w 104.500 g/mol) não formaram "nós" ou entrelaçamentos suficientes para resistir ao estiramento. Conseqüentemente, a tensão superficial predominou sobre as forças viscoelásticas.

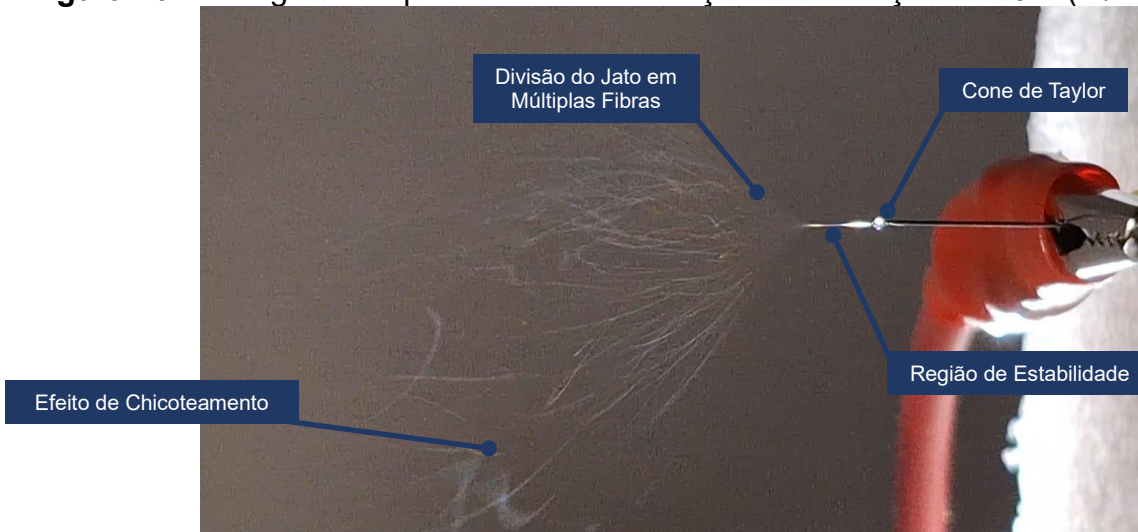
Figura 15 - Fotografia do processo de eletrofição com solução de 5% (m/m) de PVA.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

No caso da solução com 10% de PVA, foi observado a formação de um jato estável e com a região de chicoteamento (Figura 16) conforme previsto na literatura. A viscosidade de 501,88 cP representa um regime semidiluído emaranhado, considerado ideal para o processamento.

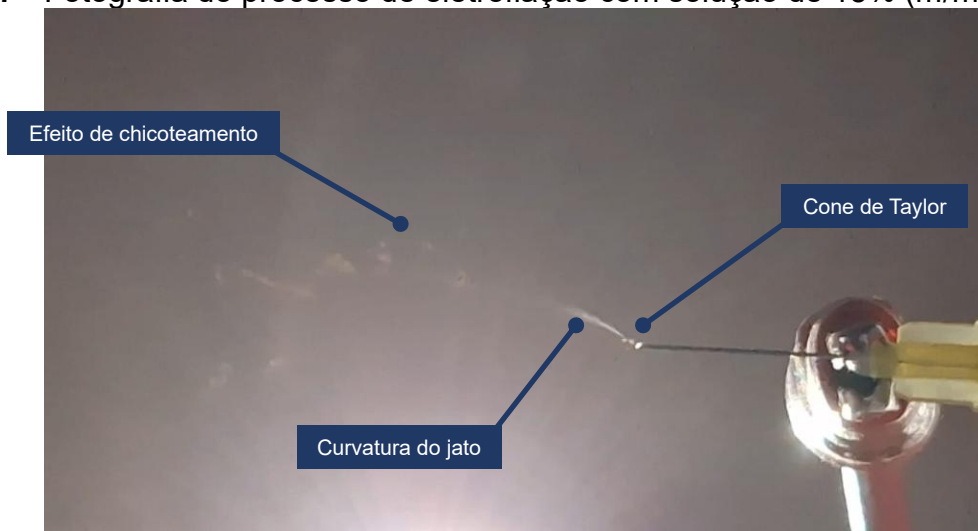
Figura 16 – Fotografia do processo de eletrofiação com solução de 10% (m/m) de PVA.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Por outro lado, na solução com 15% de PVA, observa-se uma curvatura no jato (Figura 17), resultado da instabilidade na vazão, por conta da alta pressão necessária para fluir a solução pela agulha com 0,30 mm de diâmetro. A viscosidade mensurada foi extrema de 7884,50 cP, revelando os limites superiores da eletrofiação.

