



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS BLUMENAU
COORDENADORIA ESPECIAL DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Amanda Olinek

**Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com óxido de zinco puro e
dopado com prata**

Blumenau
2025

Amanda Olinek

Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com óxido de zinco puro e dopado com prata

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Campus Blumenau da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Claudia Merlini
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Laura Ximena Lovisa Oliveira

Blumenau

2025

Olinek, Amanda

Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com óxido de zinco puro e dopado com prata / Amanda Olinek ; orientador, Claudia Merlini, coorientador, Laura Ximena Lovisa Oliveira, 2025.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Graduação em Engenharia de Materiais, Blumenau, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Eletrofiação. 3. Biomateriais. 4. PLA. 5. Óxido De Zinco . I. Merlini, Claudia. II. Ximena Lovisa Oliveira, Laura. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Amanda Olinek

Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com óxido de zinco puro e dopado com prata

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com óxido de zinco puro e dopado com prata e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia de Materiais

Local Blumenau, 03 de dezembro de 2025

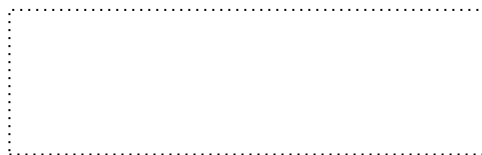
Banca examinadora



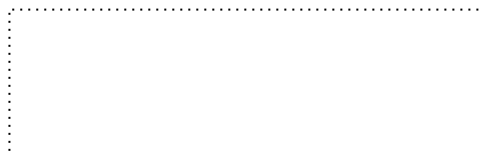
Prof.(a), Dr.(a) Claudia Merlini
Orientadora



Prof.(a), Dr.(a) Laura Ximena Lovisa Oliveira
Coorientadora



Prof, Dr. Johnny de Nardi Martins
Instituição UFSC – *Campus* Blumenau



Prof.(a), Dr.(a) Andrea Cristiane Krause Bierhalz
Instituição UFSC – *Campus* Blumenau

Blumenau, 2025

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua proteção.

Aos meus pais e aos meus avôs, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todas as etapas da minha jornada. Sem vocês, nada disso seria possível.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela oportunidade de aprendizado e crescimento ao longo da minha formação acadêmica.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Claudia Merlini, e à minha coorientadora, Prof.^a Dr.^a Laura Lovisa, pela orientação, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho. Suas contribuições foram essenciais não apenas para a realização deste TCC, mas também para o meu amadurecimento acadêmico e profissional.

Aos membros da banca pela atenção e tempo dedicados à correção deste trabalho.

Aos colegas do curso e do laboratório LTMA, pela parceria, pela ajuda nas rotinas experimentais e pelos momentos de descontração que tornaram o ambiente mais leve e inspirador.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho e para a minha trajetória na universidade.

RESUMO

A eletrofiação por ser simples, versátil, de baixo custo e adaptável, vem sendo é uma das técnicas mais utilizadas para a fabricação de nanofibras poliméricas. Esta técnica é empregada na fabricação de membranas constituídas por fibras com elevada porosidade e área de superfície/volume, que proporciona elevada permeabilidade ao ar, facilidade de funcionalização de diferentes propósitos e excelente desempenho mecânico. Neste trabalho, foram desenvolvidas membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) (PLA) contendo nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) puro e dopado com prata (ZnO:5%Ag), com o objetivo de avaliar a influência da incorporação dessas nanopartículas nas propriedades físico-químicas, térmicas e morfológicas das membranas produzidas. As nanopartículas foram sintetizadas pelo método de coprecipitação, com pH controlado em 14, e posteriormente calcinadas a 500 °C. As soluções poliméricas foram preparadas com 10%*m* de PLA que foram solubilizados nos solventes Diclorometano e Dimetilformamida em uma proporção de 3:1 em volume, contendo três diferentes concentrações de nanopartículas (0,25%*m*, 1%*m* e 2%*m*, em relação ao PLA). As membranas foram obtidas pelo processo de eletrofiação sob tensão de 15 kV, distância de 15 cm e vazão de 1,02 mL/h. Após a eletrofiação, as membranas poliméricas foram caracterizadas para observar a microestrutura e avaliar o desempenho. As análises de MEV revelaram que as nanopartículas de ZnO apresentaram formato irregular e altamente porosa, com formação de aglomerados micrométricos compostos por partículas nanométricas. A nanopartículas de ZnO:5%Ag não apresentaram alterações significativas na morfologia das partículas em relação ao ZnO puro. A difração de raio-X (DRX) confirma a estrutura cristalina hexagonal do tipo wurtzita do ZnO e a dopagem com prata diminui a intensidade dos picos. De acordo com o MEV as fibras poliméricas de PLA são contínuas e aleatoriamente distribuídas, e a adição de ZnO e ZnO:5%Ag não há presença de aglomerados das nanopartículas na superfície das fibras. As análises térmicas mostraram que ZnO quando incorporado nas fibras poliméricas, pode atuar como um elemento de transferência de calor dentro da estrutura das fibras e como potencial catalisador de reações de quebra da cadeia polimérica do PLA e atuam como. A análise por Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) indicou que a agentes nucleantes e modificaram a organização das cadeias poliméricas. Membranas com caráter hidrofóbicos e uma alta permeabilidade ao vapor d'água quando há maiores concentrações de ZnO e ZnO:5%Ag.

Palavras-chave: eletrofiação; poli(ácido láctico); óxido de zinco; óxido de zinco dopado com prata; biomateriais.

ABSTRACT

Electrospinning, due to its simplicity, versatility, low cost, and adaptability, is one of the most widely used techniques for the fabrication of polymeric nanofibers. This technique is employed in the production of membranes composed of fibers with high porosity and a high surface area-to-volume ratio, which provide high air permeability, ease of functionalization for different purposes, and excellent mechanical performance. In this work, electrospun poly(lactic acid) (PLA) membranes containing pure zinc oxide (ZnO) and silver-doped zinc oxide nanoparticles (ZnO:5%Ag) were developed in order to evaluate the influence of nanoparticle incorporation on the physicochemical, thermal, and morphological properties of the produced membranes. The nanoparticles were synthesized by the co-precipitation method with the pH controlled at 14 and subsequently calcined at 500 °C. The polymer solutions were prepared with 10 wt.% PLA dissolved in dichloromethane and dimethylformamide at a 3:1 (v/v) ratio, containing three different nanoparticle concentrations (0.25 wt.%, 1 wt.%, and 2 wt.% relative to PLA). The membranes were obtained by electrospinning under a voltage of 15 kV, a tip-to-collector distance of 15 cm, and a flow rate of 1.02 mL/h. After electrospinning, the polymeric membranes were characterized to investigate their microstructure and evaluate their performance. SEM analyses revealed that the ZnO nanoparticles exhibited an irregular and highly porous morphology, with the formation of micrometric agglomerates composed of nanometric particles. The ZnO:5%Ag nanoparticles did not show significant morphological changes compared to pure ZnO. X-ray diffraction (XRD) confirmed the hexagonal wurtzite crystalline structure of ZnO, and silver doping led to a reduction in peak intensities. According to SEM, the PLA polymeric fibers were continuous and randomly distributed, and the addition of ZnO and ZnO:5%Ag did not result in the presence of nanoparticle agglomerates on the fiber surfaces. Thermal analyses showed that ZnO, when incorporated into polymeric fibers, can act as a heat transfer element within the fiber structure and as a potential catalyst for PLA polymer chain scission reactions. Differential Scanning Calorimetry (DSC) analysis indicated that the nanoparticles acted as nucleating agents and modified the organization of the polymer chains. The membranes exhibited hydrophobic behavior and high water vapor permeability at higher concentrations of ZnO and ZnO:5%Ag.

Keywords: electrospinning; poly(lactic acid); zinc oxide; silver-doped zinc oxide; biomaterials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática do processo de eletrofição.....	17
Figura 2- Micrografia MEV de fibras eletrofiadas (a) aleatoriamente distribuídas e (b) alinhadas.....	18
Figura 3- Estrutura química da unidade de repetição do poli(ácido láctico).....	26
Figura 4- Estrutura cristalina da forma wurtzita do ZnO.....	28
Figura 5- Esquema de síntese co-precipitação do óxido de zinco puro.....	31
Figura 6- Esquema de síntese co-precipitação óxido de zinco dopado com prata....	32
Figura 7- Equipamento de eletrofição, imagem à esquerda fonte de alta tensão, e imagem à direita composta pela bomba de infusão e pelo coletor metálico.	34
Figura 8- Goniômetro utilizado para a medição do ângulo de contato das membranas eletrofiadas de ZnO e ZnO:5%Ag.....	37
Figura 9- (a) membranas eletrofiadas de ZnO e ZnO:5%Ag.....	38
Figura 10- Microscopia Eletrônica de Varredura das nanopartículas (a) ZnO puro e (b) ZnO: 5% Ag.....	39
Figura 11- Difractogramas de DRX do ZnO, ZnO:5%Ag, padrão ZnO e Ag.....	40
Figura 12- Espectros de PL de ZnO puro e ZnO:5%Ag.....	42
Figura 13- Micrografias MEV das membranas eletrofiadas (a) PLA, (b) PLA/0,25% ZnO, (c) PLA/1% ZnO, (d) PLA/2% ZnO, (e) PLA/0,25% ZnO:5%Ag, (f) PLA/1%ZnO:5%Ag, (g) PLA/2% ZnO:5%Ag.....	44
Figura 14- Distribuição do diâmetro das fibras eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	46
Figura 15- Espectros das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	48
Figura 16- Curvas termogravimétricas de (a) TGA e (b) DTGA das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	49
Figura 17- Curvas de DSC das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag (a) 1º aquecimento, (b) Resfriamento e (c) 2º aquecimento.....	53
Figura 18- Média de ângulo de contato das membranas PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	56
Figura 19- Permeabilidade ao Vapor da Água (PVA) das membranas poliméricas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Quantidade em massa para cada amostra	33
Tabela 2- Cálculo dos dados cristalográficos das nanopartículas de ZnO puro e ZnO:5%Ag.....	41
Tabela 3- Diâmetro médio das fibras eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.	46
Tabela 4- Temperaturas de degradação térmica das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag	51
Tabela 5- Valores de transição térmica do 1º aquecimento e 2º aquecimento por DSC das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.....	55

LISTA DE ABREVIÇÕES E SIGLAS

Ag	Prata
AgNPs	Nanopartículas da prata
ASTM	American Society for Testing and Materials
DCM	Diclorometano
DMF	Dimetilformamida
DRX	Difração de raios-X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTGA	Derivada da Análise Termogravimétrica
FDA	<i>Food and Drug Administration</i>
FTIR	Espectroscopia por infravermelho com transformada de Fourier
LabNanO	Laboratório de Nanoestruturas Optoeletrônicas
LABFQ	Laboratório de Físico-Química
LCMA	Laboratório Multiusuário de Caracterização Avançada
LCME	Laboratório Central de Microscopia eletrônica
LTE	Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopias
LTMA	Laboratório de Transformações e Materiais Avançados
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
NTC	Nanotubos de Carbono
PAN	Poliacrilonitrila
P.A.	Pureza Analítica
PA6	Poliamida 6
PCL	Poli(ϵ -caprolactona)
PGA	Poli(ácido glicólico)
PGE	Poli(etilenoglicol)
pH	Potencial Hidrogeniônico
PHAs	Polihidroxialcanoatos
PHB	Poli(3-hidroxibutirato)
PL	Espectroscopia de Emissão de Fotoluminescente
PLA	Poli(ácido láctico)
PLGA	Poli(ácido láctico-co-ácido glicólico)
PLLA	Poli(ácido L-láctico)
PVA	Permeabilidade a vapor d'água
ROS	Espécies Reativas de Oxigênio
TGA	Análise Termogravimétrica
UEPG	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
ZnO	Óxido de zinco
ZnO:5%Ag	Óxido de zinco dopado com prata

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2 DESENVOLVIMENTO	16
2.1 ELETROFIAÇÃO.....	16
2.2 MEMBRANAS ELETROFIADAS PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS	21
2.3 BIOMATERIAIS	24
2.4 POLI(ÁCIDO LÁCTICO) – PLA	26
2.5 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO	27
2.6 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO DOPADO COM PRATA	28
2.7 MÉTODO DE SÍNTESE DAS NANOPARTÍCULAS DE ZNO.....	29
3 MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1 MATERIAS	30
3.2 SÍNTESE DE ÓXIDO DE ZINCO PURO	30
3.3 SÍNTESE DE ÓXIDO DE ZINCO DOPADO COM PRATA.....	31
3.4 PREPARAÇÃO DE SOLUÇÕES POLIMÉRICAS	33
3.5 PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO	34
4 CARACTERIZAÇÕES	35
4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	35
4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)	35
4.3 ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO DE FOTOLUMINESCENTE (PL)	35
4.5 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	36
4.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)	36
4.7 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC).....	36
3.8 ÂNGULO DE CONTATO.....	37
3.9 PERMEABILIDADE A VAPOR D'ÁGUA (PVA)	37
5 RESULTADOS	38
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS	38
5.2 CARACTETIZAÇÃO DAS MEMBRABAS ELETROFIADAS COM ZNO PURO E DOPADO COM AG	43

6 CONCLUSÃO	58
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, um esforço considerável tem sido dedicado à criação de novos biomateriais com propriedades físico-químicas adequadas, capazes de regenerar tecidos danificados e restaurar as suas funções (Brokesh; Gaharwar, 2020). Os biomateriais podem ser de origem metálica, cerâmica, polimérica ou compósita e dentre essas categorias, os polímeros têm se destacado por sua versatilidade de processamento e pela possibilidade de obtenção de materiais biocompatíveis e biodegradáveis, capazes de interagir de forma controlada com o organismo e de se degradar naturalmente após o cumprimento de sua função (Pires; Bierhalz; Moraes, 2015).

Para ser utilizado em aplicações biomédicas os polímeros precisam ser biocompatíveis e algumas vezes biodegradáveis. Os biopolímeros mais utilizados são o poli(ácido láctico) (PLA), poli(ácido glicólico) (PGA) e seus copolímeros, poli(ácido láctico-co-ácido glicólico) (PLGA), poli(ϵ -caprolactona) (PCL), polihidroxialcanoatos (PHAs) e poli(3-hidroxiбутирато) (PHB) (Pires; Bierhalz; Moraes, 2015). Esses biopolímeros, têm se destacado como potenciais candidatos para diversas aplicações biomédicas, incluindo conduítes para regeneração de nervos periféricos (Castro, 2022), máscaras faciais multifuncionais (Hemkemaier, 2024) e curativos avançados para tratamento de feridas cutâneas (Huamani, 2025).

A partir de polímeros biocompatíveis e biodegradáveis, é possível produzir membranas pelo processo de eletrofição. Devido ao potencial de aplicação desses biomateriais em diversas áreas, o campo das nanofibras tem despertado considerável interesse na biotecnologia e na medicina, apresentando um rápido desenvolvimento nos últimos anos (Eatemadi *et al.*, 2014).

As membranas eletrofiadas, obtidas pela eletrofição, possuem uma estrutura flexível e uma elevada relação área de superfície-volume, o que pode aumentar a adesão celular e proliferação e atividades de diferenciação celular (Yan *et al.*, 2022). Na eletrofição, as fibras poliméricas obtidas podem ser aleatórias ou alinhadas dependendo do tipo de coletores utilizado. As fibras aleatórias são comumente depositadas em coletores planos, nas quais o fio polimérico se deposita de forma desordenada no coletor metálico. Esse tipo de morfologia resulta em uma estrutura isotrópica e elevada porosidade. Já as fibras alinhadas são depositadas em coletores

que orientam o fio polimérico, gerando uma morfologia de estrutura anisotrópica, na qual as fibras seguem uma direção predominante.

Além disso a formação, morfologia e diâmetro das fibras são dependentes dos parâmetros de solução, processo e ambientais, para obtenção de fibras com menor incidência de defeitos e maior uniformidade.

Dentre os biopolímeros utilizados para a produção de membranas eletrofiadas para aplicações biomédicas, o poli(ácido láctico) (PLA) destaca-se por ser reconhecido pela *Food and Drug Administration* (FDA) como um material de baixa toxicidade (Capuana *et al.*, 2022). O PLA é um poliéster alifático amplamente estudado por apresentar biocompatibilidade e biodegradabilidade (Chrysafi; Ainali; Bikiaris, 2021). Além disso, trata-se de um polímero produzido a partir de recursos biológicos renováveis, como milho e cana-de-açúcar, o que contribui para seu baixo custo de produção e sustentabilidade (Farah; Anderson; Langer, 2016). O processo de degradação de poliésteres como o PLA ocorre por hidrólise das ligações éster, levando à redução do peso molecular e à formação de ácido láctico como produto final (Castro-Aguirre *et al.*, 2016; Gorrasi; Pantani, 2017). O tempo de degradação em ambiente em solo simulado ocorreu após 120 dias (Huamani, 2025). De acordo com Huamani (2025) a degradação *in vitro* do PLA iniciou após 15 dias e manteve sua estrutura até 300 dias.

A incorporação de nanopartículas de óxido de zinco puro (ZnO) dopado com prata (ZnO:Ag) ao PLA tem sido amplamente investigada devido ao potencial de produzir nanocompósitos com propriedades estruturais e funcionais superiores. Estudos apontam que o ZnO pode melhorar o desempenho mecânico e conferir atividade antibacteriana ao PLA, ampliando suas possibilidades de aplicação (Chong *et al.*, 2022). Quando dopado com prata, o óxido de zinco apresenta efeito antimicrobiano ainda mais intenso, favorecendo o desenvolvimento de materiais com ação biocida de amplo espectro (Vikal; Gautam; Ambedkar, 2022; Sharma *et al.*, 2020).

Nanopartículas como de prata, óxidos de prata e óxidos de zinco são exemplos de nanopartículas antimicrobianas. O ZnO se destaca como uma das nanopartículas mais promissoras para aplicações médicas devido às suas propriedades antibacterianas, antifúngicas, antivirais e à facilidade de síntese de estruturas e tamanhos variados. A ação bactericida do ZnO é relacionada principalmente à sua

habilidade de induzir estresse oxidativo em bactérias (Belal; Gad, 2023), com a cristalinidade das nanopartículas exercendo um papel fundamental em seus efeitos biológicos. Dessa forma, o material é classificado como não tóxico pela FDA (Putti *et al.*, 2015).

Uma das estratégias utilizada para potencializar os efeitos antimicrobianos e melhorar a biocompatibilidade é a dopagem do ZnO com íons metálicos, como a prata (Oliveira *et al.*, 2021). Trevisan *et al.* (2025) buscou explorar o potencial das nanopartículas de ZnO a partir da combinação com a Ag e observou um avanço na eficácia e biocompatibilidade no combate a cepas bacterianas resistentes a antibióticos. As nanopartículas de prata (AgNPs) podem ser aplicadas no controle de microrganismos e prevenção de infecções (Kim *et al.*, 2007). Dentre uma variedade de nanopartículas utilizadas em tratamentos antibacterianos a AgNPs é a mais amplamente explorada devido sua promissora eficácia antimicrobiana (Tang; Zheng, 2018).

A dopagem do óxido de zinco com prata busca aproveitar o efeito combinado desses materiais. O ZnO é estável e biocompatível, enquanto a prata é amplamente reconhecida por sua forte ação antimicrobiana. Quando associados, eles intensificam a geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), aumentam a atividade bactericida e melhoram o desempenho do material em aplicações biomédicas (Al-Aaraji *et al.*, 2025).

As nanopartículas de ZnO e ZnO dopadas com prata podem ser obtidas pela síntese de co-precipitação uma das mais empregadas devido à sua simplicidade, baixo custo e eficiência na produção em escala. Nesse método, a formação das partículas ocorre inicialmente pela nucleação de pequenos cristalitos, que posteriormente passam por processos de crescimento e agregação, resultando em partículas maiores e mais estáveis. Essa técnica apresenta como vantagem o controle das características estruturais e morfológicas das partículas, além de possibilitar a obtenção de nanopartículas homogêneas (Xia, 2004).