Figura 17 - Fotografia do processo de eletrofiação com solução de 15% (m/m) de PVA.



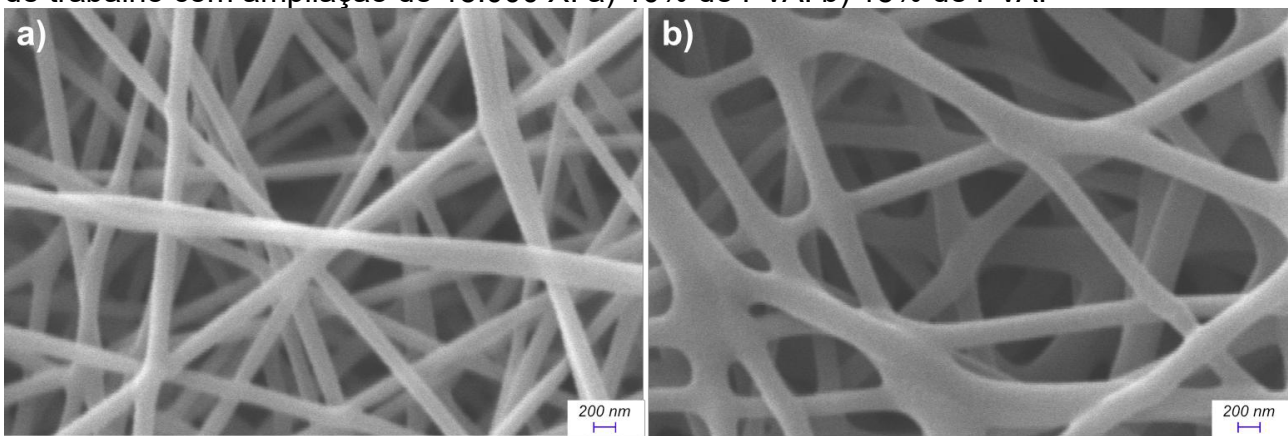
Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Como não houve a formação de uma rede fibrosa utilizando a solução com 5% de PVA, imagens de microscopia não foram obtidas. Sendo assim, na Figura 18 é possível verificar a morfologia das redes de nanofibras produzidas a partir de soluções com 10 e 15% de PVA, onde foi aplicada uma ampliação de 15.000x. As micrografias (MEV) da Figura 18a revelam a formação de fibras contínuas, cilíndricas e com diâmetro médio reduzido

(209,28 nm), sem a presença de defeitos tipo grânulos. Esse resultado demonstra que a densidade de emaranhamentos moleculares foi capaz de superar a tensão superficial da água, permitindo que o campo elétrico estirasse o polímero eficientemente.

Conforme a eletrofiação foi mais bem processada em soluções de 10%, é notável a formação de fibras homogêneas, com a ausência de defeitos tipo grânulos. Enquanto, em concentrações de 15%, as fibras não solidificam a tempo e fundiram durante o contato com o coletor metálico, apresentando um diâmetro médio de 323,47 nm.

Figura 18 – Imagens morfológicas das soluções de PVA eletrofiadas a 5 cm de distância de trabalho com ampliação de 15.000 X. a) 10% de PVA. b) 15% de PVA.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

4.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA DE TRABALHO NA MORFOLOGIA

Na Tabela 3 é apresentado os diâmetros médios correspondentes da variação da distância de trabalho em soluções de 10 e 15% de PVA. Observa-se que os diâmetros médios das redes fibrosas aumentaram conforme as distâncias eram maiores. Esse efeito diverge do previsto pela literatura, que afirma que com um maior tempo de voo, facilita a evaporação do solvente e solidificação da fibra antes de chegar no coletor, o que resultaria em uma diminuição dos diâmetros (Türkoğlu et al., 2024). Entretanto o que se nota, é que com distâncias menores ocorre um aumento no campo elétrico de 0,66 para 2 kV/cm. Esse aumento permite uma melhor atuação do transporte iônico e consequentemente uma melhor formação do Cone de Taylor e da fibra.

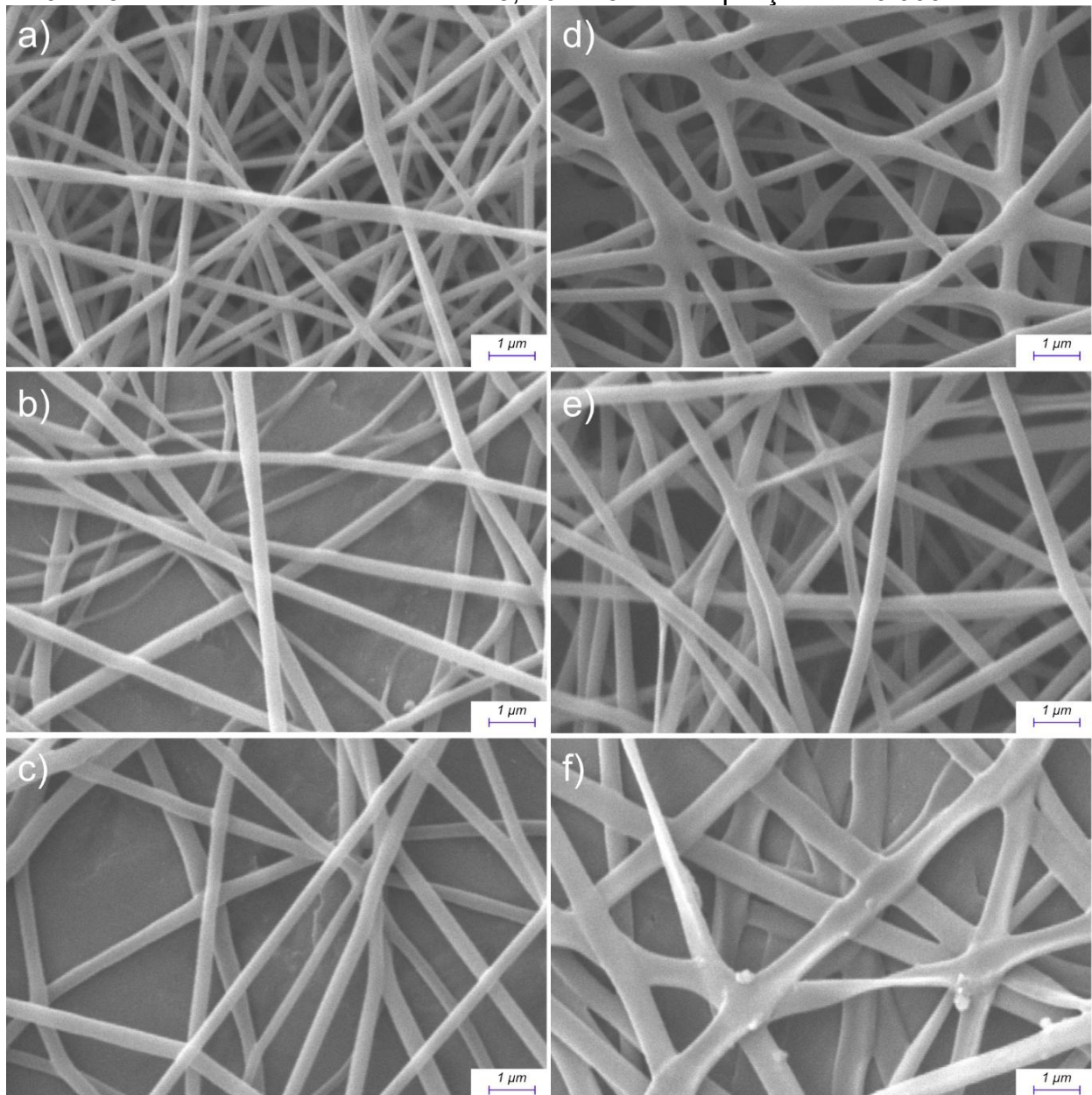
Na Tabela 3 é possível observar que para a solução de 10% de PVA, o diâmetro médio saltou de 209,28 nm (a 5 cm) para 346,30 nm (a 15 cm), conforme o campo elétrico atuante diminui. O mesmo ocorreu na solução de 15%, entretanto, o aumento abrupto do diâmetro de 328,11 (a 10 cm) para 609,23 (a 15 cm) é resultado da formação de fibras com estrutura plana, conforme se observa na Figura 19f.