Dentro deste contexto, este trabalho busca fabricar membranas eletrofiadas a partir do poli(ácido láctico) (PLA) contendo nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) puro e óxido de zinco dopado com prata (ZnO:5%Ag). O PLA foi utilizado por ser um polímero biodegradável e biocompatível, sendo ele obtido a partir de fontes renováveis. O ZnO por apresentar propriedades antibacterianas, antifúngicas,

antivirais e à facilidade de síntese de estruturas e a prata (Ag) por potencializar os efeitos antimicrobianos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Fabricação de membranas compostas de poli(ácido láctico) (PLA) com óxido de zinco puro e óxido de zinco dopado com prata obtidas pelo processo de eletrofição, para aplicação biomédica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a morfologia e estrutura cristalina do óxido de zinco puro e dopado com prata obtidos pela síntese de co-precipitação;
- Avaliar como a variação da concentração de óxido de zinco puro e dopado com prata afeta a morfologia, diâmetro, as propriedades físico-químicas e térmicas das membranas produzidas;
- Avaliar se adição das nanopartículas de óxido de zinco puro e dopado com prata alteram a hidrofobicidade e permeabilidade ao vapor d'água do material;
- Avaliar qual concentração de óxido de zinco puro e dopado com prata tem maior efeito no PLA;

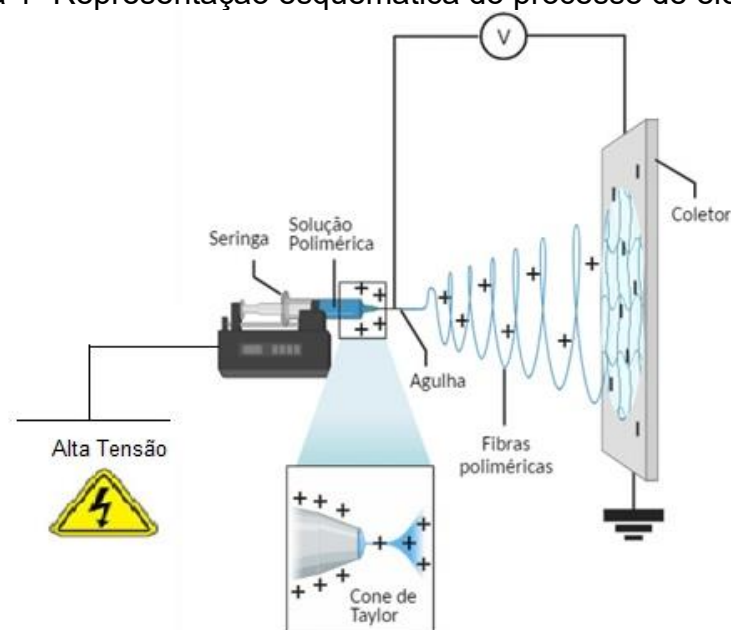
2 DESENVOLVIMENTO

2.1 ELETROFIAÇÃO

A eletrofição utiliza forças eletrostáticas para produzir fibras, a partir de soluções poliméricas ou polímeros fundidos, com diâmetros de nanômetros até micrômetros (Chew *et al.*, 2006). As fibras eletrofiadas apresentam alta área de superfície específica (1 - 100 m²/g), alta porosidade 60 - 95 %, tamanhos de poro que variam entre 1 - 10 µm, alta permeabilidade e fácil funcionalização da superfície (Chiono; Tonda-Turo, 2015). Esta técnica por ser simples, versátil, de baixo custo e adaptável, vem sendo uma das mais utilizadas para a fabricação de nanofibras poliméricas (Sousa, 2020; Rossin *et al.*, 2020). A eletrofição recebeu muita atenção para aplicações biomédicas, principalmente devido ao crescente interesse em nanotecnologias e às propriedades únicas dos materiais (Kai; Liow; Loh, 2014).

O sistema de eletrofiação possui três componentes essenciais: uma fonte de alta tensão, uma seringa acoplada a uma agulha metálica e um coletor condutor aterrado (Merlini, 2014) (Figura 1).

Figura 1- Representação esquemática do processo de eletrofiação



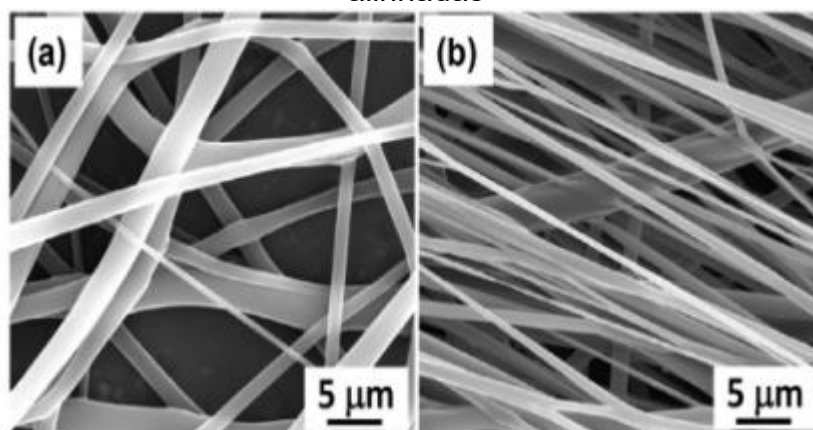
Fonte: Adaptado de Huamani (2025)

A técnica consiste na solubilização do polímero a ser processado em um solvente apropriado. A solução é inserida em uma seringa contendo uma agulha metálica, à qual é aplicada uma alta tensão (máximo 30 kV), para que a solução seja estirada por meio da força eletrostática. Devido a aplicação desta tensão, um fio polimérico, eletricamente carregado, é formado e puxado em direção ao coletor metálico, com polaridade oposta a força elétrica aplicada na ponta da agulha. Na ponta da agulha, a solução polimérica deforma-se de uma gota esférica pendente para uma forma cônica, conhecida como “Cone de Taylor”. O solvente utilizado é evaporado durante o percurso e as fibras são depositadas sobre o coletor (Yamada, 2016).

A distância entre a agulha e o coletor influencia na intensidade do campo elétrico e no tempo de evaporação do solvente. Portanto, a distância deve ser suficiente para que ocorra a evaporação do solvente e as fibras secas sejam depositadas no coletor. Caso isso não ocorra, pode haver o coalescimento das fibras

(Castro, 2022). Normalmente, são utilizadas distâncias entre 5 e 30 centímetros (Merlini, 2014) e a distribuição das fibras pode ser controlada através do tipo de coletor e da velocidade de rotação do coletor. Há diferentes tipos de coletores principais, sendo que os principais são os estáticos e os rotatórios. Os coletores estáticos permitem a produção de fibras aleatoriamente distribuídas (Figura 2 a), enquanto os coletores rotatórios tendem a produzir fibras alinhadas, Figura 2 b), (Stachewicz *et al.*, 2015).

Figura 2- Micrografia MEV de fibras eletrofiadas (a) aleatoriamente distribuídas e (b) alinhadas



Fonte: Stachewicz *et al.* (2015)

A morfologia das fibras obtidas por eletrofiação é influenciada por diferentes parâmetros, tais como, parâmetros de processo, de solução e parâmetros ambientais. Dessa maneira, a compreensão do efeito de cada um desses parâmetros é necessária para a obtenção de fibras com morfologia e orientação adequados para a aplicação (Castro, 2022).

Os fatores relacionados à solução são:

- Massa molar: um polímero com alto valor de massa molar possui em sua estrutura emaranhados longos, que favorecem o processo de eletrofiação, de modo a dar continuidade e facilitar a fabricação da fibra (Yamada, 2016).

- Concentração: em uma concentração baixa há um baixo grau de emaranhamento das cadeias, levando a instabilidade do jato no capilar, impedindo que a eletrofiação ocorra. Mas, quando a concentração é maior, o grau de emaranhamento aumenta, e isto promove a continuidade da fibra, porém aumentos progressivos na concentração aumentam os diâmetros das fibras (Yamada, 2016; Barboza, 2018).

- Viscosidade: uma viscosidade baixa gera defeitos do tipo *beads* ao longo da fibra e a ruptura do jato de eletrospiação. Porém, uma viscosidade alta resulta em diâmetros maiores na fibra. Deste modo, o controle da concentração e da massa molar são de extrema importância, já que estes dois fatores irão influenciar na viscosidade, que conseqüentemente irá influenciar na continuidade e microestrutura da fibra. (Yamada, 2016; Costa, 2012).

- Tensão superficial: após a tensão elétrica aplicada superar a tensão superficial da gota, ocorre a formação do cone de Taylor. Portanto, tensões superficiais baixas favorecem o processo para formar as fibras (Costa, 2012).

- Condutividade iônica da solução: uma condutividade alta resulta em uma maior mobilidade dos portadores de carga em solução. Ao aplicar um campo elétrico, as cargas irão se orientar de modo que haja um estiramento maior, levando a diminuição do diâmetro das fibras. Também pode diminuir a tensão crítica necessária para formar o cone de Taylor, possibilitando o uso de tensões mais baixas (Yamada, 2016; Costa, 2012).

- Volatilidade do solvente: não pode ser muito alta, pois leva ao ressecamento da solução ou a formação de poros. Por outro lado, se for muito baixa, o solvente pode permanecer na fibra após chegar ao coletor, fazendo com que as fibras se grudem umas nas outras formando uma rede interligada ou uma membrana densa (Yamada, 2016).

- Propriedade dielétrica do solvente: uma constante dielétrica maior favorece o processo e resulta em um elevado chicoteamento e estiramento do jato, fazendo com que os *beads* sejam eliminados e o diâmetro final seja reduzido (Yamada, 2016).

Os fatores relacionados ao processo são:

- Tensão elétrica: este fator influencia na formação do cone de Taylor e da fibra. Uma tensão alta pode acarretar em um aumento do estiramento e diminuição do diâmetro. Porém, se este aumento for muito elevado, pode causar um estiramento incompleto, já que o campo elétrico irá diminuir o tempo da fibra chegar ao coletor. Também pode levar a evaporação muito rápida do solvente, tornando a solução ressecada, podendo ocorrer o entupimento na ponta da seringa. A faixa de tensão utilizada é de 1 a 30 kV (Alcobia, 2013).

- Distância entre agulha e coletor: as distâncias podem variar de 5 a 30 cm (Alcobia, 2013). Uma distância baixa não possibilita que haja o tempo necessário para

que o solvente evapore e o estiramento seja realizado de maneira eficiente, além de aumentar a força do campo elétrico e a aceleração do jato. Porém, se a distância for muito alta não gera um campo elétrico capaz de estirar as fibras, tornando os seus diâmetros maiores (Yamada, 2016). Deste modo, esta distância deve possuir valor mínimo para que o estiramento e evaporação do solvente ocorram de maneira eficaz, e que se tenham diâmetros menores para a fibra (Costa, 2012).

- Vazão de alimentação: uma vazão controlada é necessária para que não ocorra o aumento do diâmetro da fibra, já que há uma proporção direta entre esses dois fatores. Além de que, um aumento da vazão implica em um aumento na quantidade de solvente, pois há mais massa, e isso requer um tempo maior para a evaporação completa do solvente, e se a evaporação não acontecer pode levar a coalescência da fibra (Yamada, 2016).

Os fatores relacionados ao ambiente são:

- Umidade: se a umidade externa for alta, normalmente acima de 60%, ocorrerá a formação de gotículas de água sobre as fibras poliméricas resultantes da eletrofiação. Se o solvente for muito volátil, o que ocorre é a formação de poros, que podem aumentar de tamanho e profundidade com o aumento da umidade. Quando a umidade do ambiente for baixa, o solvente irá evaporar de modo mais rápido (Yamada, 2016; Costa, 2012).

- Temperatura: está correlacionada com a viscosidade e volatilidade da solução, já que com o aumento da temperatura, no ambiente e na solução, tem-se uma diminuição da viscosidade e aumento da taxa de evaporação do solvente na solução, o que pode favorecer o processo (Yamada, 2016).

Polímeros naturais e sintéticos ou a mistura de ambos podem ser empregados na fabricação de nanofibras, contanto que eles possam ser dissolvidos em solvente apropriados para obter soluções (Mishra *et al.*, 2019). As propriedades das nanofibras poliméricas, sejam elas compostas por polímero sintético ou natural, são afetadas principalmente pelas propriedades do polímero e pelos aspectos morfológicos (Xue *et al.*, 2017). Uma das propriedades mais importantes quando se fala de fabricação de fibras por eletrofiação é seu diâmetro (Mercante *et al.*, 2017). Da mesma forma, uma característica mais comum é a aparência da fibra, podendo ter a superfície lisa ou porosa e podem ocorrer *beads* (defeitos na forma de gotas) nas nanofibras (Mercante *et al.*, 2021). O *bead* é uma irregularidade mais comum das fibras e são regiões com

um aumento considerável no diâmetro, feitos por inúmeras combinações de fatores, como inapto emaranhamento das cadeias poliméricas, falta de estiramento das fibras, uma inadequada taxa de evaporação dos solventes, baixa concentração de polímero em solução, alta tensão de superfície da solução e uma diferença de potencial elétrico insuficiente (Hemkemaier, 2021; Merlini, 2014).

2.2 MEMBRANAS ELETROFIADAS PARA APLICAÇÕES BIOMÉDICAS

O uso de membranas eletrofiadas de materiais poliméricos biocompatíveis para a substituição de tecidos ou órgãos em seres humanos tem como objetivo acelerar o processo de recuperação, favorecendo uma melhor interação entre o tecido e o implante (Venturelli, 2016). As membranas obtidas por eletrofiação apresentam uma estrutura flexível e elevada relação área de superfície-volume, características que favorecem a adesão celular, a proliferação e atividades de diferenciação celular (Yan *et al.*, 2022). Segundo Agarwal *et al.* (2008), o uso da eletrofiação na engenharia de tecidos tem se concentrado principalmente na produção de membranas a partir de diferentes biomateriais, com o objetivo de reproduzir dimensões e morfologias semelhantes à matriz extracelular natural. A seleção adequada dos polímeros, sejam sintéticos ou naturais, como poli(ϵ -caprolactona) (PCL), poli(ácido glicólico) (PGA), poli(ácido láctico) (PLA) e seus copolímeros, é essencial para ajustar as propriedades mecânicas e o tempo de degradação conforme o tipo de tecido a ser regenerado. Além disso, novas formulações de biomateriais e modificações no processo de eletrofiação têm sido desenvolvidas para otimizar a estrutura das fibras e favorecer a adesão, proliferação e diferenciação celular, promovendo a formação de tecidos funcionais.

As membranas eletrofiadas podem ser utilizadas na aplicação biomédica, por apresentarem uma estrutura porosa, uma elevada área de superfície-volume, flexibilidade, biocompatibilidade, biodegradabilidade e não toxicidade. Há aplicações biomédicas como as máscaras faciais multifuncionais compostas por poli(ácido L-láctico) (PLLA) com óxido de zinco e líquidos iônicos na qual a porosidade permite a permeabilidade ao vapor d'água, e apresentam boa atividade antibacteriana com a incorporação das nanopartículas de óxido de zinco e líquidos iônicos (Hemkemaier, 2024).

No estudo de Silva (2024) as membranas eletrofiadas de poli (ϵ -caprolactona) com oleorresina de copaíba e aditivo nanoestruturado (ZnO) para aplicações no tratamento avançado de lesões cutâneas, conclui que o ZnO atua como agente

nucleante, proporcionando alterações térmicas e mecânicas, sem comprometer a integridade da usabilidade do curativo e o oleorresina contribui para a redução da inflamação e promoção da regeneração (ação antimicrobiana), enquanto as nanopartículas de ZnO oferecem propriedades antimicrobianas, prevenindo infecções e acelerando o processo cicatricial.

Os materiais fibrosos compostos de PLA com a adição de nanopartículas, como de óxido de zinco (ZnO) obtidos através de eletrofiação são uma proposta, pois podem combinar as propriedades benéficas do polímero e da carga inorgânica, biodegradabilidade, atividade fotocatalítica, antiviral e bactericida garantem possibilidade de aplicação desde áreas alimentícia a médica, na fabricação de embalagens bactericidas a filtros contra agentes patogênicos (Singhvi; Zinjarde; Gokhale, 2019; Babaahmadi *et al.*, 2021).

Nanopartículas de prata (AgNPs) em nanofibras poliméricas obtidas por eletrofiação foram estudadas por Kharaghani *et al.* (2018) os autores obtiveram nãotecidos nanofibrosos de poliácridonitrila (PAN) contendo nanopartículas de prata e constataram que o material desenvolvido apresentou notáveis propriedades antimicrobianas. Estudos relatam que nanofibras de polímeros, como acetato de celulose, incorporadas com nanopartículas de prata apresentam atividade antimicrobiana contra microrganismos como *E. coli* e *S. aureus*. Além disso, observa-se que, à medida que o teor de nanopartículas de prata aumenta, a atividade antimicrobiana das fibras também se intensifica (Maliszewska; Czapka, 2022).

Os *scaffolds* são estruturas porosas tridimensionais projetadas para sustentar a formação de novos tecidos e matriz extracelular, além de permitir a migração celular e difusão de nutrientes. Para que esses sistemas funcionem adequadamente, parâmetros como alta porosidade, elevada área superficial, tamanho de poro adequado, interconectividade entre poros, biocompatibilidade, biodegradabilidade, ausência de toxicidade e boa integridade estrutural são essenciais. Essas características influenciam diretamente o crescimento celular, a densidade de células semeadas e a formação de vasos sanguíneos após a implantação *in vivo* (Chen *et al.*, 2020; Su *et al.*, 2021; Alberto *et al.*, 2023). Os *scaffolds* biodegradáveis desempenham um papel essencial na formação de novos tecidos, uma vez que fornecem suporte estrutural para a adesão, proliferação e diferenciação celular. Diversos polímeros naturais já foram eletrofiados para aplicações biomédicas, devido à sua elevada

biocompatibilidade e à semelhança com os componentes macromoleculares presentes no corpo humano (Mittal *et al.*, 2024).

As membranas eletrofiadas têm se destacado como materiais promissores para curativos devido às suas características estruturais, como elevada área de superfície, capacidade de absorção de exsudatos e habilidade de manter níveis adequados de umidade no leito da ferida (Abdelhakeem *et al.*, 2023). A porosidade das nanofibras desempenha papel fundamental no desempenho dos curativos como estruturas porosas que favorecem a permeabilidade ao ar e a troca de gases, especialmente oxigênio, o que é essencial para a respiração celular e regeneração tecidual, enquanto poros menores ou bem projetados funcionam como barreira física contra a penetração de microrganismos, contribuindo para a proteção da ferida contra infecções bacterianas (Lu; Zhou; Song, 2024; Yu *et al.*, 2023; Lanno *et al.*, 2020). Um exemplo é o curativo avançado para tratamento de feridas cutâneas compostas por PLLA e óleo essencial de manjerição, que apresentam propriedades antibacterianas, antiinflamatórias, antioxidantes e uma elevada porosidade melhorando na permeabilidade ao vapor da água na qual o óleo essencial acelera o tratamento de cicatrização (Huamani, 2025). Os curativos feitos pelo processo de eletrofiação protegem a ferida contra microrganismos externos e promovem a cicatrização ao absorver exsudatos e manter um ambiente úmido adequado (Lu; Zhou; Song, 2024). Diferentes materiais bioativos têm sido incorporados nesses curativos, como os antibióticos, flavonoides e os extratos naturais, por meio de fibras eletrofiadas, filmes, hidrogéis e esponjas para promover a regeneração nos estágios iniciais da cicatrização (Yan *et al.*, 2024). Para otimizar a liberação do fármaco, a estrutura porosa das nanofibras favorece a difusão das partículas terapêuticas, garantindo uma liberação controlada na ferida (Lao *et al.*, 2026).

Além das aplicações em curativos, as membranas eletrofiadas também têm sido amplamente estudadas como *scaffolds* para regeneração de tecidos, especialmente no tratamento de lesões de nervos periféricos. No estudo de Castro (2022) os conduítes eletrofiados compostos por (poli (ácido láctico-co-glicólico)) (PLGA) e nanotubos de carbono (NTC) demonstraram propriedades ideais para essa aplicação, como alta porosidade e adequada permeabilidade, que favorecem a troca de nutrientes e gases, além de substrato alinhado e canais internos que orientam o crescimento axonal. A incorporação dos NTC também confere condutividade elétrica

ao material, característica essencial para estimular a regeneração neural e restaurar a atividade bioelétrica local. Esses resultados mostram que a combinação entre propriedades estruturais (porosidade, alinhamento, canais internos) e propriedades funcionais (condutividade e biocompatibilidade) é determinante para o desenvolvimento de *scaffolds* multifuncionais capazes de promover o crescimento e a comunicação entre as células nervosas.