Tabela 3 – Valores de diâmetro médio da rede de nanofibras de PVA eletrofiadas em concentrações de 5, 10 e 15% a 5, 10 e 15 cm de distância de trabalho sob tensão de 10kV.

Concentração de PVA (%)	Distância de Trabalho (cm)	Campo Elétrico (kV/cm)	Diâmetro Médio (nm)
10	5	2	209,28
10	10	1	333,68
10	15	0,66	346,30
15	5	2	323,47
15	10	1	328,11
15	15	0,66	609,23

Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 19 – Imagens MEV das redes de nanofibras de soluções de PVA em concentrações de 10 e 15% e distâncias de trabalho de 5, 10 e 15 cm. Ampliação de 10.000x.

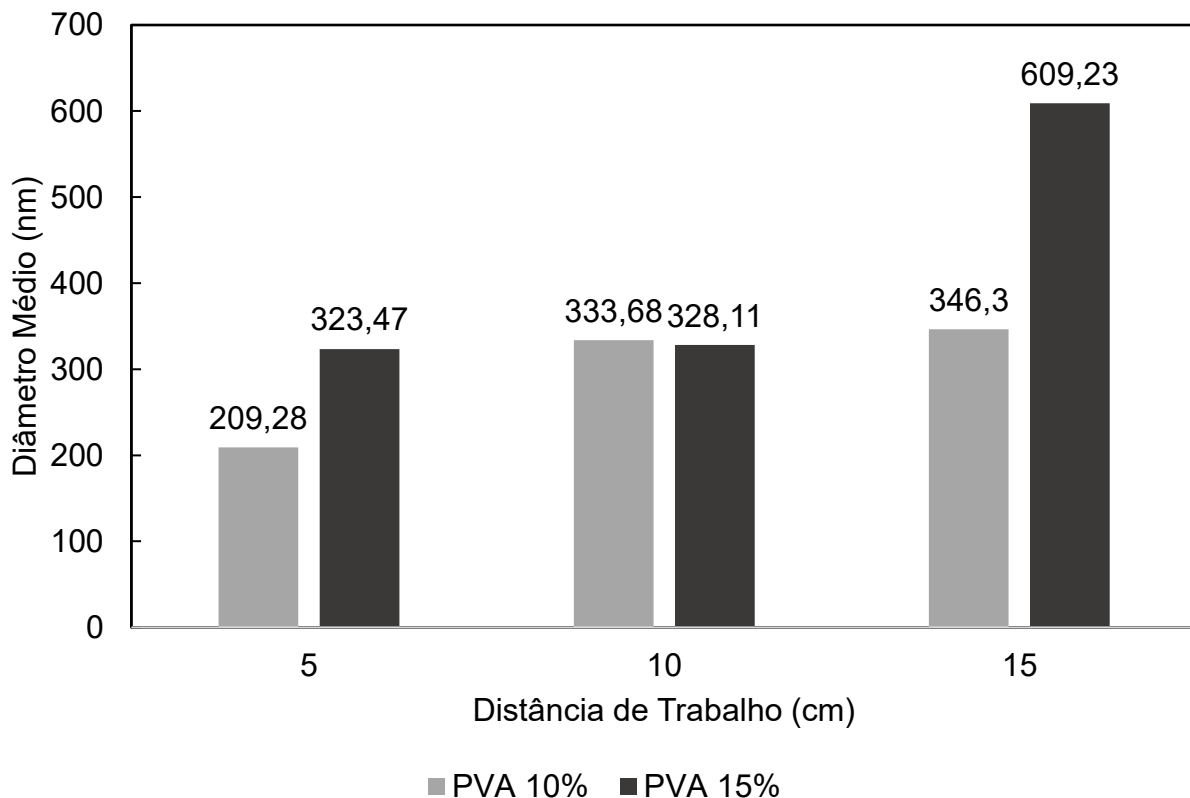


Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

A análise morfológica da Figura 19 pode ser correlacionada com a relação da Figura 20, que une a influência da distância de trabalho e da concentração no diâmetro médio das fibras. Nas amostras coletadas a 5 cm, foram obtidas redes densas e uniformes, com o aumento da concentração resultando em um maior emaranhamento das fibras. Em distâncias de 10 cm, as fibras mostraram certa semelhança, com diâmetros médios próximos e fibras ausentes de grânulos. A diferença está no volume da rede, que com uma maior concentração, depositou mais fibras sobre o coletor. Por fim, em 15 cm, as fibras com 10% de PVA sofreram certo grau de fusão, enquanto com 15%, as fibras se fundiram completamente, sendo achatadas pelo contato com o coletor, corroborando com o previsto por Rwei (2012).