2.3 BIOMATERIAIS

Do ponto de vista da saúde, biomateriais são projetados para interagir com tecido vivo de forma segura, apresentando propriedades que minimizam reações imunológicas adversas e promovem a regeneração (Tripathi *et al.*, 2023). Os biomateriais desempenham um papel crescente na área da saúde, sendo componentes centrais em dispositivos, implantes, sistemas de liberação de fármacos, tecidos artificiais e curativos, refletindo uma diversificação e expansão do mercado global (Zhao *et al.*, 2024). Dentre os biomateriais empregados na área da saúde estão dispositivos médicos (biossensores, tubos de circulação sanguínea, hemodiálise), implantes (suturas, placas, válvulas cardíacas, lentes, dentes), sistemas de liberação de fármacos (filmes, implantes subdérmicos, partículas), órgãos artificiais (coração, rim, fígado, pulmões, pele) e curativos, entre outros (Zhao; Li; Yang, 2022).

Segundo Domingues (2017), a biocompatibilidade é classificada de acordo com sua capacidade de induzir ou causar morte de tecidos ou células (citotoxicidade), induzir a formação de câncer (carcinogenicidade), danificar genes (mutagenicidade), induzir respostas imunológicas (alergenicidade) ou indução de coagulação sanguínea (trombogenicidade). A longo prazo, a biocompatibilidade está associada principalmente à composição química do material e a natureza dos produtos gerados em sua degradação. A curto prazo, está associada a suas propriedades químicas e de superfície. Propriedades de superfície são modificadas para aumentar a interação do material com o paciente, visando suprimir sua resposta imunológica. A hidrofiliabilidade e a presença de grupos iônicos na superfície são características bastante observadas, uma vez que interferem diretamente na adesão de células sobre os biomateriais. Os mecanismos de degradação variam conforme a composição do material, mas a hidrólise de grupos funcionais é bastante recorrente em polímeros sintéticos.

Dentre os biomateriais, destacam-se os polímeros biodegradáveis naturais, como os polissacarídeos e proteínas. Os polissacarídeos são biopolímeros formados por unidades repetidas de monossacarídeos, sendo altamente biocompatíveis e capazes de formar hidrogéis com arquitetura porosa, o que os torna úteis em engenharia de tecidos e aplicações terapêuticas (Mohammed; Mahmood, 2024). Entre os principais exemplos estão a quitosana, o alginato e o ácido hialurônico. Já as proteínas naturais, constituídas por cadeias de aminoácidos, apresentam excelente compatibilidade com tecidos biológicos e favorecem adesão celular, cicatrização e regeneração, sendo amplamente empregadas em hidrogéis e *scaffolds* (Cheng *et al.*, 2021). Entre os exemplos mais utilizados estão o colágeno, a gelatina e a fibrina.

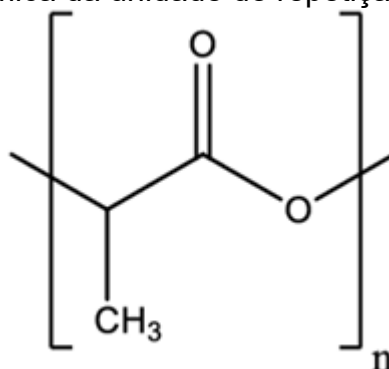
Os polímeros sintéticos, como policaprolactona (PCL), poli(ácido láctico) (PLA), poli(ácido glicólico) (PGA) e seus copolímeros, como poli(ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) e poli(etilenoglicol) (PEG), apresentam propriedades mecânicas e físicas reprodutíveis, incluindo resistência à tração, módulo de elasticidade e perfis de degradação ajustáveis, o que os torna amplamente utilizados em aplicações biomédicas (Lei *et al.*, 2019). Esses polímeros degradam-se de forma controlada quando expostos a fluidos corporais ou após o descarte, por mecanismos hidrolíticos ou enzimáticos, liberando produtos biodegradáveis e biocompatíveis. PLA, PGA, PLGA e PCL são exemplos clássicos de polímeros sintéticos biodegradáveis empregados em engenharia de tecidos e sistemas de liberação controlada de fármacos, devido à presença de grupos polares suscetíveis ao ataque hidrolítico, conferindo biodegradabilidade (Lei *et al.*, 2019).

Para evitar inflamações associadas a implantes permanentes e reduzir a necessidade de cirurgias para remoção de dispositivos temporários, os polímeros biodegradáveis, como o PLA, têm ganhado destaque em aplicações biomédicas, pois podem ser reabsorvidos pelo organismo sem causar efeitos adversos a longo prazo. Esses materiais sofrem redução gradual da massa molar quando expostos aos fluidos corporais, processo decorrente de reações de degradação desencadeadas por mecanismos hidrolíticos ou enzimáticos, incluindo ataque pela água, íons e radicais livres, liberando produtos biodegradáveis e biocompatíveis (Mitchell *et al.*, 2020).

2.4 POLI(ÁCIDO LÁCTICO) – PLA

Um dos polímeros mais utilizados em aplicações biomédicas é o poli(ácido láctico) (PLA) (Figura 3), um poliéster termoplástico alifático produzido a partir de fontes renováveis, como milho, beterraba e cana-de-açúcar. Além de ser derivado de recursos sustentáveis, o PLA apresenta baixo custo de produção e sustentabilidade (Farah; Anderson; Langer, 2016). O PLA é reconhecido pela FDA como um polímero de baixo nível tóxico (Capuana *et al.*, 2022).

Figura 3- Estrutura química da unidade de repetição do poli(ácido láctico)



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O PLA tornou-se, nos últimos anos, um dos polímeros mais utilizados para a produção de *scaffolds* em engenharia de tecidos, especialmente por eletrofiação, devido às suas propriedades favoráveis, como biodegradabilidade, biocompatibilidade, boas características mecânicas e facilidade de processamento em solução (Maleki *et al.*, 2022). Pesquisas recentes reforçam que essas características tornam o PLA um material versátil e eficiente para aplicações biomédicas, principalmente na regeneração tecidual (Lei *et al.*, 2019).

O PLA apresenta temperatura de transição vítrea (T_g) entre 55–65 °C e temperatura de fusão (T_m) em torno de 170–180 °C, em concordância com dados recentes sobre suas propriedades térmicas (Farah; Anderson; Langer, 2016). Foi relatado que PLA com alta massa molar pode levar entre 2 e 6 anos na total reabsorção *in vivo* (Nair; Laurencin, 2007). A taxa de degradação depende do grau de cristalinidade do polímero, bem como da porosidade da matriz (Nair; Laurencin, 2007). Embora se saiba que o polímero perde sua resistência em aproximadamente 6 meses quando hidrolisado, não ocorrem mudanças significativas na massa por um longo tempo (Nair; Laurencin, 2007).

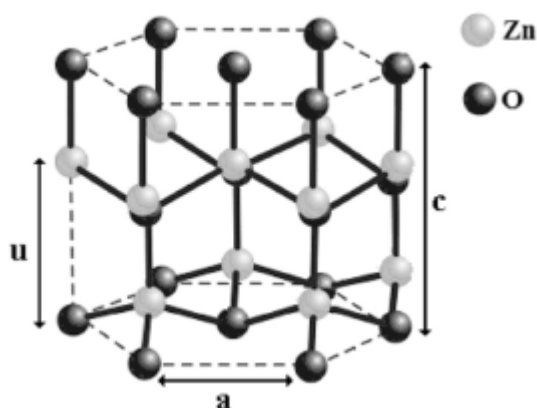
O processo de degradação do PLA ocorre através da hidrólise das ligações ésteres que resulta na formação de ácido láctico, que é metabolizado pelo organismo e convertido em dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) pelo ciclo de Krebs, o que justifica sua aplicação em biomateriais reabsorvíveis (Farah; Anderson; Langer, 2016; Elsayy *et al.*, 2017). A degradação do PLA ocorre por dois mecanismos principais: erosão superficial e degradação em massa (Lins *et al.*, 2016). Em estudo recente, verificou-se que o PLA apresentou degradação completa após cerca de 120 dias em solo simulado (Huamani, 2025). Em degradação *in vitro*, iniciou-se após aproximadamente 15 dias, mantendo a integridade estrutural até cerca de 300 dias (Huamani, 2025). O mecanismo de degradação para os *scaffolds* é dependente da velocidade de penetração da água nas fibras, caracterizada como erosão superficial e da quebra de ligações químicas do polímero, caracterizada como degradação em massa (Castro, 2022).

2.5 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO

O ZnO é classificado como óxido metálico com grande aplicabilidade e versátil em função das suas propriedades físicas e químicas particulares. Possui alta estabilidade química, um amplo espectro de absorção de radiação, alto coeficiente de acoplamento eletroquímico e alta fotoestabilidade, com a fórmula molecular ZnO (Zhou *et al.*, 2023). Geralmente, é obtido de maneira sintética por métodos de síntese química, embora possa ser encontrado na natureza como um mineral cristalino chamado zincita (Mayrinck *et al.*, 2014). O ZnO é considerado um semicondutor do tipo *n* com uma banda proibida ampla e direta com valor em torno de 3.37 eV à temperatura ambiente, a alta mobilidade eletrônica, banda proibida ampla e grande energia de ligação do excíton (60 meV) despertaram grande interesse para diversas aplicações (Costa *et al.*, 2018). O óxido de zinco pode cristalizar nas estruturas: cúbica do tipo wurtzita, blenda de zinco e sal de rocha. Em condições ambientes, a estrutura do tipo wurtzita apresenta maior estabilidade. Possui uma célula unitária hexagonal com dois parâmetros de rede $a = b \neq c$ e $\alpha = \beta = 90^\circ$ e $\gamma = 120^\circ$, sendo $a = 3.25 \text{ \AA}$ e $c = 5.12 \text{ \AA}$, onde a razão $c/a \approx 1.633$ pertence ao grupo espacial $P6_3mc$. A formação desta estrutura é caracterizada pela constituição de duas sub-redes hexagonais compactas, com camadas ocupadas por átomos de zinco alternadas com camadas ocupadas por átomos de oxigênio em torno do eixo *c*. Cada sub-rede é constituída por

quatro átomos de oxigênio e vice-versa. Metade dos sítios tetraédricos são ocupados por átomos de zinco. Tal configuração permite que esta estrutura hexagonal do tipo wurtzita possua uma estrutura aberta favorecendo a incorporação de íons dopantes na rede cristalina do ZnO conforme os trabalhos apresentam (Wagh *et al.*, 2022; Al Farsi *et al.*, 2025; Mokogolo; Malevu, 2025) (Figura 4).

Figura 4- Estrutura cristalina da forma wurtzita do ZnO



Fonte: MARANA; SAMBRANO; SOUZA (2010)

O ZnO é um material multifuncional, com boa biocompatibilidade e baixa toxicidade, podendo gerar espécies reativas, além de apresentar estabilidade físico-química elevada. Também é abundante e pode ser sintetizado via métodos de baixo custo (Anjum *et al.*, 2021; Raha *et al.*, 2022; Jha *et al.*, 2023).

O óxido de zinco (ZnO) se destaca como uma das mais promissoras para aplicações médicas devido às suas propriedades antibacterianas, antifúngicas, antivirais e à facilidade de síntese de estruturas e tamanhos variados. A ação bactericida do ZnO é relacionada principalmente à sua habilidade de induzir estresse oxidativo em bactérias (Belal; Gad, 2023), com a cristalinidade das nanopartículas exercendo um papel fundamental em seus efeitos biológicos. Dessa forma, o material é classificado como não tóxico pela FDA (Putti *et al.*, 2015).

2.6 NANOPARTÍCULAS DE ÓXIDO DE ZINCO DOPADO COM PRATA

Uma das estratégias utilizada para potencializar os efeitos antimicrobianos é a dopagem do ZnO com íons metálicos, como a prata (Oliveira *et al.*, 2021). A prata (Ag), em suas formas metálica e iônica, é conhecida por suas propriedades antimicrobianas há séculos. Quando reduzida à escala nanométrica, a prata apresenta

uma razão superfície/volume muito maior, o que intensifica sua interação com microrganismos e aumenta sua eficácia biológica. Estudo demonstra que nanopartículas de prata possuem atividade antimicrobiana de amplo espectro, atuando contra bactérias, fungos e vírus, devido à liberação controlada de íons Ag^+ e à capacidade de provocar danos oxidativos em estruturas celulares (Patra *et al.*, 2018).

A dopagem do óxido de zinco com prata visa explorar o efeito sinérgico entre ambos os materiais, unindo a biocompatibilidade e estabilidade do ZnO à reconhecida ação antimicrobiana da prata (Kim *et al.*, 2007) (Tang; Zheng, 2018). Essa associação resulta em maior geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), aumento da atividade bactericida e melhor desempenho em aplicações biomédicas (Al-Aaraji *et al.*, 2025). Em estudo de Agnihotri *et al.* (2015), o nanomaterial híbrido Ag/ZnO demonstrou elevada estabilidade em meio aquoso e apresentou efeito bactericida significativo contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas.

2.7 MÉTODO DE SÍNTESE DAS NANOPARTÍCULAS DE ZNO

O método de co-precipitação consiste na combinação controlada de íons positivos e negativos em solução, de modo que o produto de solubilidade seja ultrapassado por meio da variação do pH. Essa condição favorece a formação de um composto insolúvel, que se precipita a partir da solução. Após a etapa de precipitação, o material pode ser lavado para remover resíduos antes da calcinação, o que possibilita a obtenção de nanocristais de alta pureza e boa uniformidade. Entretanto, o método apresenta como limitação a baixa homogeneidade quando envolve a precipitação simultânea de diferentes espécies iônicas (Silva, 2023).

A eficiência da síntese depende de diversos parâmetros experimentais, como a temperatura de síntese, o pH inicial e final da solução, a razão molar e a concentração dos reagentes, o tipo de ânion utilizado, a temperatura e velocidade de agitação da solução, além da taxa de adição dos precursores. A formação do sal insolúvel ocorre em uma solução supersaturada, caracterizada por conter maior concentração de soluto do que a solução saturada. Quando o equilíbrio químico é atingido, a supersaturação é reduzida e ocorre a formação do precipitado. Esses parâmetros influenciam diretamente a supersaturação relativa, que determina o mecanismo de formação e o tamanho final das nanopartículas (Silva, 2023).

A morfologia das nanopartículas de ZnO é fortemente influenciada pelo pH do meio reacional, que controla os processos de nucleação e crescimento cristalino (Arellano-Cortaza *et al.*, 2021). Essa variação estrutural não apenas altera o tamanho e a forma das partículas, mas também impacta propriedades críticas, como área superficial e estabilidade coloidal. Tais características são determinantes para aplicações biomédicas, uma vez que influenciam diretamente a interação das nanopartículas com sistemas biológicos e sua eficácia em atividades antimicrobianas (Al-Aaraji *et al.*, 2025).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAS

Os materiais necessários para o preparo das soluções poliméricas são o poli(ácido L-láctico) (PLLA) em pellets obtido na empresa 3DLAB, Dimetilformamida (DMF) (P.M. 73,10 g.mol⁻¹) obtido na empresa Química Moderna, Diclorometano (DCM) (P.M.84,93 g.mol⁻¹). Para o preparo da síntese de co-precipitação foram utilizados o nitrato de zinco hexahidratado (Zn(NO₃)₂·6H₂O, grau de pureza de 98%) (P.M. 297,49 g.mol⁻¹), o nitrato de prata (AgNO₃, grau de pureza 99,9%) (P.M.169,87 g.mol⁻¹) sendo eles obtido na empresa Neon Comercial Reagentes Analíticos LTDA, e o hidróxido de sódio (NaOH) (microperolas) PA-ACS (P.M.40,00 g.mol⁻¹) obtido pela empresa CRQ – Produtos Químicos LTDA.

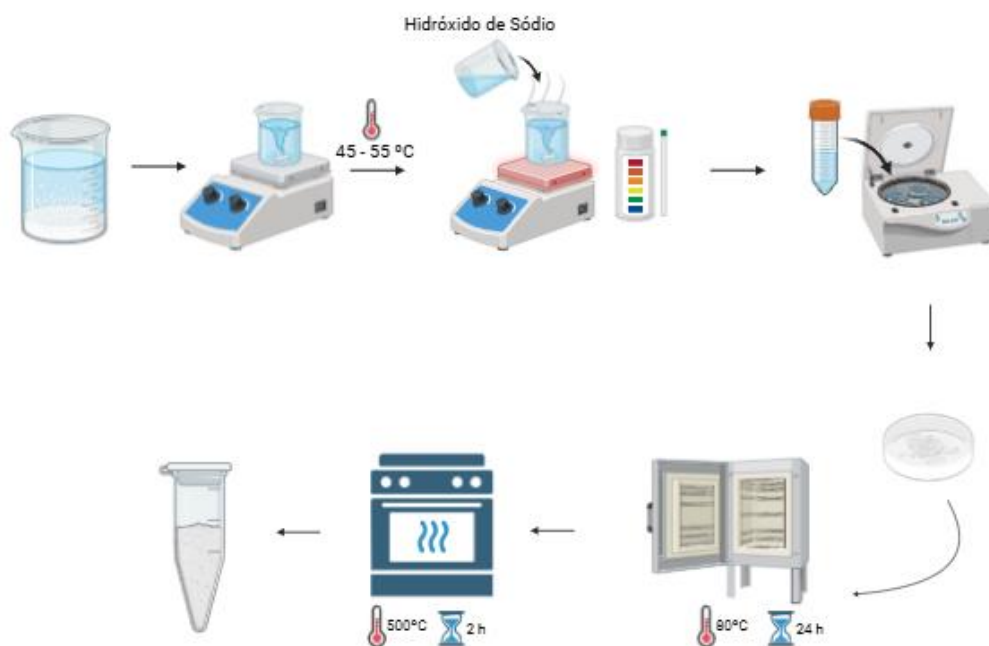
3.2 SÍNTESE DE ÓXIDO DE ZINCO PURO

A síntese do óxido de zinco puro foi baseada na metodologia do trabalho desenvolvido pelos autores Hussain *et al.* (2024). Inicialmente, 0,1227 mol de nitrato de zinco hexahidratado (Zn(NO₃)₂·6H₂O, Neon 98%) e foi dissolvido em 100 mL de água deionizada sob condições de agitação constante em um agitador magnético com aquecimento entre 45 e 55 °C. Em seguida, foi adicionada gradualmente hidróxido de sódio (20 mol/L) à mistura até que o pH atingir o valor de 14. O ajuste do pH em 14 ocorreu para controle das propriedades morfológicas, como forma, tamanho e área superficial das partículas conforme reporta a literatura de Mayrinck *et al.* (2014) e de Arellano-Cortaza *et al.* (2021).

Após essa etapa, a solução foi transferida para tubos do tipo falcon e colocados em centrifugação a 4000 rpm por 5 minutos (feito triplicata), com objetivo de remoção

dos íons residuais e neutralização do pH. O precipitado resultante foi então seco em estufa a 80 °C por 24 horas. Posteriormente, a amostra seca foi calcinada em forno a 500 °C durante 2 horas, com o objetivo de obter o ZnO com alta cristalinidade. Por fim, o material obtido foi cuidadosamente retirado do forno e armazenado em tubos do tipo Eppendorf, sob ambiente com temperatura e umidade controlada, visando preservar suas propriedades físico-químicas, conforme esquema da Figura 5.

Figura 5- Esquema de síntese co-precipitação do óxido de zinco puro



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.3 SÍNTESE DE ÓXIDO DE ZINCO DOPADO COM PRATA

A síntese de óxido de zinco dopada com prata seguiu inicialmente o mesmo procedimento adotado na síntese de óxido de zinco conforme detalhado no item 3.2. Após a diluição do nitrato de zinco hexahidratado em água deionizada sob condições de agitação e temperatura descrita, foi adicionado 3 mmol de nitrato de prata (AgNO_3 , Neon 99.9%) o correspondente a 5 mol% de Ag na estrutura do ZnO conforme cálculos estequiométricos abaixo.