Em 10% de PVA, é possível notar que com o aumento da distância, as redes se espalharam sobre o coletor em um mesmo período de deposição. Efeito do maior comprimento da região de instabilidade do jato. No Apêndice A, as Figuras 21c, 21g e 21k demonstram isso, onde as fibras em 5 cm foram depositadas com certo grau de linearidade, e em 10 e 15 cm, se curvaram e dispersaram sobre o papel alumínio.

Figura 20 - Relação entre concentração, distância de trabalho e diâmetro médio das mantas nanofibrosas.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com tudo que foi discutido nos resultados, é possível concluir que o presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao desenvolver e validar um protótipo de eletrofiação de baixo custo, demonstrando que a tecnologia de produção de nanofibras pode ser acessível. A construção do modelo simplificado de eletrofiação, com um investimento total de R\$ 215,50, provou ser economicamente viável em comparação aos modelos comerciais de entrada. A estratégia de substituir a bomba de seringa automatizada por um sistema de alimentação manual, controlado visualmente pela estabilidade do Cone de Taylor, mostrou-se eficaz para a produção de amostras em escala laboratorial e didática, validando o protótipo como uma ferramenta de democratização do ensino de nanotecnologia.

No que tange aos parâmetros da solução, a investigação confirmou a existência de uma "janela de processabilidade" crítica para o álcool polivinílico (PVA) de alta massa molar (M_w 104.500 g/mol). Conclui-se que a concentração de 10% (m/m) representa o ponto ótimo de equilíbrio reológico, onde a densidade de emaranhamentos moleculares é suficiente para estabilizar o jato contínuo, produzindo fibras uniformes com diâmetro médio de 209,28 nm. Concentrações inferiores (5%) falharam devido à predominância da tensão superficial (regime não-emaranhado), enquanto concentrações superiores (15%) resultaram em fibras espessas e fundidas devido à dificuldade de evaporação do solvente e alta resistência viscosa.

A análise dos parâmetros de processo revelou um comportamento determinante para equipamentos de voltagem fixa: a intensidade do campo elétrico prevalece sobre o tempo de voo. Contrariando a intuição inicial de que maiores distâncias favoreceriam fibras mais finas, observou-se que o afastamento do coletor (de 5 para 15 cm) reduziu a força do campo elétrico (de 2 para 0,66 kV/cm), resultando em menor estiramento e, conseqüentemente, no aumento do diâmetro das fibras. Portanto, para este arranjo experimental de 10 kV, a menor distância de trabalho (5 cm) mostrou-se a mais eficiente para a obtenção de nanoestruturas refinadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, é indicado a aprimoração do equipamento, permitindo expandir as investigações dos efeitos, para isso é preciso:

1. Desenvolver uma bomba de seringa de baixo custo, baseada em Arduino e motores de passo, eliminando a variabilidade humana do processo manual.
2. Implementar um isolamento com monitoramento ativo de temperatura e umidade relativa, garantindo uma reprodutibilidade das mantas em condições ideais.

3. Incorporar um leitor de alta tensão, permitindo a variação da tensão e controle da estabilidade.
4. Realizar testes de aplicações de mantas de 10% de PVA, como ensaios de dissolução rápida para liberação de fármacos ou testes de filtração de particulados.

REFERÊNCIAS

- ACIK, G. Synthesis of well-defined polyvinyl alcohol with various degrees of hydrolysis via RAFT polymerization and their properties. **Journal of Polymer Research**, v. 27, n. 10, p. 317, 2020.
- AHMADI BONAKDAR, M.; RODRIGUE, D. Electrospinning: Processes, Structures, and Materials. **Macromol**, v. 4, n. 1, p. 58–103, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 80004-1: Nanotecnologias — Vocabulário — Parte 1: Vocabulário principal**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- BHARDWAJ, N.; KUNDU, S. C. Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. **Biotechnology Advances**, v. 28, n. 3, p. 325–347, 2010.
- CHO, Y. et al. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications. **Advanced Materials**, v. 37, n. 28, 2500162, 2025.
- COOLEY, J. F. **Apparatus for electrically dispersing fluids**. United States Patent 692,631. 4 fev. 1902.
- DING, B. *et al.* Preparation and characterization of a nanoscale poly(vinyl alcohol) fiber aggregate produced by an electrospinning method. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, v. 40, n. 13, p. 1261–1268, 2002.
- DOSHI, J.; RENEKER, D. H. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. **Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference**, v. 3, p. 1698–1703, 1993.
- FORMHALS, A. **Process and apparatus for preparing artificial threads**. United States Patent 1,975,504. 2 out. 1934.
- HUANG, Z.-M. *et al.* A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. **Composites Science and Technology**, v. 63, n. 15, p. 2223–2253, 2003.
- KO, F. K.; WAN, Y. **Introduction to Nanofiber Materials**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- LOBO, R. F.; BONIYA, A. A. Electrospinning: A Powerful Tool for the Fabrication of Nanofibers. In: **Nanofabrication for Smart Nanosensor Applications**. [S. l.]: Elsevier, 2018.
- MERCANTE, L. A.; CORRÊA, D. S. **Eletrofiação e nanofibras: fundamentos e aplicações**. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2023.
- PELIPENKO, J. *et al.* The impact of relative humidity during electrospinning on the morphology and mechanical properties of nanofibers. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 456, n. 1, p. 125–134, 2013.

RAMAKRISHNA, S. *et al.* **An Introduction to Electrospinning and Nanofibers**. Singapore: World Scientific Publishing, 2005.

RENEKER, D. H.; CHUN, I. Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning. **Nanotechnology**, v. 7, n. 3, p. 216–223, 1996.

RENEKER, D. H.; YARIN, A. L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. **Polymer**, v. 49, n. 10, p. 2387–2425, 2008.

RWEI, S. P.; HUANG, C. C. Electrospinning PVA solution: Rheology and morphology analyses. **Fibers and Polymers**, v. 13, n. 1, p. 44–50, 2012.

SANFELICE, R. C.; PAVINATTO, A.; CORRÊA, D. S. **Nanotecnologia Aplicada a Polímeros**. São Carlos: Embrapa, 2022.

SANTOS, André Luiz dos. **Estudo de nanomembranas de PVA produzidas por dispositivo de eletrofição portátil com potenciais aplicações in situ**. 2023. 101 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2023.

SHENOY, S. L. *et al.* Role of chain entanglements on fiber formation during electrospinning of polymer solutions: good solvent, non-specific polymer–polymer interaction limit. **Polymer**, v. 46, n. 10, p. 3372–3384, 2005.

SUBBIAH, T. *et al.* Electrospinning of nanofibers. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 96, n. 2, p. 557–569, 2005.

TANIGUCHI, N. On the Basic Concept of 'Nano-Technology'. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING, 1974, Tokyo. **Proceedings...** Tokyo: JSPE, 1974. p. 18–23.

TAO, J.; SHIVKUMAR, S. Molecular weight dependent structural regimes during the electrospinning of PVA. **Materials Letters**, v. 61, n. 11-12, p. 2325–2328, 2007.

TAYLOR, G. I. Disintegration of water drops in an electric field. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 280, n. 1382, p. 383–397, 1964.

TÜRKOĞLU, G. C. *et al.* Sustainable production of PVA nanofibers: The effect of process parameters on fiber morphology. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 141, n. 15, e55200, 2024.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas históricas durante 2025 em Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil**. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com>. Acesso em: 15 out. 2025.

XU, F. *et al.* Portable electrospinning device for in situ application of wound dressing. **Bio-Design and Manufacturing**, v. 5, p. 399–412, 2022.