Para ZnO: 5% Ag:

$$1 \text{ mol ZnO: } 5\% \text{ Ag} \rightarrow 83,53 \text{ g}$$

$$x \rightarrow 4 \text{ g}$$

$$x = 0,0478 \text{ g/mol de ZnO: 5\% Ag} \quad (\text{Equação 1})$$

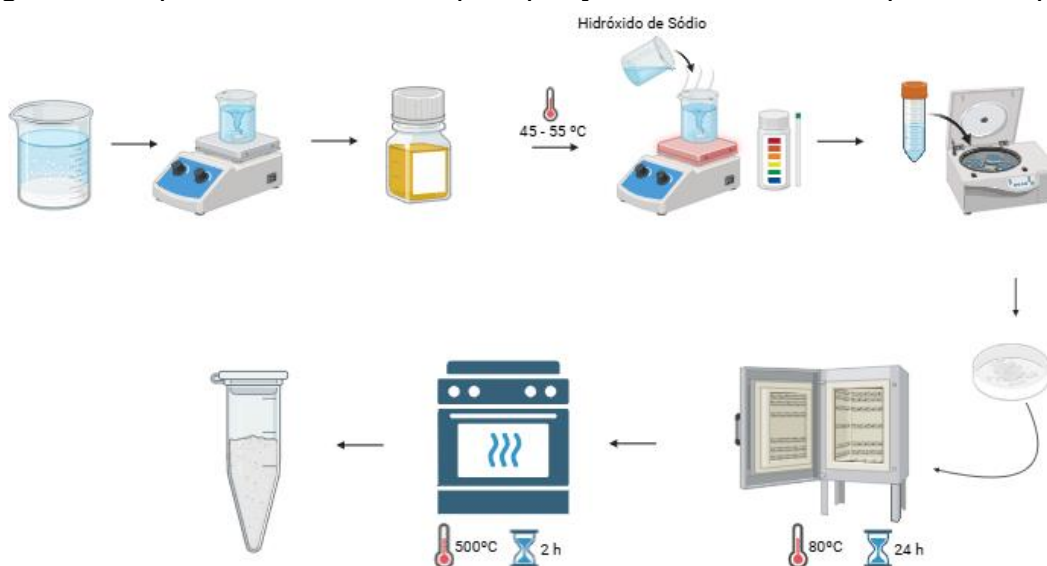
Para reagentes:

$$\begin{aligned} 1 \text{ mol Zn(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} &\rightarrow 297,49\text{g} \\ (0,95) \times 0,0478 \text{ mol} &\rightarrow y \\ y &= 13,5090 \text{ g (98\% de pureza)} \\ y' &= 13,7847 \text{ g (100\% de pureza) para Zn} \end{aligned} \quad (\text{Equação 2})$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ mol de AgNO}_3 &\rightarrow 169,87\text{g} \\ (0,05) \times 0,0478 \text{ mol} &\rightarrow z \\ z &= 0,4059 \text{ g para Ag} \end{aligned} \quad (\text{Equação 3})$$

Após completa homogeneização, foi adicionada gradualmente hidróxido de sódio (20 mol/L) à mistura até que o pH atingir o valor de 14. Posteriormente, seguiu-se a mesma metodologia de centrifugação, secagem e calcinação descrita no método anterior, conforme esquema da Figura 6.

Figura 6- Esquema de síntese co-precipitação óxido de zinco dopado com prata



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.4 PREPARAÇÃO DE SOLUÇÕES POLIMÉRICAS

A metodologia foi baseada no autor Hemkemaier (2024). Inicialmente, foi pesado 10%*m* PLA (0,8233 g), dentro de um frasco flaconete, em uma balança analítica (ELECTRONIC BALANCE FA-2104N/BIOPRECISA). Com o auxílio de pipetas graduadas e de uma pêra, foram inseridos ao PLA, os solventes, 4,5 mL de Diclorometano (DCM) e 1,5 mL de Dimetilformamida (DMF) nas proporções 3:1 em volume respectivamente. O processo de solubilização foi realizado por 14 h em 60 °C em chapa térmica com agitação magnética (IKA® C-MAG HS7).

Para a obtenção dos valores das massas teóricas, foram realizados os cálculos baseados nas Equações 4, 5, 6 e 7, sabendo-se que a quantidade de PLA a ser adicionado é 10% em massa em relação aos solventes.

$$m_{\text{dcm}} = V \cdot \rho_{\text{dcm}} \rightarrow m_{\text{dcm}} = 4,5 \text{ mL} \cdot 1,33 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 5,985\text{g} \quad (\text{Equação 4})$$

$$m_{\text{dmf}} = V \cdot \rho_{\text{dmf}} \rightarrow m_{\text{dmf}} = 1,5 \text{ mL} \cdot 0,95 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 1,425\text{g} \quad (\text{Equação 5})$$

$$m_{\text{solução}} = m_{\text{dcm}} + m_{\text{dmf}} \rightarrow m_{\text{solução}} = 5,985\text{g} + 1,425\text{g} = 7,41\text{g} \quad (\text{Equação 6})$$

$$X_{\text{massa}} = \frac{m_{\text{PLA}} \cdot 100}{m_{\text{PLA}} + m_{\text{solventes}}} \quad (\text{Equação 7})$$

$$10\% = \frac{m_{\text{PLA}} \cdot 100}{m_{\text{PLA}} + 7,41\text{g}} \rightarrow m_{\text{PLA}} = 0,8233\text{g}$$

Para obtenção das soluções contendo as nanopartículas utilizou-se diferentes proporções de ZnO e ZnO:5%Ag incorporadas as soluções poliméricas de PLA em diferentes frações mássicas de 0,25%*m*, 1%*m* e 2%*m*, em relação à massa de PLA (Tabela 1).

Tabela 1- Quantidade em massa para cada amostra

Amostra	Massa (g)		
	PLA	ZnO	ZnO:5% Ag
PLA	0,8233	-	-
PLA/0,25% <i>m</i> ZnO	0,8233	0,0021	-
PLA/1% <i>m</i> ZnO	0,8233	0,0082	-
PLA/2% <i>m</i> ZnO	0,8233	0,0165	-
PLA/0,25% <i>m</i> ZnO:5%Ag	0,8233	-	0,0021
PLA/1% <i>m</i> ZnO:5%Ag	0,8233	-	0,0082
PLA/2% <i>m</i> ZnO:5%Ag	0,8233	-	0,0165

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Após 14 horas de solubilização da solução polimérica, as nanopartículas foram incorporadas em agitação magnética e aquecimento, seguido de procedimento de dispersão em um processador ultrassônico de ponteira (US Solid USS-HLUH). A ultrassonicação tem como objetivo induzir à cavitação em líquidos e nesse caso é utilizado para aumentar a dispersão das nanopartículas na solução de PLA, com intuito de melhorar as propriedades finais. O ultrassom foi conduzido durante 20 minutos de forma pulsada, sendo 10 minutos ligado e 10 minutos desligado, em potência de 150 watts.

Após o procedimento de preparação das soluções e incorporação das nanopartículas, as soluções com diferentes concentrações, foram utilizadas posteriormente no processamento por eletrofiação.

3.5 PROCESSO DE ELETROFIAÇÃO

Para realizar o processo de eletrofiação das soluções, para a obtenção das membranas constituídas por fibras poliméricas aleatoriamente distribuídas, utilizou-se uma fonte de alta tensão, uma bomba de infusão com seringa e coletor metálico, da marca Spintech, de acordo com a Figura 7. A agulha utilizada no processo apresenta diâmetro de 0,70 mm e um comprimento de 25 mm. A temperatura e umidade estavam em todas as eletrofiações em $20 \pm 5^\circ\text{C}$, $45 \pm 5\%$, respectivamente. A vazão de alimentação, tensão, e distância entre agulha-coletor foram de 1,02 mL/h, 15 kV e 15 cm, respectivamente na qual a metodologia foi baseada no autor Hemkemaier (2024).

Figura 7- Equipamento de eletrofiação, imagem à esquerda fonte de alta tensão, e imagem à direita composta pela bomba de infusão e pelo coletor metálico.



4 CARACTERIZAÇÕES

4.1 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

As micrografias das nanopartículas de óxido de zinco puro e dopado com prata foram obtidas pelo MEV (marca JEOL modelo JSM-6390LV) localizado no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Florianópolis. As amostras secas foram colocadas em uma fita de carbono e posteriormente recobertas com ouro utilizando a técnica *sputtering*. A tensão de aceleração utilizada foi de 10kV.

As membranas eletrofiadas foram obtidas pelo MEV (marca JEOL modelo JCM-7000 NeoScope) do Laboratório Multiusuário de Caracterização Avançada (LMCA) – Campus Blumenau. A preparação das amostras, com tamanho de 1 cm², consiste em colar as membranas poliméricas com fita carbono dupla face e recobrir com ouro utilizando a técnica *sputtering*. A tensão de aceleração utilizada foi de 5kV. Os diâmetros das fibras foram calculados a partir do software livre *ImageJ* com as micrografias com aumento de 1000x, sendo efetuada 100 medidas por amostra.

4.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

A difração de Raios - X (DRX) das nanopartículas de óxido de zinco e óxido de zinco dopado com prata foram realizadas com o objetivo de verificar a composição química e identificar a estrutura cristalina. A técnica de difração de raios-X utilizando um difratômetro Shimadzu, modelo XRD-6000 localizado na UEPG, utilizando radiação $K\alpha(\text{Cu})$ com comprimento de onda de 1,54060 Å. As medições foram conduzidas em um intervalo angular de 2θ de 10 a 80°, com velocidade de varredura de 2°/min. A identificação das fases cristalinas foi realizada por meio do software SearchMatch, utilizando o banco de dados ICDD-PDF como referência.

4.3 ESPECTROSCOPIA DE EMISSÃO DE FOTOLUMINESCENTE (PL)

A técnica de fotoluminescência (PL) foi realizada com o objetivo de investigar as bandas de emissão excitônica, defeitos de superfície e vacâncias de óxido de zinco e óxido de zinco dopado com prata. Utilizou-se um espectômetro da marca THOR labs no modo de luminescência e com linha de excitação de 405 nm, localizado no Laboratório de Nanoestruturas Optoeletrônicas (LabNanO) – Campus Blumenau.

4.5 ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO POR TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As análises de FTIR foram realizadas em um espectrofotômetro Frontier FTIR, do fabricante Perkin Elmer®, no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Blumenau. Os espectros foram obtidos em número de onda de 4000 a 500 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} e 32 varreduras, no modo Refletância Total Atenuada (ATR). As membranas utilizadas de tamanho 1 cm^2 .

4.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

A análise termogravimétrica tem por objetivo avaliar a estabilidade térmica das amostras das membranas poliméricas eletrofiadas de PLA com a incorporação das nanopartículas ZnO e ZnO:5%Ag. As curvas termogravimétricas foram obtidas em um equipamento TGA 8000 Perkin Elmer®, localizado no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopias (LTE) da UFSC - Campus Blumenau. As análises foram realizadas no intervalo de temperatura de 30 °C a 700 °C, com taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, sob fluxo de nitrogênio de 20 mL.min⁻¹ e utilizando-se um cadinho de alumina, com cerca de 7 mg de cada amostra.

4.7 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARREDURA (DSC)

A partir da técnica de DSC é possível analisar a temperatura de fusão (T_m), temperatura de cristalização (T_c), temperatura de transição vítrea (T_g), temperatura de cristalização a frio (T_{cc}) e o grau de cristalinidade (X_c). O equipamento utilizado para esta técnica foi o DSC 214 Polyma da NETZSCH, presente no Laboratório de Análises Térmicas e Espectroscopia (LTE) da UFSC - Campus Blumenau. As amostras foram submetidas a um primeiro aquecimento de 25 à 200 °C, seguido de um resfriamento de 200 à 25 °C, então reaquecido novamente de 25 à 200 °C (2º aquecimento), com uma taxa de 10 °C/min.

O grau de cristalinidade (X_c) do polímero foi calculado com base na Equação 8, onde ΔH_f a entalpia de fusão observada na análise [J.g^{-1}], $\Delta H_{T_{cc}}$ a entalpia de cristalização a frio observada na análise [J.g^{-1}], ΔH_f° a entalpia de fusão do polímero

100% cristalino (para o PLA é 93,7 J. g⁻¹ Canevarolo *et al.* (2010)) e ϕ fração em massa do polímero presente na membrana polimérica (CANEVAROLO JR, 2010).

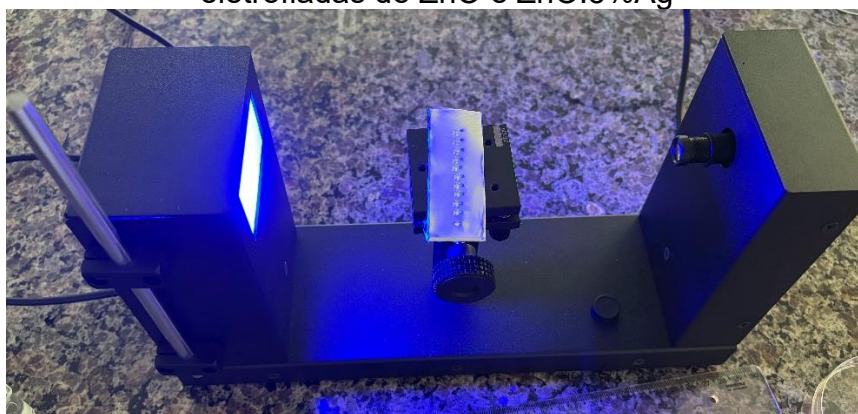
$$X_c = \frac{(\Delta H_f - \Delta H_{T_{cc}})}{\Delta H_f \cdot \phi} \cdot 100 \quad (\text{Equação 8})$$

3.8 ÂNGULO DE CONTATO

As medições de ângulo de contato nas membranas de PLA e PLA contendo nanopartículas de Ag nas concentrações de 0,25%, 1% e 2% foram realizadas à temperatura ambiente (25 °C) utilizando o goniômetro Contact Angle Goniometer, da marca Ossila (Figura 8), no Laboratório de Físico-Química (LABFQ), da UFSC – Campus Blumenau.

O ensaio foi conduzido no modo estático, a fim de avaliar o comportamento do material e sua interação com a água. As amostras de 26 mm de largura e 76 mm de comprimento foram depositadas sobre uma lâmina de microscopia. Para cada amostra, foram realizadas dez medições com água destilada, utilizando-se uma micropipeta de 5 μ L e feito a média e desvio padrão. Para cada medição, uma gota foi depositada sobre a superfície da amostra, e o ângulo de contato foi determinado por meio do software OSSILA Contact Angle.

Figura 8- Goniômetro utilizado para a medição do ângulo de contato das membranas eletrofiadas de ZnO e ZnO:5%Ag



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

3.9 PERMEABILIDADE A VAPOR D'ÁGUA (PVA)

De acordo com a norma ASTM E96-95 (1995), a permeabilidade a vapor d'água (PVA) foi determinada gravimetricamente. As medidas foram feitas durante 6 h com

intervalos de 1 h na pesagem e em triplicata. As amostras de 5 cm x 5 cm foram fixados na abertura da célula de acrílico de 41 mm de diâmetro, contendo cloreto de cálcio (CaCl_2) anidro P.A. granulado (110,98 g/mol, Êxodo Científica) na sua base (Figura 9 a). Esta célula foi mantida dentro de dessecador hermeticamente fechado, contendo a solução saturada de cloreto de sódio (NaCl) para manter o ambiente úmido (Figura 9 b). A umidade relativa inicial foi cerca de 75% Hr.

Figura 9- (a) membranas eletrofiadas de ZnO e ZnO:5%Ag fixadas nas células de acrílico, (b) dessecadora com ambiente úmido



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A permeabilidade foi calculada a partir da equação (9).

$$PVA = \frac{G \cdot \delta}{A_e \cdot \Delta P} \quad (\text{Equação 9})$$

onde G é a taxa de permeação calculada pela regressão linear do ganho de massa versus o tempo (horas), δ é a espessura do filme (mm), A_e é a área exposta do filme (m^2) e ΔP é a diferença de pressão parcial de vapor de água no ambiente nos dois lados do filme.

5 RESULTADOS

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

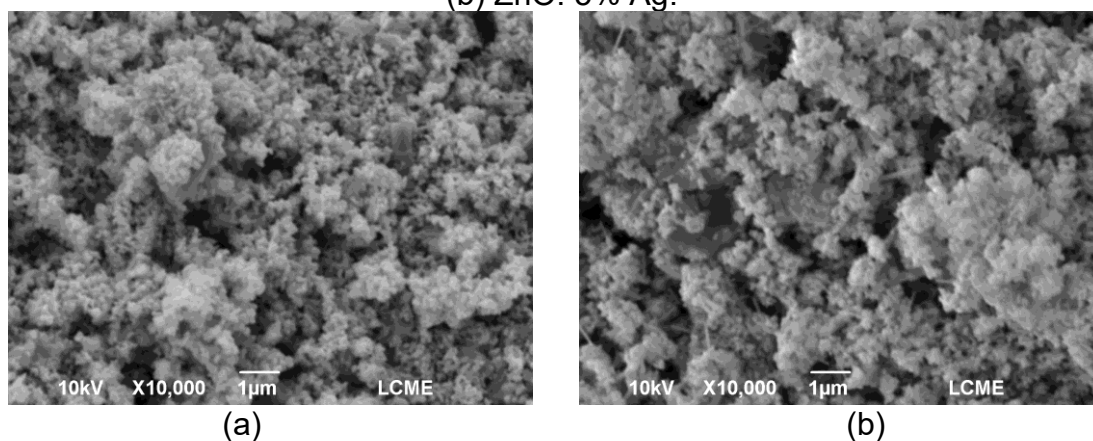
A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliar as propriedades morfológicas das partículas de ZnO e investigar a influência da dopagem da Ag nestas propriedades. Na Figura 10 observa-se que as nanopartículas de ZnO apresentam uma morfologia uniforme em toda sua extensão. Verifica-se a

formação de aglomerados de tamanhos micrométricos constituídos por diversas partículas nanométricas. A razão da intensa aglomeração das partículas é compreendida pela condição das nanopartículas buscarem reduzir sua energia de superfície e aumentar a estabilidade por meio de processos termodinâmicos (Kaenphakdee *et al.*, 2022).

Conforme observado na Figura 10(a), as nanopartículas de ZnO puro apresentam uma morfologia altamente porosa, o que é razoável esperar uma alta área superficial. O formato das nanopartículas é irregular característica reportada em alguns trabalhos (Mandal *et al.*, 2022; Wojnarowicz; Chudoba; Lojkowski, 2020) associada as condições síntese utilizadas no método de obtenção do ZnO. Um dos parâmetros controlados nas sínteses das nanopartículas ZnO e ZnO: 5% Ag foi o pH, estabilizado em 14 com adição do NaOH. No meio reacional o $Zn(NO_3)_2 \times 6H_2O$ sofre hidrólise liberando os íons de OH^- na solução. Para soluções com o pH maiores que 7, o número de íons OH^- é alto, causando forte atração entre os íons Zn^{2+} . Em um grau de supersaturação dos íons OH^- e Zn^{2+} , os núcleos de $Zn(OH)_2$ são formados.

As características morfológicas das nanopartículas são regidas pela cinética de crescimento dos cristais a partir dos parâmetros de taxa de nucleação e de taxa de crescimento das partículas. Em uma condição de alta taxa de nucleação de $Zn(OH)_2$, a taxa de crescimento das nanopartículas pode ser reduzida. A incorporação da Ag na estrutura do ZnO não apresentou mudanças significativas na morfologia das partículas.