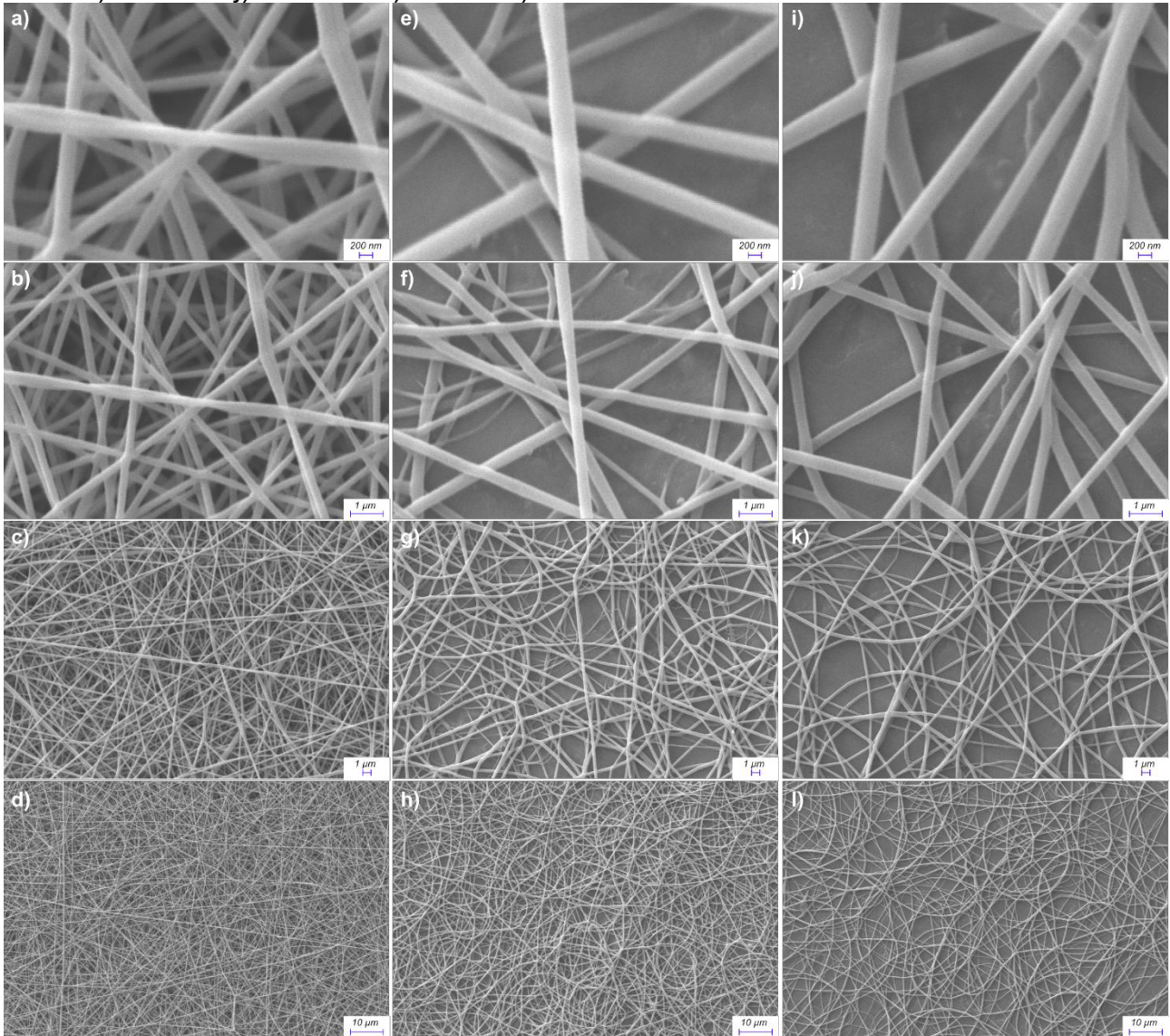
XUE, J. *et al.* Electrospun Nanofibers: New Concepts, Materials, and Applications. **Accounts of Chemical Research**, v. 50, n. 8, p. 1976–1987, 2017.

YAN, Xu *et al.* Advances in portable electrospinning devices for in situ delivery of personalized wound care. **Nanoscale**, Cambridge, v. 11, n. 41, p. 19166-19178, 2019.