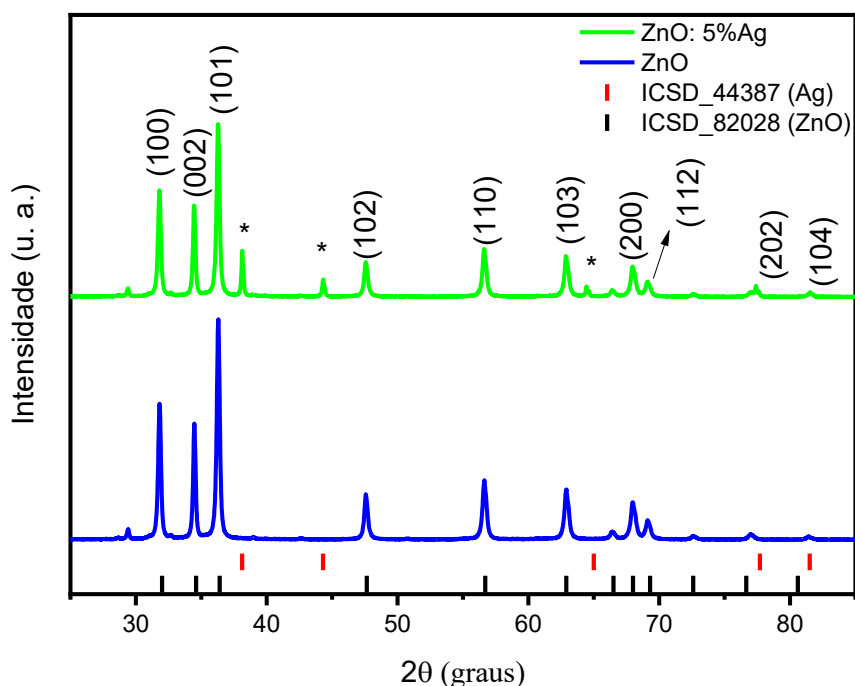
Figura 10- Microscopia Eletrônica de Varredura das nanopartículas (a) ZnO puro e (b) ZnO: 5% Ag.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A partir da análise de difração de Raios-X, conforme Figura 11, foi possível determinar a estrutura cristalina das nanopartículas de ZnO puro e ZnO:5%Ag. A identificação foi realizada por meio da comparação com um padrão de referência ICDD-PDF 82028, revelando que as partículas possuem a estrutura cristalina hexagonal do tipo wurtzita para ZnO puro e para o ZnO:5%Ag. Essa estrutura é caracterizada por um empilhamento de camadas hexagonais de átomos. Os planos de difração indexados da fase cristalina hexagonal são: (100), (002), (101), (102), (110), (103), (200), (112), (202) e (104) localizados respectivamente em 31.70, 34.34, 36.17, 47.55, 56.61, 62.84, 68.10, 69.32, 77.39 e 81.43°. Foram identificados planos de difração referente a presença da Ag com estrutura cristalina cúbica de grupo espacial Fm-3m, conforme o padrão de referência ICDD-PDF 44387. Estes planos foram representados por (*) na Figura 11, em torno de $2\theta = 38.18^\circ \rightarrow (111)$, $2\theta = 44.26^\circ \rightarrow (200)$ e $2\theta = 64.28^\circ \rightarrow (220)$.

Figura 11- Difratomogramas de DRX do ZnO, ZnO:5%Ag, padrão ZnO e Ag



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Observa-se uma diminuição na intensidade dos picos de ZnO com a adição de dopante Ag. Estas pequenas mudanças observadas são compreendidas como microdeformações geradas na estrutura do ZnO devido a presença dos íons de Ag, considerando as diferenças de tamanho e de carga entre os íons do zinco e da prata

no processo de dopagem. Embora os íons Ag^+ tenham um raio maior (1,22 Å) do que os íons Zn^{2+} da matriz (0,88 Å), a substituição limitada no grão de ZnO é possível (Fan; Freer, 1995).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados cristalográficos das amostras do ZnO e ZnO: 5 mol% Ag. Para avaliar as modificações microestruturais foram calculados o tamanho do cristalito e da microdeformação para as amostras conforme indicados na Tabela 2.

Tabela 2- Cálculo dos dados cristalográficos das nanopartículas de ZnO puro e ZnO:5%Ag

	a (Å)	c (Å)	Vol (Å) ³	D (nm)	$\epsilon \times (10^{-3})$
ZnO puro	3.2304	5.2109	47.0957	42	2.6
ZnO: 5%Ag	3.2322	5.2135	47.1695	43	2.5

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Legenda: a, c: parâmetro de rede; Vol: volume da célula unitária; D: tamanho de cristalito ϵ : microdeformação.

O tamanho de cristalito foi determinado utilizando a equação de Scherrer (Equação 10), conforme descrito por Cullity e Stock (2001).

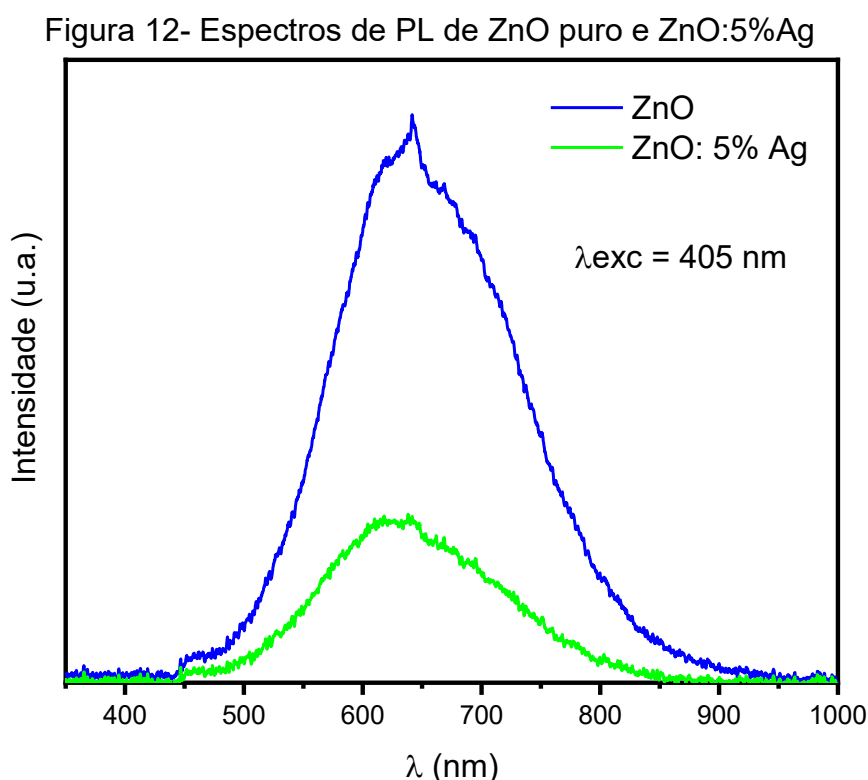
$$D = K \lambda / \beta \cos(\theta) \quad (\text{Equação 10})$$

Nessa expressão, D corresponde ao tamanho médio de cristalito, K é o fator de forma adotado igual a 0,9, λ representa o comprimento de onda da radiação Cu-K α (1,5406 Å), β refere-se à largura à meia-altura já convertida para radianos e θ é o ângulo de difração associado a cada plano analisado (Flores *et al.*, 2025). A microdeformação foi calculada pelo método de Williamson–Hall, que avalia simultaneamente a influência do tamanho de cristalito e das tensões internas sobre o alargamento dos picos de difração (Mote; Purushotham; Dole, 2012). Esse procedimento se baseia na relação linear apresentado no Método de Williamson-Hall (Equação 11), na qual ϵ representa a microdeformação (Williamson; Hall, 1953).

$$\beta \cos(\theta) / \frac{K \lambda}{D} + 4 \epsilon \sin(\theta) \quad (\text{Equação 11})$$

Com os valores de $\beta \cdot \cos\theta$ e $4 \cdot \sin\theta$ obtidos para cada plano analisado, ajusta-se uma reta cujos coeficientes permitem determinar separadamente o tamanho de cristalito a partir do intercepto, e a microdeformação a partir da inclinação.

Na Figura 12, são apresentados os espectros de fotoluminescência (PL) de ZnO e ZnO dopado com prata, excitados a um comprimento de onda a 405 nm em temperatura ambiente. A emissão em 450 nm é atribuída a uma emissão de borda próximo a banda UV, que se origina da recombinação dos éxcitons livres por meio de um processo de colisão éxciton-éxcito (Jiang *et al.*, 2006). Raji e Gopchandran (2017) relacionaram o aumento da intensidade de PL desta transição ao efeito da diminuição do tamanho de partículas que causa um aumento no número de átomos na superfície, favorecendo um ganho na taxa de aprisionamento de buracos fotogerados na superfície e elevando o aumento na intensidade da emissão.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

A banda de emissão predominante para o ZnO estende-se ao longo de toda região do visível e parte da região do infravermelho com um máximo em 650 nm. Este comportamento pode ser atribuído à existência de defeitos, como lacunas de oxigênio

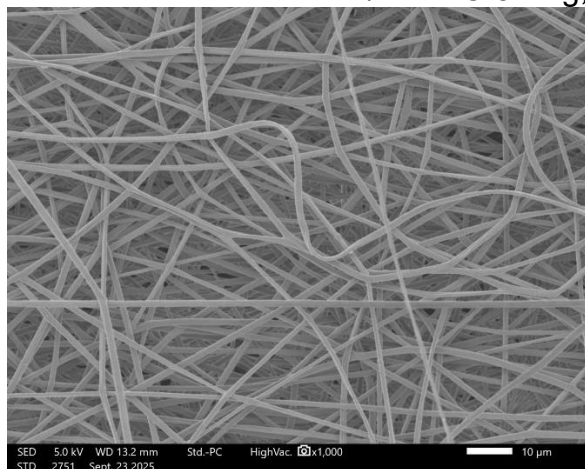
ionizadas individualmente (Li; Cheng; Zhang, 2000; Vanheusden *et al.*, 1996). Alvi *et al.* (2011) concluíram a partir de seus estudos de eletroluminescência que a emissão vermelha entre 620 e 750 nm do n-ZnO nanotubes/p-GaN está associada a tipos de defeitos em nível profundo tais como átomos intersticiais de oxigênio (O_i) que aparecem na faixa de 620 nm (1,99 eV) a 690 nm (1,79 eV), e às vacâncias de oxigênio (V_o) que aparecem na faixa de 690 nm (1,79 eV) a 750 nm (1,65 eV). Observa-se no espectro de PL do ZnO um perfil tipo “ombro” em torno de 570 nm (2.17 eV) o que é atribuído à vacância de oxigênio (V_o). Considera-se que esse fenômeno seja em função da transição de banda dos níveis de defeito do interstício de zinco (Zn_i) para a vacância de oxigênio (V_o) em ZnO. De acordo com Ahn *et al.* (2009) foi proposto que a posição do nível de V_o esteja localizada aproximadamente 2,47 eV abaixo da banda de condução, e a posição do nível de Zn_i esteja teoricamente localizada a 0,22 eV abaixo da banda de condução. Esperado que a transição de banda do nível de Zn_i para V_o ocorra em torno de 2,25 eV (Ahn *et al.*, 2009), bem condizente com a banda observada no espectro do ZnO. Em estudo relata que vacâncias relacionadas a defeitos de oxigênio na superfície podem afetar significativamente as propriedades de fotoluminescência e fotocatalíticas das estruturas de ZnO (Bohle; Spina, 2009).

Defeitos de superfície podem atuar como centros de recombinação, reduzindo a intensidade geral da fotoluminescência o PL. Íons de prata (Ag⁺) dentro da estrutura de ZnO podem interagir com os estados excitados do material hospedeiro, reduzindo a probabilidade de recombinação radiativa e, portanto, a intensidade do PL (Jeyanthi *et al.*, 2023; Khurshid *et al.*, 2019; Ashwini *et al.*, 2024), ou seja, uma possível explicação é que a Ag na estrutura do ZnO pode ter interferido a taxa de recombinação das cargas (elétron, buraco). Esta redução na taxa de recombinação, diminui a quantidade de fótons gerados - diminui o PL.

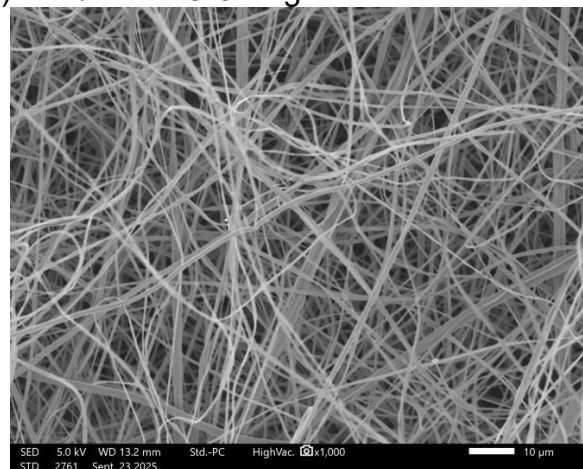
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS ELETROFIADAS COM ZNO PURO E DOPADO COM AG

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) das membranas eletrofiadas de PLA com incorporação de ZnO puro e dopado com Ag são apresentados na Figura 13.

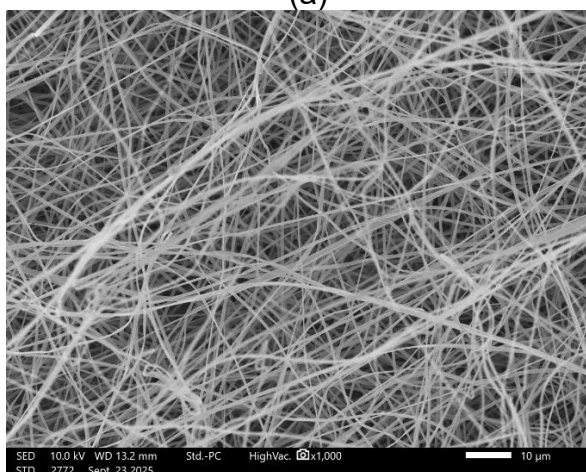
Figura 13- Micrografias MEV das membranas eletrofiadas (a) PLA, (b) PLA/0,25% ZnO, (c) PLA/1% ZnO, (d) PLA/2% ZnO, (e) PLA/0,25% ZnO:5%Ag, (f) PLA/1%ZnO:5%Ag, (g) PLA/2% ZnO:5%Ag



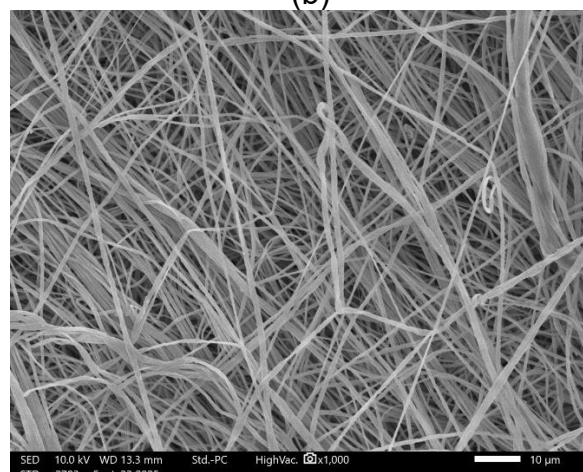
(a)



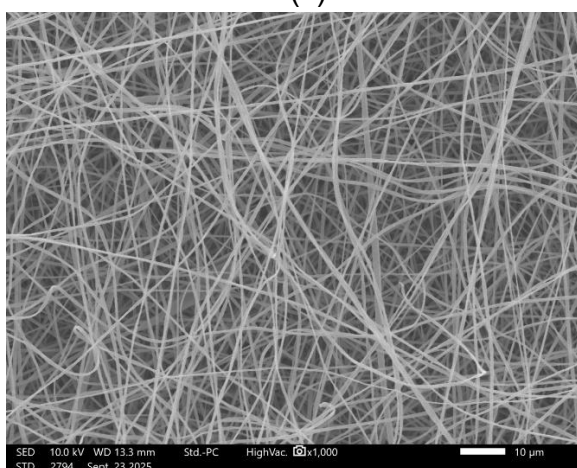
(b)



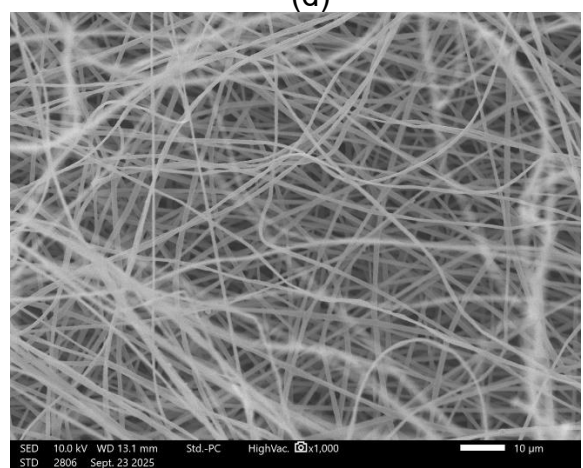
(c)



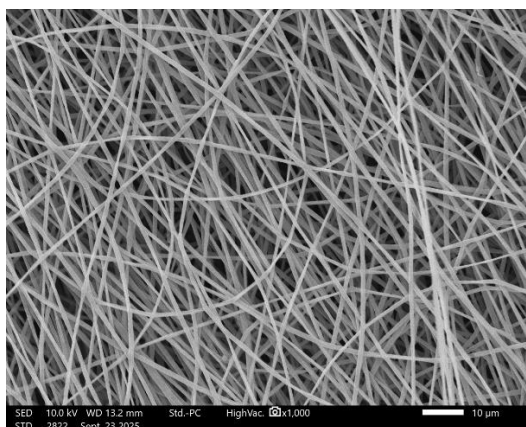
(d)



(e)



(f)



(g)

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Pode-se observar que as membranas eletrofiadas de PLA e com a adição das nanopartículas de ZnO puro e dopado com prata (nas concentrações de 0,25%, 1% e 2% em massa) resultam na formação de fibras uniformes e aleatoriamente distribuídas apresentando pouca ou nenhuma incidência de defeitos. Ademais, não há presença de aglomerados das nanopartículas de óxido de zinco puro e dopado com prata na superfície das fibras. Nota-se que as membranas são altamente porosas sem a presença de defeitos, como *beads*.

Estudos de Padilla-Gainza *et al.* (2020) mostram que a adição de nanopartículas de ZnO altera o comportamento reológico da solução polimérica como o aumento da viscosidade e pode afetar as propriedades morfológicas das fibras geradas, levando a variações no diâmetro médio devido ao efeito de interação entre as partículas e a matriz polimérica. Para Ferrone *et al.* (2019) essa alteração está associada ao aumento da condutividade elétrica da solução e à modificação na taxa de solidificação do jato na eletrofiação, resultando em fibras mais organizadas. Em estudos reportado por Ferrone *et al.* (2019), as membranas apresentaram também uma estrutura altamente porosa e interconectada, característica desejável para aplicação biomédica.

Na Tabela 3 são apresentados os diâmetros médios obtidos para as fibras das membranas. Nota-se que o desvio padrão de todas as sete membranas são baixos.

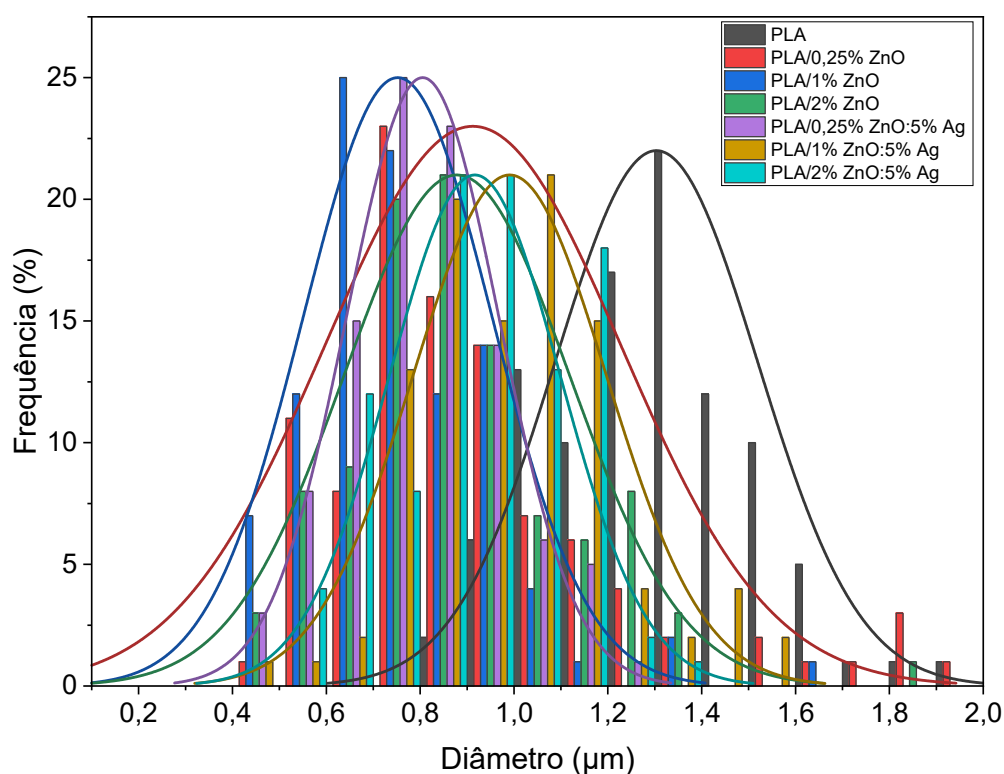
Tabela 3- Diâmetro médio das fibras eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.

Membranas eletrofiadas	Diâmetro médio (μm)	Desvio Padrão
PLA	1,30	0,22
PLA/0,25% ZnO	0,91	0,18
PLA/1% ZnO	0,78	0,20
PLA/2% ZnO	0,88	0,22
PLA/0,25% ZnO:5%Ag	0,81	0,16
PLA/1% ZnO:5%Ag	0,99	0,21
PLA/2% ZnO:5%Ag	0,92	0,18

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Para melhor visualização da distribuição dos diâmetros, na Figura 14 encontram-se a distribuição dos diâmetros médios das membranas eletrofiadas onde observou-se a homogeneidade das fibras.

Figura 14- Distribuição do diâmetro das fibras eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

O diâmetro médio das fibras ficou entre 0,78 μm e 1,30 μm , onde o menor diâmetro foi para as fibras de PLA com 1 %m de ZnO puro e a maior diâmetro de 0,99

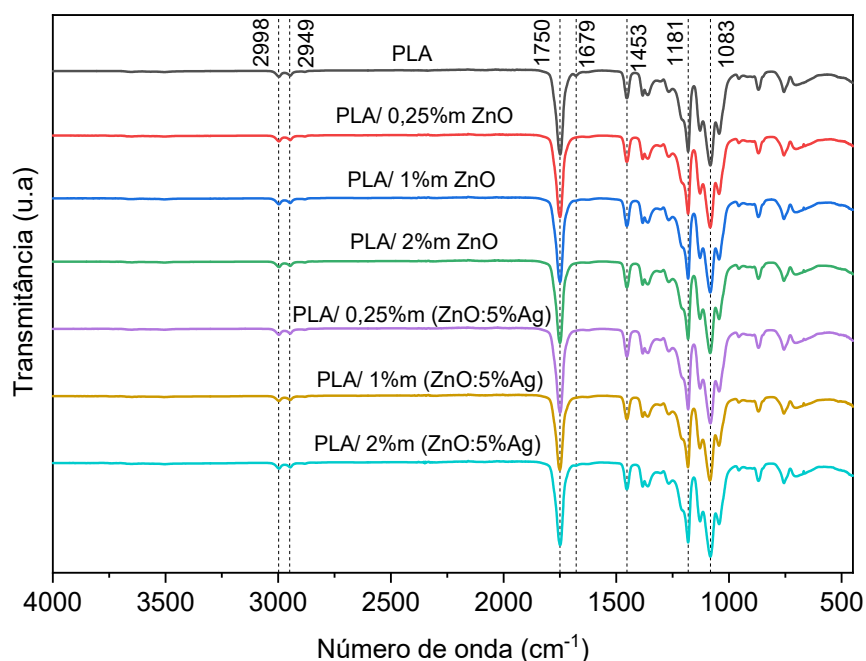
μm foi para PLA com 1 %m de ZnO dopado com prata, pois a fibra de PLA teve um diâmetro médio de 1,30 μm . Estes resultados demonstram que a incorporação das nanopartículas no polímero PLA, promove uma redução no tamanho das fibras, possivelmente atribuído pela diminuição da viscosidade e favorece o maior alongamento durante a eletrofiação (Amariei *et al.*, 2017). Durante a evaporação do solvente a solução torna-se termodinamicamente instável. Este fenômeno ocorre devido à formação de duas fases na fibra, uma rica em polímero e outra rica em solvente. Desta forma a fase rica em polímero se solidifica logo que ocorre a segregação das duas fases enquanto que a evaporação do solvente ocasiona a formação de fibras porosas (Costa *et al.*, 2012). As fibras eletrofiadas apresentam alta porosidade e elevada relação área/volume, o que favorece a adesão e a proliferação celular (Zhou *et al.*, 2023).

A redução do diâmetro médio das fibras pode ser associada à modificação das propriedades da solução polimérica em função da adição das nanopartículas de ZnO. Segundo Ferrone *et al.* (2019), a incorporação de ZnO em matrizes poliméricas durante o processo de eletrofiação aumenta a condutividade elétrica da solução, favorecendo o alongamento do jato conseqüentemente, resultando em fibras mais finas. Esse comportamento também foi relatado por Jamnongkan *et al.* (2018), que observaram que a presença de ZnO altera parâmetros como viscosidade e condutividade, influenciando diretamente o diâmetro final das fibras obtidas. De forma semelhante, Shalumon *et al.* (2019) verificaram que o aumento na concentração de nanopartículas de ZnO eleva a condutividade da solução e intensifica as forças de estiramento durante o processo de eletrofiação, ocasionando a formação de fibras com menores diâmetros.

Assim, os resultados deste trabalho estão de acordo com a literatura, indicando que a adição de ZnO promove o acúmulo de carga elétrica no jato de eletrofiação, o que leva à maior força de repulsão entre as cargas resultando na formação de fibras com menores diâmetros.

Os resultados de FTIR das membranas eletrofiadas de PLA, PLA com adições de três diferentes de concentrações de ZnO puro e dopado com Ag, estão apresentados na Figura 15.

Figura 15- Espectros das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag

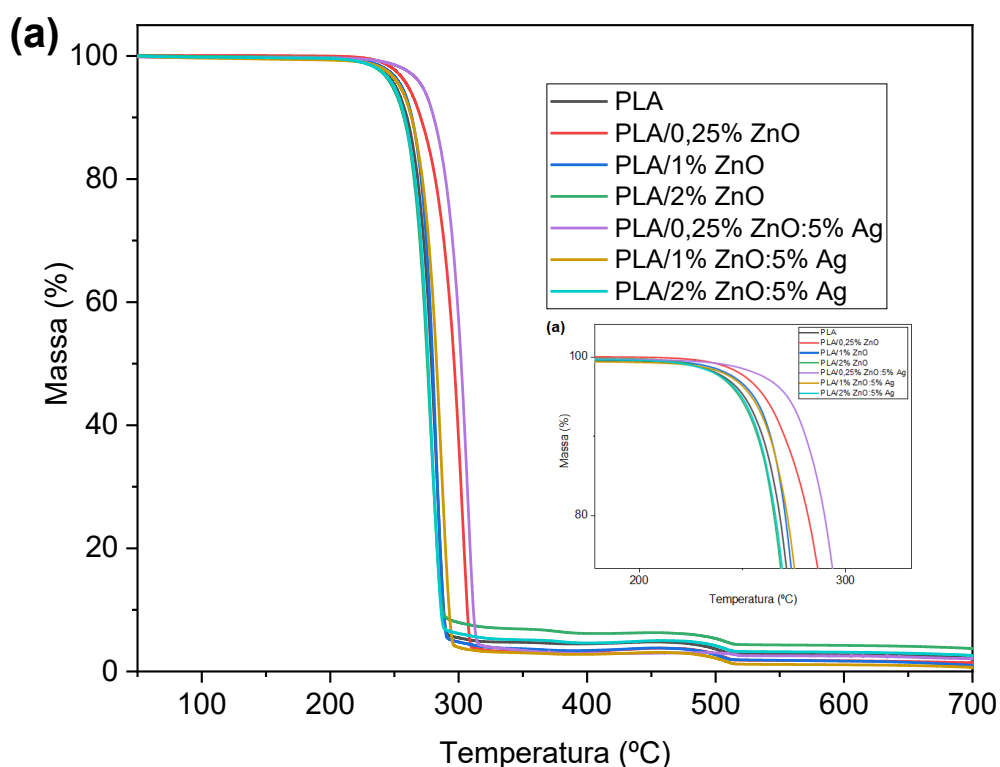


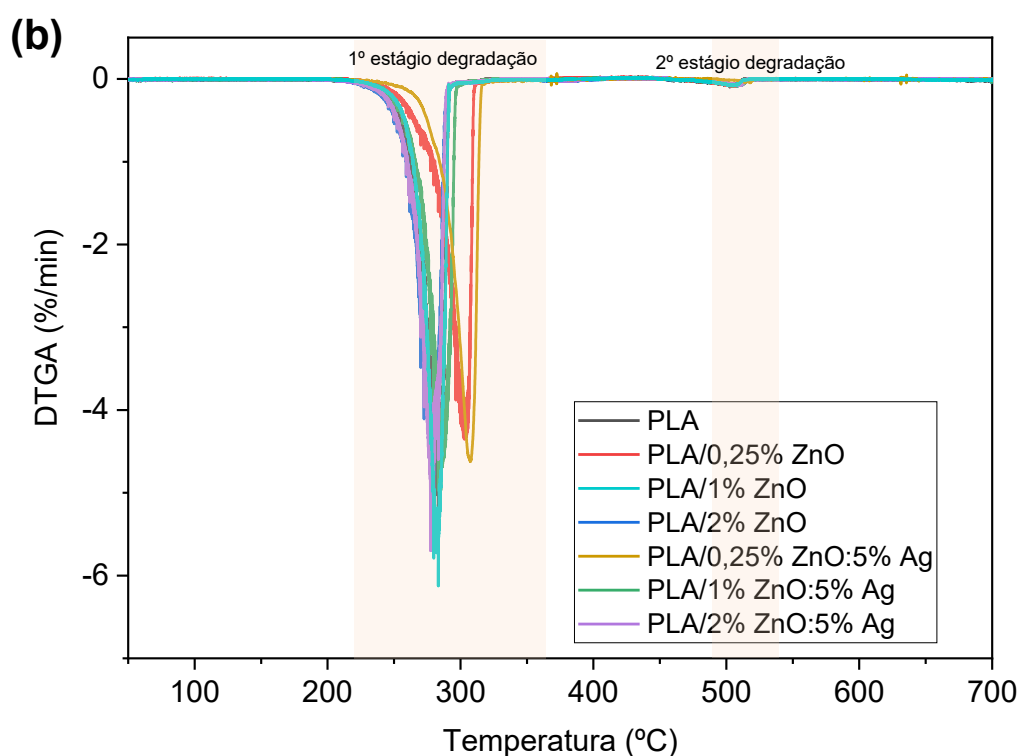
Fonte: Elaborado pela autora (2025)

As bandas características do PLA são observadas em 2998 cm^{-1} e 2949 cm^{-1} (estiramento -CH), em 1750 cm^{-1} (estiramento C=O), em 1453 cm^{-1} e 1181 cm^{-1} (deformação assimétrica COO-) e 1083 cm^{-1} (estiramento C-O-C). A banda em 1679 cm^{-1} , observada no PLA, está relacionada a vibrações de carbonila associadas a grupos hidratados, oligômeros ou espécies parcialmente degradadas, fenômeno já descrito na literatura para bandas fracas na região de $1680\text{-}1690\text{ cm}^{-1}$ em PLA (Jamshidian; Tehrany; Desobry, 2012; Drumright; Gruber; Hruska, 2000). Com a incorporação de ZnO puro ou dopado com prata, o desaparecimento da banda em 1679 cm^{-1} pode estar associado ao efeito nucleante das nanopartículas, que aumentam a cristalinidade do PLA e reduzem a região amorfa. Como essas bandas secundárias de carbonila estão geralmente relacionadas a segmentos amorfos ou desordenados da cadeia polimérica, a diminuição dessa região contribui para o desaparecimento do sinal vibracional (Bhardwaj, 2018). Alterações semelhantes na intensidade e presença de bandas do PLA em função da interação com ZnO são amplamente reportadas na literatura de nanocompósitos PLA/ZnO (Padilla-Gainza *et al.*, 2020).

De acordo com as curvas de TGA e DTGA das membranas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag apresentadas na Figura 16, observa-se que todas as amostras apresentaram 2 estágios de decomposição. Para a amostra de PLA, a temperatura máxima de decomposição (T_{max}), determinada pela primeira derivada da curva termogravimétrica (DTGA), foi observada em 283,3 °C, correspondente ao principal evento de degradação térmica do polímero. Um segundo estágio de decomposição foi identificado em torno de 505,2 °C, possivelmente associado ao processo de carbonização do material polimérico em temperaturas elevadas (550 °C), conforme descrito por Huamani (2025). Após esse segundo evento, a massa residual registrada foi de aproximadamente 2,1 %, indicando que o PLA apresenta decomposição quase completa, com pequena fração de resíduo de carbono.

Figura 16- Curvas termogravimétricas de (a) TGA e (b) DTGA das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.





Fonte: Elaborado pela autora (2025)

De maneira geral, a incorporação de óxido de zinco puro e dopado com prata nas fibras de PLA modifica o comportamento térmico do polímero, principalmente no primeiro estágio de degradação. Ambas nanopartículas tendem a atuar como catalisadores de cisão das ligações éster, reduzindo as temperaturas de início e de máxima decomposição. O ZnO dopado com prata apresenta um efeito ainda mais acentuado, devido à interação sinérgica entre ZnO e Ag, que favorece a transferência de calor e acelera a degradação inicial.

Quando o óxido de zinco, é incorporado nas fibras poliméricas, ele pode atuar como um elemento de transferência de calor dentro da estrutura das fibras e como potencial catalisador de reações de quebra da cadeia polimérica do PLA, resultando em uma diminuição da estabilidade térmica (Tang *et al.*, 2020). A Tabela 4 resume os resultados de TGA e DTGA.

Tabela 4- Temperaturas de degradação térmica das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag

Membranas eletrofiadas	Temperatura de degradação térmica							Perda de massa 2º estágio (%)	Massa residual (%)
	T _i (°C)	T _{max} (°C)	T _f (°C)	Perda de massa 1º estágio (%)	T _{on} (°C)	T _{max} (°C)	T _{off} (°C)		
PLA	261,63	283,30	291,59	93,10	483,65	505,21	509,86	2,70	2,10
PLA/0,25% ZnO	275,98	302,76	309,01	94,93	486,92	507,46	513,59	2,40	1,37
PLA/1% ZnO	263,03	283,27	290,05	96,20	485,04	503,78	509,94	2,87	0,93
PLA/2% ZnO	258,86	277,56	287,44	93,71	486,80	508,00	513,25	2,61	3,68
PLA/0,25% ZnO: 5%Ag	284,55	306,82	313,74	96,93	509,27	510,16	516,39	0,97	2,10
PLA/1% ZnO: 5%Ag	266,22	283,30	297,37	96,90	486,50	506,33	512,20	2,47	0,63
PLA/2% ZnO: 5%Ag	257,53	277,56	289,60	94,99	487,69	506,29	512,55	2,51	2,50

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Legenda: T_i: Temperatura inicial identificada no pico de degradação no TGA; T_{max}: Temperatura de degradação máxima identificada no pico de degradação no DTGA; T_f: Temperatura final identificada no pico de degradação do TGA; T_{on}: Temperatura inicial de perda de massa identificada no pico de degradação no DTGA; T_{off}: Temperatura final de perda de massa identificada no pico de degradação no DTGA; A massa residual foi identificada após do último pico de degradação no DTGA.

Nas análises obtidas por DSC apresentadas na Figura 17, observou-se no primeiro aquecimento (Figura 17 a) o PLA que teve temperatura de transição vítrea (T_g) em 61 °C, um pico exotérmico relacionada a temperatura de cristalização a frio (T_{cc}) em 73,3 °C do PLA. A obtenção de um pico de cristalização a frio, indica que durante o processo, o solvente teve uma evaporação rápida e impediu a cristalização completa do polímero. Com isso, forma-se muitos núcleos cristalinos e, desse modo durante o aquecimento adicional da amostra durante a análise, os núcleos cristalinos crescem, dando origem a uma rápida recristalização, observada a temperaturas inferiores ao ponto de fusão do polímero (Merlini *et al.*, 2023). Por volta dos 175,3 °C temperatura de fusão (T_m), há a presença de um pico endotérmico, associado à fusão dos cristalitos de PLA, e para que isto aconteça se faz necessário absorver energia do meio, ou seja, conforme há um aumento na concentração de nanopartículas ZnO puro e dopado com prata gera um aumento T_m. O grau de cristalinidade das amostras

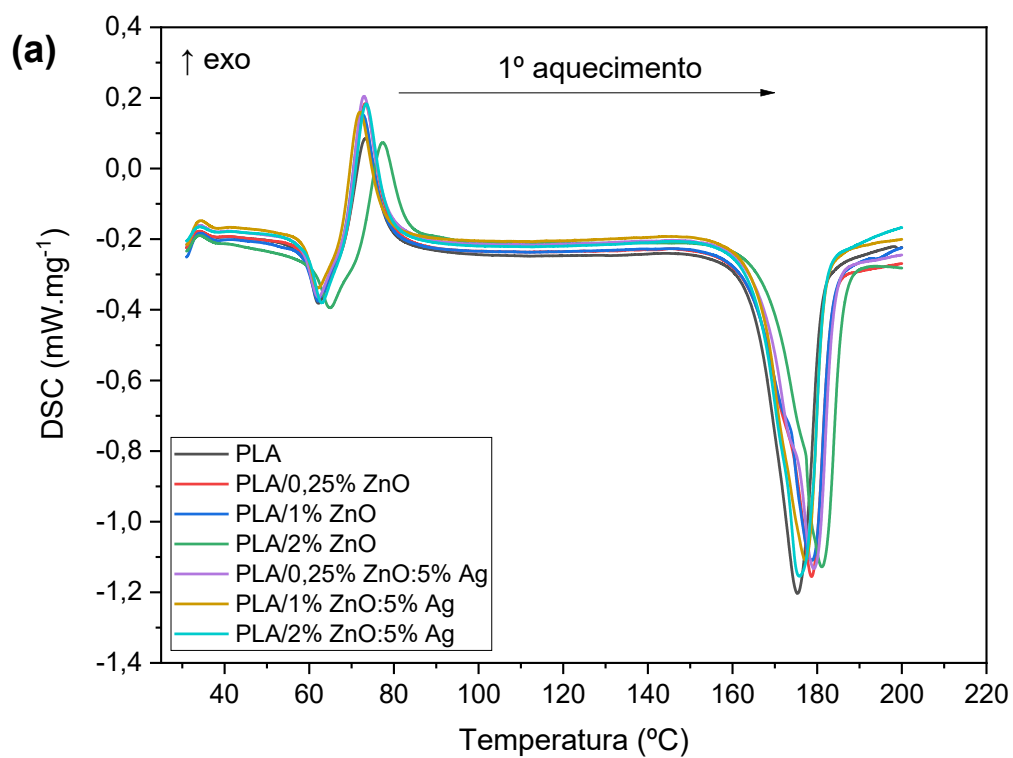
com nanopartículas ZnO puro e dopado com prata diminuíram quando comparada apenas com PLA, indicando que a presença do ZnO afeta de maneira substancial a organização cristalina do PLA durante o processo de eletrofiação.