APÊNDICES

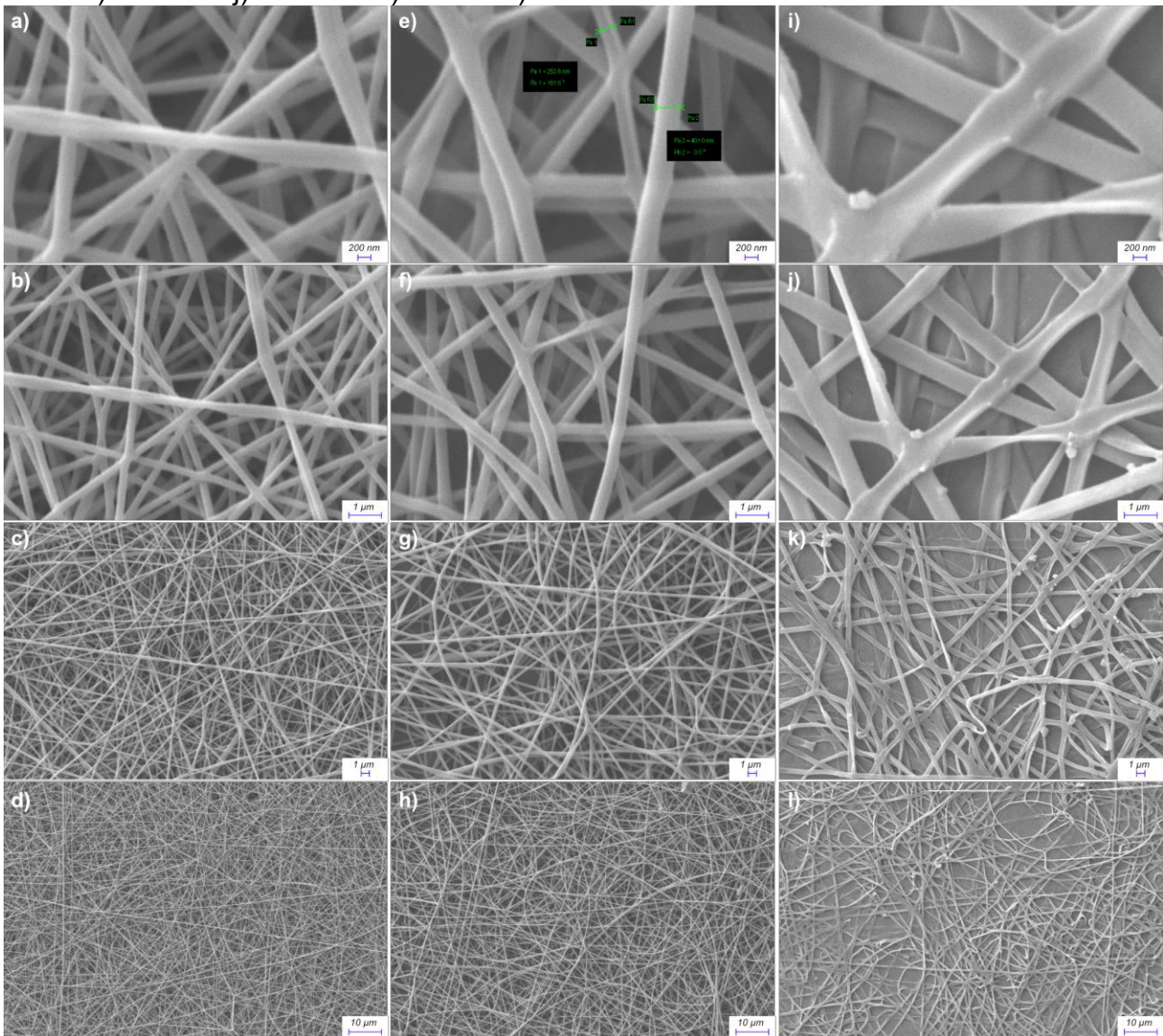
APÊNDICE A – IMAGENS MEV DE AMOSTRAS DE PVA

Figura 21 – Amostras de PVA 10% (m/m) coletadas a 5 cm com ampliações de a) 20.000x. b) 10.000x. c) 2.500x. d) 1.000x. A 10 cm e) 20.000x. f) 10.000x. g) 2.500x. h) 1.000x. E a 15 cm i) 20.000x. j) 10.000x. k) 2.500x. l) 1.000x.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).

Figura 22 – Amostras de PVA 15% (m/m) coletadas a 5 cm com ampliações de a) 20.000x. b) 10.000x. c) 2.500x. d) 1.000x. A 10 cm e) 20.000x. f) 10.000x. g) 2.500x. h) 1.000x. E a 15 cm i) 20.000x. j) 10.000x. k) 2.500x. l) 1.000x.



Fonte: Elaborada pelo autor (2025).