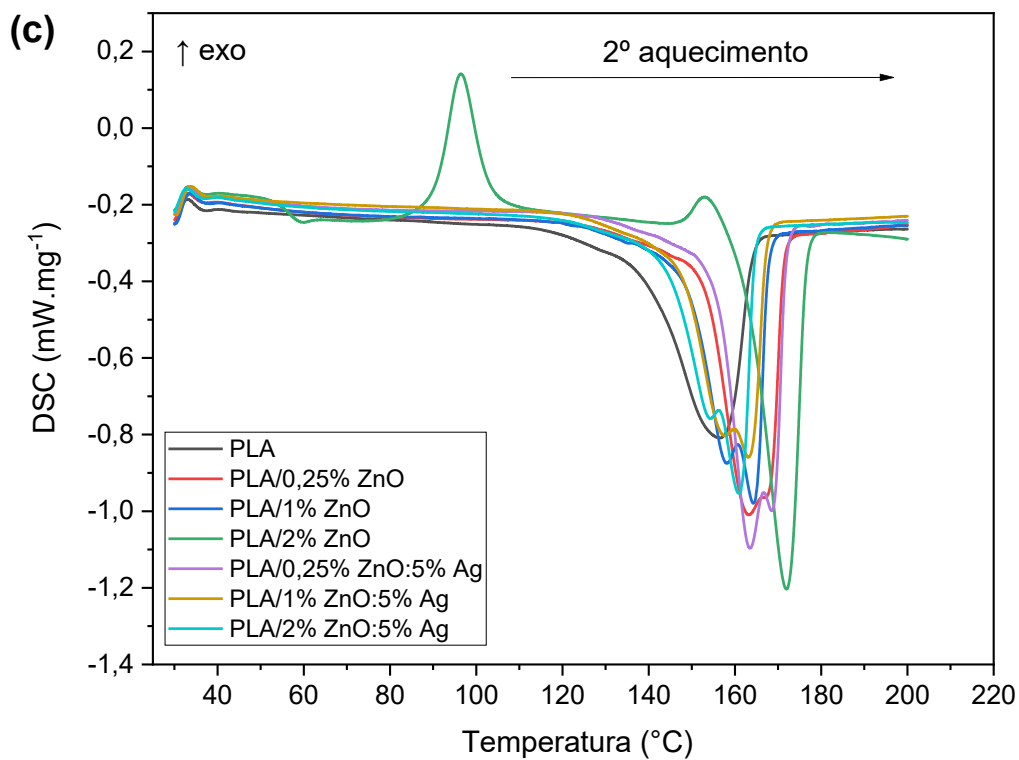
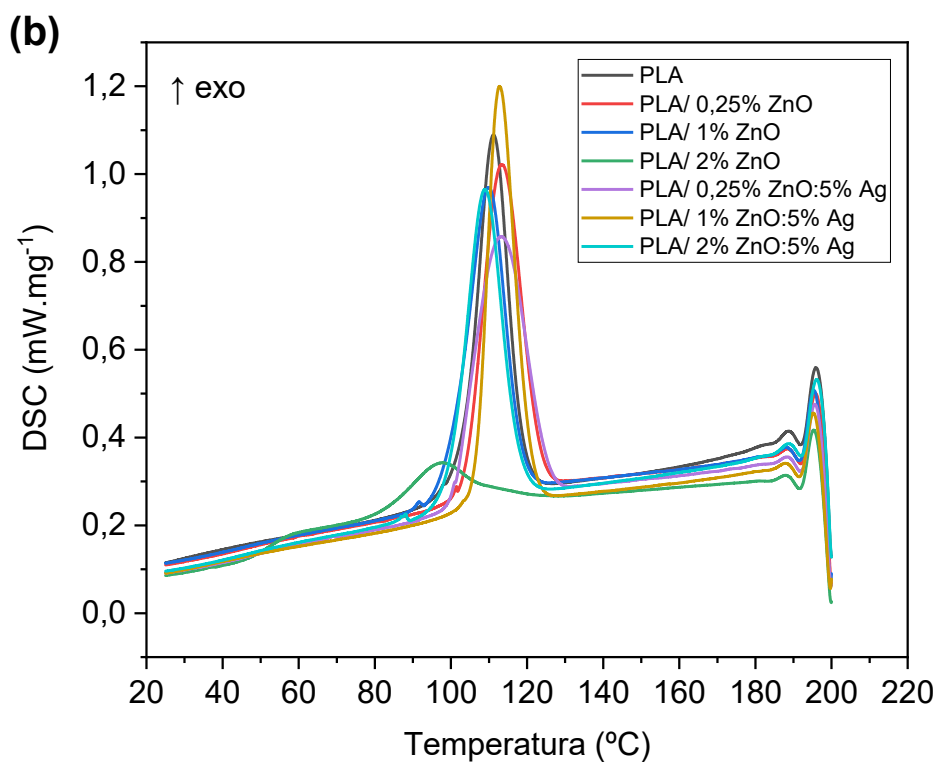
Durante o ciclo de resfriamento (Figura 17 b) é possível observar picos exotérmicos que se referem a cristalização (T_c), a qual a maioria diminuiu conforme adiciona-se ZnO puro e dopado com prata, onde observa-se que para a amostra de PLA/2%ZnO não houve a cristalização completa, impactando assim no segundo aquecimento. Ademias, pode-se explicar que o ZnO puro e dopado com prata atua como agentes nucleantes, capazes de iniciar a cristalização em temperaturas superiores e gerar até uma maior cristalização, visto que o processo de eletrofiação impede que a cristalização completa seja realizada. O primeiro resfriamento tem como finalidade apagar o histórico térmico deste material que sofre influência do processo.

No segundo aquecimento (Figura 17 c), observa-se temperatura de transição vítrea (T_g) e cristalização a frio apenas na amostra de PLA/2%ZnO, justificando que não houve cristalização completa no resfriamento. Visto isto, a presença de ZnO afeta a capacidade de cristalização do PLA de maneira dependente da concentração.

Ademais, a temperatura de fusão (T_m) sofre aumento conforme aumenta concentração de ZnO e ZnO:5%Ag, e o aparecimento de dois picos de fusão em amostras contendo as mesmas. De acordo com a literatura, transições de dupla fusão são frequentemente observadas no PLA devido à sua estrutura polimórfica - a forma α funde a uma temperatura mais alta que a forma β (Yasumiwa *et al.*, 2006; Fukushima, 2009). Ao mesmo tempo, alguns autores relataram que os picos duplos no PLA também podem estar relacionados à reorganização cristalina após a fusão de cristais imperfeitos, formados na cristalização a frio. (Fukushima *et al.*, 2009; Fukushima *et al.*, 2013). O grau de cristalinidade aumenta nas amostras no segundo aquecimento, indicando um aumento da cristalinidade do PLA. Esta maior cristalinidade pode ser atribuída à capacidade do ZnO de atuar como agente nucleante, promovendo uma organização molecular mais ordenada na matriz de PLA (Kim *et al.*, 2019).

Figura 17- Curvas de DSC das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag (a) 1º aquecimento, (b) Resfriamento e (c) 2º aquecimento





Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Tabela 5- Valores de transição térmica do 1º aquecimento, resfriamento e 2º aquecimento por DSC das membranas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag

Amostra	1º Aquecimento				Resfriamento	2º Aquecimento			
	Tg (°C)	Tcc (°C)	Tm (°C)	Xc (%)	Tc (°C)	Tg (°C)	Tcc (°C)	Tm (°C)	Xc (%)
PLA	61,0	73,3	175,3	50,9	112,2	*	*	156,4	62,8
PLA/0,25% ZnO	60,7	73,3	178,7	40,0	113,3	*	*	163,3 166,9	73,3
PLA/1% ZnO	60,6	72,7	178,8	45,4	109,9	*	*	158,2 164,2	64,5
PLA/2% ZnO	63,1	77,3	181,1	43,8	97,9	*	96,3	153,0 171,9	42,5
PLA/0,25% ZnO: 5%Ag	60,5	73	179,3	44,5	113,2	*	*	163,5 168,5	69,8
PLA/1% ZnO: 5%Ag	60,7	72	177,2	45,5	112,8	*	*	157,8 163,2	63,8
PLA/2% ZnO: 5%Ag	61,5	73,4	175,8	49,11	108,9	*	*	154,5 160,9	62,8

Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Legenda: (*) não apresentam os respectivos resultados no gráfico.

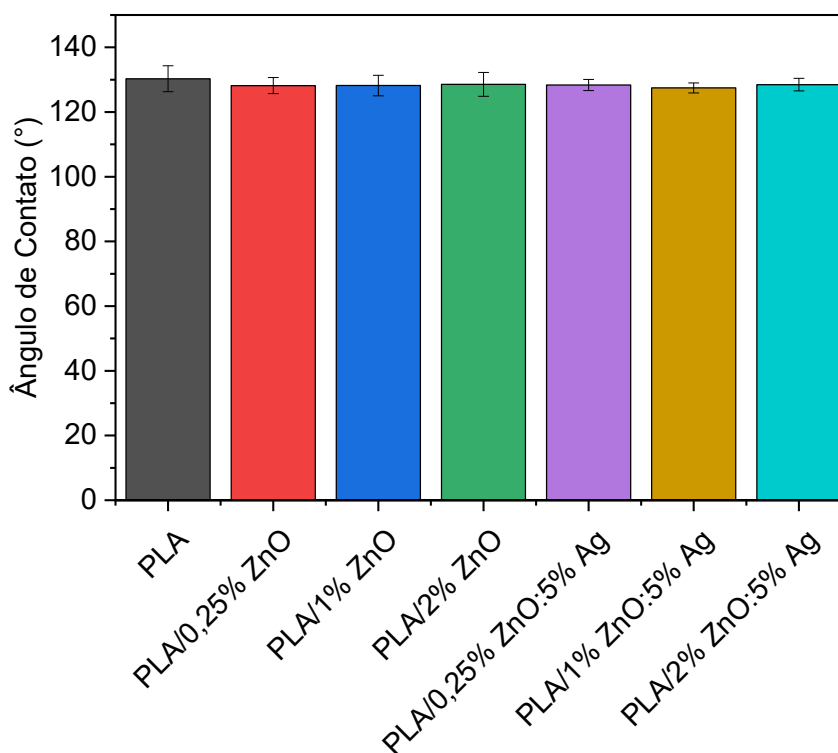
Fazendo uma correlação entre TGA e DSC, a incorporação de ZnO puro e dopado com prata, alterou de forma consistente o comportamento térmico das membranas de PLA. Os resultados de TGA mostraram redução das temperaturas de início e máxima degradação, indicando menor estabilidade térmica das nanopartículas na quebra das cadeias. Por outro lado, os resultados de DSC evidenciaram que o ZnO atua como agente nucleante, aumentando a cristalinidade do material, especialmente após o segundo aquecimento. Assim, observou-se uma relação direta entre maior cristalinidade e redução da estabilidade térmica, demonstrando uma melhora na reorganização estrutural promovida pelas nanopartículas, mas também o torna mais suscetível à degradação térmica.

Uma maneira de estimar a hidrofiliabilidade ou hidrofobicidade de um material é pelo ensaio de ângulo de contato. Segundo Assis (2010) pode-se afirmar que a molhabilidade é regida pela presença de grupos polares e apolares em uma superfície, podendo-se arbitrariamente estabelecer que se o líquido molha em ângulos $0^\circ < \theta < 90^\circ$ a superfície é considerada hidrofílica e hidrofóbica, caso o ângulo medido esteja entre $90^\circ < \theta < 180^\circ$, embora fatores como rugosidade e pressão atmosférica

tenham papéis importantes no ângulo medido. O ensaio de ângulo de contato demonstra que o caráter hidrofóbico das membranas de PLA é mantido após a incorporação do ZnO, Figura 16.

A Figura 18 apresenta os valores de ângulo de contato das membranas eletrofiadas PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag com concentrações de 0,25%*m*, 1%*m* e 2%*m*. Os valores de ângulo de contato para membrana polimérica de PLA é $130,30 \pm 4,01^\circ$, indicando uma superfície hidrofóbica. Os valores de ângulo de contato se mantiveram muito similares com a incorporação das nanopartículas na matriz polimérica, permanecendo uma superfície hidrofóbica, com ângulos acima de 90° .

Figura 18- Média de ângulo de contato das membranas PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag

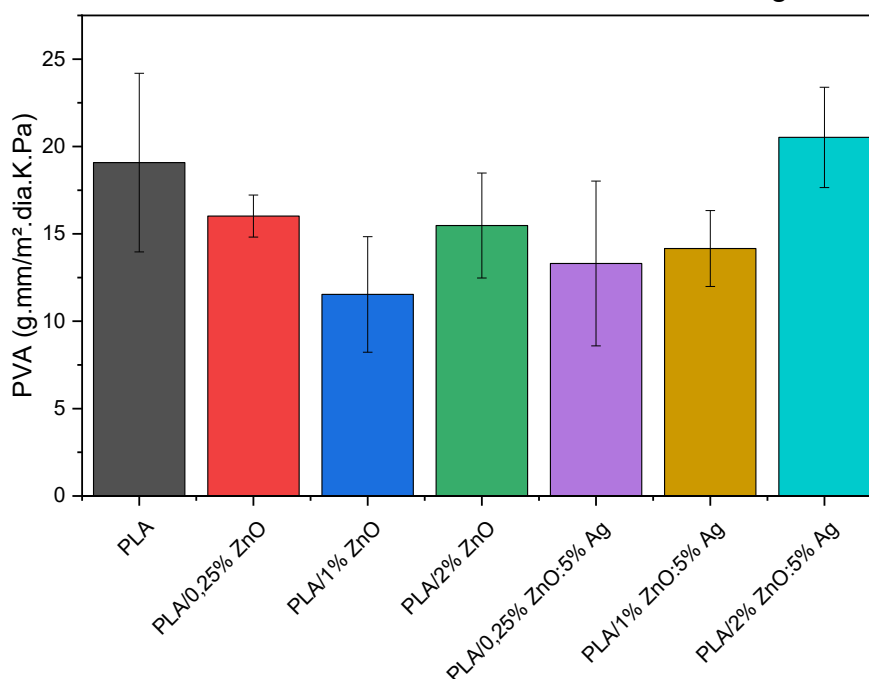


Fonte: Elaborado pela autora (2025)

De acordo com os resultados de permeabilidade ao vapor d'água (PVA) apresentados na Figura 19, observa-se que a incorporação de óxido de zinco puro ou dopado com prata não aumentou a PVA das membranas, e os valores de desvio padrão indicam que não houve diferença significativa entre as amostras. Os valores de permeabilidade das membranas foram entre $11,534$ e $20,521 \text{ g.mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}.\text{kPa}$

¹, onde a maior permeabilidade registrada foi para membrana PLA/2% ZnO:5%Ag, com o ganho médio de 7,56% em relação a membrana eletrofiada de PLA.

Figura 19- Permeabilidade ao Vapor da Água (PVA) das membranas poliméricas eletrofiadas de PLA, PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag.



Fonte: Elaborado pela autora (2025)

Esse comportamento pode estar relacionado às características observadas no MEV (Figura 13) e no diâmetro médio das fibras (Figura 14), onde a membrana de maior concentração de ZnO:5%Ag possui um maior diâmetro de fibra quando comparada com as membranas de outras concentrações ZnO e ZnO:5%Ag. Essa distribuição não homogênea dos poros e a menor conectividade entre eles podem gerar regiões que facilitam a passagem de vapor. Ademais, essa heterogeneidade morfológica decorre da deposição aleatória das fibras no coletor metálico durante o processo de eletrofição.

Resultados semelhantes associam o transporte de água em membranas poliméricas ao nível de porosidade e à abertura de sua estrutura interna, evidenciando que materiais mais porosos facilitam a difusão de fluidos (Chamam *et al.*, 2025; Abdelhakeem *et al.*, 2023). Dessa forma, a comparação entre os dados obtidos e a literatura demonstra que a incorporação das nanopartículas (especialmente quando

dopadas com prata) modifica a morfologia interna das membranas, favorecendo a formação de caminhos difusivos que aumentam o PVA.

Os resultados obtidos de permeabilidade ao vapor d'água indicam que as membranas produzidas apresentam valores adequados para aplicações biomédicas, como em curativos e máscaras faciais multifuncionais, uma vez que permitem a difusão controlada de umidade, mantendo um ambiente úmido favorável à cicatrização e ao conforto do usuário. A estrutura porosa e interconectada observada nas amostras contribui para o equilíbrio entre barreira e respirabilidade, comportamento semelhante ao relatado por Hemkemaier (2024), em máscaras faciais multifuncionais compostas por PLLA, ZnO e líquidos iônicos, que apresentaram boa permeabilidade ao vapor ($16 \text{ g.mm.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}.\text{kPa}^{-1}$) e boa atividade antibacteriana devido à incorporação das nanopartículas de ZnO.

Huamani (2025) descreve o desenvolvimento de curativos avançados à base de PLLA e óleo essencial de manjerição, que exibiram elevada porosidade (80-82%) e uma melhora na permeação do vapor de água em 60%, quanto comprada a membrana de PLLA puro apresentando propriedades que favoreceram a regeneração tecidual e a aceleração da cicatrização de feridas.

Assim, os resultados deste trabalho estão em concordância com a literatura, indicando que as membranas de PLA/ZnO e PLA/ZnO:5%Ag produzidas por eletrofiação apresentam potencial promissor para uso em aplicações biomédicas, como máscaras faciais com ação antimicrobiana e curativos regenerativos.

6 CONCLUSÃO

As micrografias de MEV das nanopartículas de ZnO revelaram uma morfologia uniforme e altamente porosa, com evidente tendência à formação de aglomerados micrométricos compostos por partículas de escala nanométrica. Essa configuração está relacionada à elevada energia superficial das partículas e ao meio de síntese fortemente básico ($\text{pH} = 14$), com formato irregular características de ZnO com grande área superficial. A dopagem com prata não promoveu alterações morfológicas significativas.

A análise de DRX confirmou que as nanopartículas de ZnO puro e dopado com prata apresentam estrutura cristalina hexagonal do tipo wurtzita. A presença da prata foi evidenciada por planos adicionais correspondentes à fase cúbica de Ag. A

dopagem com prata promoveu redução da intensidade dos picos de ZnO, indicando microdeformações na rede cristalina devido às diferenças de tamanho e carga entre Zn^{2+} e Ag^+ .

Os resultados de fotoluminescência revelam que o ZnO apresenta emissões características associadas tanto à recombinação de éxcitons livres quanto a defeitos estruturais profundos, especialmente vacâncias de oxigênio e interstícios de zinco, que explicam as bandas observadas entre a região do visível e do infravermelho. A dopagem com prata reduz a intensidade geral da fotoluminescência, indicando que os íons Ag^+ atuam como centros adicionais de recombinação não radiativa, diminuindo a probabilidade de emissão luminosa.

A análise morfológica das membranas eletrofiadas demonstrou que a incorporação de nanopartículas de ZnO, tanto puro quanto dopado com Ag, não comprometeu a formação das fibras, sendo uniformes e aleatoriamente distribuídas e sem defeitos. Observou-se ainda alta porosidade e ausência de aglomerados, indicando boa dispersão das nanopartículas na matriz polimérica. As variações no diâmetro das fibras estão relacionadas às alterações nas propriedades do processo de eletrofiação. Assim, os resultados confirmam que a adição de ZnO e ZnO:5%Ag reduziu o diâmetro médio das fibras quando comparada com a membrana de PLA.

A análise de FTIR confirmou as bandas características do PLA e mostrou que a incorporação de ZnO e ZnO:5%Ag, promoveu o desaparecimento da banda em 1679 cm^{-1} . Esse efeito está associado ao caráter nucleante das nanopartículas, que aumentam a cristalinidade do polímero e reduzem a fração amorfa, onde normalmente se originam bandas secundárias de carbonila.

As análises térmicas (TGA e DSC) evidenciaram que a adição das nanopartículas influenciou a estabilidade térmica e o grau de cristalinidade das membranas apresentou variação dependente da concentração, indicando que as nanopartículas atuam como agentes nucleantes em determinadas proporções, ou seja, facilitam o início da formação das regiões cristalinas do PLA ao servirem como pontos para o alinhamento das cadeias poliméricas.

As membranas eletrofiadas apresentaram caráter hidrofóbico e a permeabilidade ao vapor d'água (PVA), observou-se que a adição de ZnO e, principalmente, de ZnO:5%Ag resultou em um aumento da permeabilidade das membranas, sendo esse efeito mais evidente na concentração de 2% de ZnO:5%Ag. Esse comportamento está

diretamente relacionado às características morfológicas verificadas nas análises de MEV, pois o diâmetro médio das fibras com incorporação de nanopartículas apresenta menor diâmetro quando comparada com o PLA facilitando a passagem de vapor de água.

As nanopartículas de ZnO e ZnO dopado com prata apresentaram comportamentos distintos quando incorporadas às membranas de PLA. Enquanto o ZnO puro exerceu principalmente efeito nucleante e leve modificação térmica nas membranas, o ZnO:5%Ag, além de manter a morfologia do ZnO, promoveu alterações nas propriedades físico-químicas, como maior variação no grau de cristalinidade, maior permeabilidade ao vapor d'água e influência mais evidente na estabilidade térmica.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de ensaio antimicrobiano, citotoxicidade, biodegradação *in vitro* e em solo, perfil de absorção *in vitro* e ensaio mecânico a fim de avaliar o desempenho biológico e ampliar a aplicabilidade das membranas desenvolvidas para biomédicas.

REFERÊNCIAS

ABDELHAKHEEM, E.; MONIR, S.; TEAIMA, M. H. M. et al. State-of-the-art review of advanced electrospun nanofiber composites for enhanced wound healing. **AAPS PharmSciTech**, v. 24, p. 246, 2023.

ABDULLAH, Johar Amin Ahmed et al. Sustainable integration of zinc oxide nanoparticles: enhancing properties of poly (ϵ -caprolactone) electrospun nanofibers and cast films. **Coatings**, v. 13, n. 10, p. 1665, 2023.

AGARWAL, S.; WENDORFF, J. H.; GREINER, A. Use of electrospinning technique for biomedical applications. **Polymer**, v. 49, n. 26, p. 5603–5621, 2008.

AGNIHOTRI, Shekhar et al. Arginine-assisted immobilization of silver nanoparticles on ZnO nanorods: an enhanced and reusable antibacterial substrate without human cell cytotoxicity. **Nanoscale**, v. 7, n. 16, p. 7415-7429, 2015.

AHN, J. S. et al. Electronic structure and defect levels in ZnO: Zn interstitials and oxygen vacancies. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 6, p. 063709, 2009.

AL FARSI, L. et al. Synthesis and characterization of Al-doped ZnO nanorod array as a photocatalyst under visible light irradiation. **Optical Materials**, p. 117593, 2025.

ALBERTO, N.; et al. Structure–property relationships in 3D polymeric scaffolds for tissue engineering. **Progress in Polymer Science**, 2023.

ALCOBIA, Daniel de Souza. **Produção de nanofibras alinhadas de polímeros biodegradáveis para crescimento e regeneração de células neurais**. 2013. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

ALVI, N. et al. Electroluminescence and photoluminescence studies of n-ZnO nanotubes/p-GaN heterojunctions. **Journal of Applied Physics**, v. 110, n. 8, p. 083502, 2011.

AMARIEI, G. et al. Influence of nanoparticles on the morphology and mechanical properties of electrospun PLA nanofibers. **Materials Science and Engineering: C**, v. 70, p. 863–872, 2017.

ANJUM, Sumaira et al. Recent advances in zinc oxide nanoparticles (ZnO NPs) for cancer diagnosis, target drug delivery, and treatment. **Cancers**, v. 13, n. 18, p. 4570, 2021.

ARELLANO-CORTAZA, M. et al. pH dependent morphology and texture evolution of ZnO nanoparticles fabricated by microwave-assisted chemical synthesis and their photocatalytic dye degradation activities. **Ceramics International**, v. 47, n. 19, p. 27469-27478, 2021.

ASHWINI, A. et al. Visible light photocatalysis enhancement by Ag₃PO₄ decorated with RuO₂ nanoparticles. **Physica B: Condensed Matter**, v. 682, p. 415890, 2024.

ASSIS, Odilio BG. Change in hydrophilic characteristics of chitosan films by hmms plasma treatment. **Química Nova**, v. 33, n. 3, p. 603-606, 2010.

ASTM E96/E96M. Standard Test Methods for Gravimetric Determination of Water Vapor Transmission Rate of Materials. **ASTM International**, v. i, p. 21–22, 2021.

ATIGHI, Miladi et al. PVDF nanofibers composite containing core-shell (ZnO@ZIF-8) for use in smart textile applications. **Journal of Innovative Engineering and Natural Science**, v. 3, n. 2, p. 103-110, 2023.

BABAAHMADI, V. et al. Electrospun nanofibers reinforced with metal oxide nanoparticles for biomedical and environmental applications. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 18, p. 1–18, 2021.

BELAL, R.; GAD, A. Zinc oxide nanoparticles induce oxidative stress, genotoxicity, and apoptosis in the hemocytes of *Bombyx mori* larvae. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 3520, 2 mar. 2023.

BHARDWAJ, R. **Modification of Polylactide Bioplastic Using Hyperbranched Polymer Based Nanostructures**. [s.l: s.n.].

BOHLE, D. Scott; SPINA, Carla J. Cationic and anionic surface binding sites on nanocrystalline zinc oxide: surface influence on photoluminescence and photocatalysis. **Journal of the American Chemical Society**, v. 131, n. 12, p. 4397-4404, 2009.

BROKESH, Anna M.; GAHARWAR, Akhilesh K. Inorganic biomaterials for regenerative medicine. **ACS applied materials & interfaces**, v. 12, n. 5, p. 5319-5344, 2020.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**. 3rd Edition ed. São Paulo: Artliber, 2010.

CAPUANA, E. et al. Poly-L-Lactic Acid (PLLA)-Based Biomaterials for Regenerative Medicine: A Review on Processing and Applications. **Polymers** 2022, Vol. 14, Page 1153, v. 14, n. 6, p. 1153, 14 mar. 2022a.

CAPUANA, E. et al. Poly-L-Lactic Acid (PLLA)-Based Biomaterials for Regenerative Medicine: A Review on Processing and Applications. **Polymers** 2022, Vol. 14, Page 1153, v. 14, n. 6, p. 1153, 14 mar. 2022b.

CASTRO, Vanessa Oliveira. **Conduítes eletrofiadas constituídos de fibras alinhadas de poli(ácido láctico-co-ácido glicólico) com nanopartículas condutoras para a regeneração de nervos periféricos**. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

CASTRO-AGUIRRE, Edgar et al. Poly (lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life. **Advanced drug delivery reviews**, v. 107, p. 333-366, 2016.

CHAMAM, Baha et al. Incorporation of Ag-ZnO Nanoparticles into PVDF Membrane Formulation to Enhance Dye Retention, Permeability, and Antibacterial Properties. **Polymers**, v. 17, n. 9, p. 1269, 2025.

CHEN, Hao et al. Porous scaffold design for additive manufacturing in orthopedics: a review. **Frontiers in bioengineering and biotechnology**, v. 8, p. 609, 2020.

CHENG, Junyao et al. Hydrogel-based biomaterials engineered from natural-derived polysaccharides and proteins for hemostasis and wound healing. **Frontiers in Bioengineering and Biotechnology**, v. 9, p. 780187, 2021.

CHEW, S. Y. et al. The role of electrospinning in the emerging field of nanomedicine. **Current pharmaceutical design**, v. 12, n. 36, p. 4751-4770, 2006.

CHIONO, Valeria; TONDA-TURO, Chiara. Trends in the design of nerve guidance channels in peripheral nerve tissue engineering. **Progress in neurobiology**, v. 131, p. 87-104, 2015.

CHONG, Wei Juene et al. Additive manufacturing of antibacterial PLA-ZnO nanocomposites: Benefits, limitations and open challenges. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 111, p. 120-151, 2022.

CHRYSAFI, I.; AINALI, N. M.; BIKIARIS, D. N. Thermal Degradation Mechanism and Decomposition Kinetic Studies of Poly(Lactic Acid) and Its Copolymers with Poly(Hexylene Succinate). **Polymers**, v. 13, n. 9, p. 1365, 22 abr. 2021.

COSTA, B. C. et al. ZnO nanoparticles with different sizes and morphologies for medical implant coatings: synthesis and cytotoxicity. **BioNanoScience**, v. 8, n. 2, p. 587-595, 2018.

COSTA, Rodrigo GF et al. Eletrofição de Polímeros em Solução: parte I: fundamentação Teórica. **Polímeros**, v. 22, p. 170-177, 2012.

CULLITY, B. D.; Stock, S. R. **Elements of X-Ray Diffraction**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2001.

SILVA, Andrey Marcos Pinho da. **Desenvolvimento de membranas eletrofiadas de poli (ϵ -caprolactona) com oleoresina de copaíba (*Copaifera sp*) e nanopartículas de óxido de zinco (ZnO) para tratamento avançado de lesões cutâneas**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

OLIVEIRA, Jerusa Maria de et al. Simonkolleite into Zinc Oxide Transformation: New Antibacterial Agents and in Vivo Toxicity. **Available at SSRN 4618291**.

DOMINGUES, Rui Carlos Castro. **Desenvolvimento membranas de poli (ácido láctico) para aplicação com conduíte de guia neural**. Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

DRUMRIGHT, R. E.; GRUBER, P. R.; HENTON, D. E. Polylactic Acid Technology. **Advanced Materials**, v. 12, n. 23, p. 1841–1846, dez. 2000.

EATEMADI, Ali et al. Nanofiber: Synthesis and biomedical applications. **Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology**, v. 44, n. 1, p. 111-121, 2016.

ELSAWY, Moataz A. et al. Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1346-1352, 2017.

FAN, J.; FREER, R. The roles played by Ag and Al dopants in controlling the electrical properties of ZnO varistors. **Journal of Applied Physics**, v. 77, n. 9, p. 4795–4800, 1 maio 1995.

FARAH, Shady; ANDERSON, Daniel G.; LANGER, Robert. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. **Advanced drug delivery reviews**, v. 107, p. 367-392, 2016.

FERRONE, E. et al. ZnO Nanostructures and Electrospun ZnO–Polymeric Hybrid Nanomaterials in Biomedical, Health, and Sustainability Applications. **Nanomaterials**, v. 9, n. 10, p. 1449, 12 out. 2019.

FLORES, Betty et al. Crystallographic and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by two different methods. **Applied Physics A**, v. 131, n. 4, p. 1-13, 2025.

FUKUSHIMA, K.; TABUANI, D.; CAMINO, Giovanni. Nanocomposites of PLA and PCL based on montmorillonite and sepiolite. **Materials Science and Engineering: C**, v. 29, n. 4, p. 1433-1441, 2009.

GORRASI, Giuliana; PANTANI, Roberto. Hydrolysis and Biodegradation of Poly (lactic acid). **Synthesis, Structure and Properties of Poly (lactic acid)**, p. 119-151, 2017.

HEMKEMAIER, Matheus Campos. **Membranas eletrofiadas de poli(ácido láctico) com nanopartículas de óxido de zinco dispersas com líquido iônico para potencial aplicação em máscaras faciais multifuncionais**. 2024. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2024.

HUAMANI, Katterine Patricia Taipe. **Nãotecidos eletrofiados de poli(ácido L-láctico) e óleo essencial de manjerição para cicatrização de feridas cutâneas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2025.

HUSSAIN, Atif et al. Optimizing photocatalytic performance with Ag-doped ZnO nanoparticles: Synthesis and characterization. **Heliyon**, v. 10, n. 15, 2024.

JAMNONGKAN, Tong sai et al. Effect of ZnO concentration on the diameter of electrospun fibers from poly (vinyl alcohol) composited with ZnO nanoparticles. **Key Engineering Materials**, v. 759, p. 81-85, 2018.

JAMSHIDIAN, M.; TEHRANY, E. A.; DESOBRY, S. Release of synthetic phenolic antioxidants from extruded poly lactic acid (PLA) film. **Food Control**, v. 28, n. 2, p. 445–455, dez. 2012.

JEYANTHI, C. Esther et al. A comparative study on physico-chemical, optical, magnetic and ferroelectric properties of undoped BiFeO₃ and Ni-doped BiFeO₃ nanoparticles. **Inorganic Chemistry Communications**, v. 158, p. 111608, 2023.

JHA, Shruti; RANI, Ritu; SINGH, Sandeep. Biogenic zinc oxide nanoparticles and their biomedical applications: a review. **Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials**, v. 33, n. 6, p. 1437-1452, 2023.

JIANG, Qi et al. Fabrication of photoluminescent ZnO/SBA-15 through directly dispersing zinc nitrate into the as-prepared mesoporous silica occluded with template. **Journal of Materials Chemistry**, v. 16, n. 16, p. 1536-1542, 2006.

KAENPHAKDEE, Sujittra et al. Zinc oxide synthesis from extreme ratios of zinc acetate and zinc nitrate: synergistic morphology. **Materials**, v. 15, n. 2, p. 570, 2022.

KAI, Dan; LIOW, Sing Shy; LOH, Xian Jun. Biodegradable polymers for electrospinning: Towards biomedical applications. **Materials Science and Engineering: C**, v. 45, p. 659-670, 2014.

KHARAGHANI, Davood et al. Preparation and in-vitro assessment of hierarchal organized antibacterial breath mask based on polyacrylonitrile/silver (PAN/AgNPs) nanofiber. **Nanomaterials**, v. 8, n. 7, p. 461, 2018.

KHURSHID, Farheen et al. Ag-doped ZnO nanorods embedded reduced graphene oxide nanocomposite for photo-electrochemical applications. **Royal Society open science**, v. 6, n. 2, p. 181764, 2019.

KIM, Insoo et al. Poly (lactic acid)/ZnO bionanocomposite films with positively charged ZnO as potential antimicrobial food packaging materials. **Polymers**, v. 11, n. 9, p. 1427, 2019.

KIM, Jun Sung et al. Antimicrobial effects of silver nanoparticles. **Nanomedicine: Nanotechnology, biology and medicine**, v. 3, n. 1, p. 95-101, 2007.

LANNO, Georg-Marten et al. Antibacterial porous electrospun fibers as skin scaffolds for wound healing applications. **ACS omega**, v. 5, n. 46, p. 30011-30022, 2020.

LAO, M. et al. Electrospun porous nanofibers for sustained drug delivery: Degradation-controlled release through architectural design. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 257, p. 115126, jan. 2026.

LEI, B. et al. Hybrid Polymer Biomaterials for Bone Tissue Regeneration. **Frontiers of medicine**, v. 13, n. 2, p. 189–201, 1 abr. 2019.

LI, Y.; CHENG, G. S.; ZHANG, L. D. Fabrication of highly ordered ZnO nanowire arrays in anodic alumina membranes. **Journal of Materials Research**, v. 15, n. 11, p. 2305-2308, 2000.

LU, Xiaoqi; ZHOU, Libo; SONG, Weiye. Recent progress of electrospun nanofiber dressing in the promotion of wound healing. **Polymers**, v. 16, n. 18, p. 2596, 2024.

MALEKI, H. et al. Poly(lactic acid)-Based Electrospun Fibrous Structures for Biomedical Applications. **Applied Sciences**, v. 12, n. 6, p. 3192, 21 mar. 2022.

MALISZEWSKA, I.; CZAPKA, T. Electrospun Polymer Nanofibers with Antimicrobial Activity. **Polymers**, v. 14, n. 9, p. 1661, 1 jan. 2022.

MANDAL, A. K. et al. Current Research on Zinc Oxide Nanoparticles: Synthesis, Characterization, and Biomedical Applications. **Nanomaterials**, v. 12, n. 17, p. 3066, 3 set. 2022.

MARANA, Naiara Letícia; SAMBRANO, Julio Ricardo; SOUZA, Aguinaldo Robinson de. Propriedades eletrônicas, estruturais e constantes elásticas do ZnO. **Química Nova**, v. 33, p. 810-815, 2010.

MAYRINCK, Caroline et al. Síntese, propriedades e aplicações de óxido de zinco nanoestruturado. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 5, p. 1185-1204, 2014.

MERCANTE, Luiza A. et al. Electrospinning-based (bio) sensors for food and agricultural applications: A review. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 91, p. 91-103, 2017.

MERLINI, Claudia. **Desenvolvimento de membranas eletrofiadas de poli (fluoreto de vinilideno) com polipirrol para aplicação em sensores de compressão**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MERLINI, Claudia et al. Epoxidized Ionic Liquids as Processing Auxiliaries of Poly (Lactic Acid) Matrix: Influence on the Manufacture, Structural and Physical Properties. **Nanomaterials**, v. 13, n. 9, p. 1476, 2023.

MISHRA, Yogendra Kumar et al. Virostatic potential of micro–nano filopodia-like ZnO structures against herpes simplex virus-1. **Antiviral research**, v. 92, n. 2, p. 305-312, 2011.

MITTAL, Ravi K. et al. From synthesis to solutions: hydrogels' impact on the biomedical landscape. **Current Pharmaceutical Biotechnology**, 2025.

MITCHELL, M. J. et al. Engineering precision nanoparticles for drug delivery. **Nature Reviews Drug Discovery**, v. 20, n. 1, p. 1–24, 4 dez. 2020.

MOHAMMED, S. S.; MAHMOOD, A. Biopolymers: An Introduction and Biomedical Applications. **Journal of Physical Chemistry and Functional Materials**, v. 7, n. 2, 27 ago. 2024.

MOKGOLO, Ponka J.; MALEVU, Thembinkosi D. Improving perovskite solar cell efficiency with Yb-Doped ZnO nanostructures through structural, optical and electrical investigations. **Scientific African**, p. e02915, 2025.

MOTE, V. D; PURUSHOTHAM, Y. P.; DOLE, B. N. Williamson-Hall analysis in estimation of lattice strain in nanometer-sized ZnO particles. **Journal of theoretical and applied physics**, v. 6, n. 1, p. 6, 2012.

NAIR, Lakshmi S.; LAURENCIN, Cato T. Biodegradable polymers as biomaterials. **Progress in polymer science**, v. 32, n. 8-9, p. 762-798, 2007.

NGUYEN, Thi Xuan Quynh et al. Separation of used automobile oil/water mixture by Nylon 6/ZnO nanoparticles electrospun membrane. **Separation and Purification Technology**, v. 298, p. 121578, 2022.

PADILLA-GAINZA, Victoria et al. Processing-structure-property relationships of biopolyester/zinc oxide fibrous scaffolds engineered by centrifugal spinning. **Polymers for Advanced Technologies**, v. 31, n. 11, p. 2601-2614, 2020.

PATRA, J. K. et al. Nano Based Drug Delivery systems: Recent Developments and Future Prospects. **Journal of Nanobiotechnology**, v. 16, n. 1, 19 set. 2018.

PIRES, Ana Luiza R.; BIERHALZ, Andrea CK; MORAES, Angela M. Biomaterials: types, applications, and market. **Química Nova**, v. 38, p. 957-971, 2015.

PUTTI, Matilde et al. Electrospinning poly (ϵ -caprolactone) under controlled environmental conditions: Influence on fiber morphology and orientation. **Polymer**, v. 63, p. 189-195, 2015.

RAHA, Sauvik; AHMARUZZAMAN, Md. ZnO nanostructured materials and their potential applications: progress, challenges and perspectives. **Nanoscale advances**, v. 4, n. 8, p. 1868-1925, 2022.

RAJI, R.; GOPCHANDRAN, K. G. ZnO nanostructures with tunable visible luminescence: Effects of kinetics of chemical reduction and annealing. **Journal of Science: Advanced Materials and Devices**, v. 2, n. 1, p. 51-58, 2017.

SHARMA, Richa et al. Structural, morphological and antimicrobial study of ZnO/Ag nanoparticles. **Biomed. Pharmacol. J**, v. 13, p. 1645-1652, 2022.

SILVA, Bruno de Abreu. **Propriedades estruturais e magnéticas de nanopartículas de óxido de zinco sintetizadas por métodos químicos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2023.

SINGHVI, Mamta S.; ZINJARDE, Smita S.; GOKHALE, Digambar V. Polylactic acid: synthesis and biomedical applications. **Journal of applied microbiology**, v. 127, n. 6, p. 1612-1626, 2019.

SU, Yingchun et al. 3D electrospun synthetic extracellular matrix for tissue regeneration. **Small Science**, v. 1, n. 7, p. 2100003, 2021.

STACHEWICZ, Urszula et al. 3D imaging of cell interactions with electrospun PLGA nanofiber membranes for bone regeneration. **Acta biomaterialia**, v. 27, p. 88-100, 2015.

TANG, Zhenya et al. Barrier properties and characterizations of poly (lactic acid)/ZnO nanocomposites. **Molecules**, v. 25, n. 6, p. 1310, 2020.

TREVISAN, Rafael O. et al. Enhanced antibacterial efficacy of biocompatible Ag-doped ZnO/AgO/TiO₂ nanocomposites against multiresistant bacteria. **Next Materials**, v. 7, p. 100447, 2025.

TRIPATHI, Alok Shiomurti et al. Material matters: exploring the interplay between natural biomaterials and host immune system. **Frontiers in Immunology**, v. 14, p. 1269960, 2023.

VANHEUSDEN, K. et al. Mechanisms behind green photoluminescence in ZnO phosphor powders. **Journal of applied physics**, v. 79, n. 10, p. 7983-7990, 1996.

VENTURELLI, A. P. **Desenvolvimento de membranas eletrofiadas para aplicações biomédicas**. 2016. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

VIKAL, Sagar et al. Structural, optical and antimicrobial properties of pure and Ag-doped ZnO nanostructures. **Journal of Semiconductors**, v. 43, n. 3, p. 032802, 2022.

WAGH, Snehal S. et al. Silver doped ZnO nanoparticles synthesized for photocatalysis application. **ES Energy & Environment**, v. 17, n. 12, p. 94-105, 2022.

WILLIAMSON, G. K.; HALL, W. H. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram. **Acta Metallurgica**, v. 1, n. 1, p. 22–31, 1953.

WOJNAROWICZ, J.; CHUDOBA, T.; LOJKOWSKI, W. A Review of Microwave Synthesis of Zinc Oxide Nanomaterials: Reactants, Process Parameters and Morphologies. **Nanomaterials**, v. 10, n. 6, p. 1086, 31 maio 2020.

XIA, Y. The Chemistry of Nanomaterials. Edited by C. N. R. Rao, A. Müller, A. K. Cheetham. **ChemPhysChem**, v. 5, n. 12, p. 1913–1914, 6 dez. 2004.

XUE, Jiajia et al. Electrospun nanofibers: new concepts, materials, and applications. **Accounts of chemical research**, v. 50, n. 8, p. 1976-1987, 2017.

YAMADA, Florência Karin. **Desenvolvimento de Membranas Eletrofiadas de Poli(Estireno-b-Etileno-Ran-Butileno-B-Estireno) com Nanotubos de Carbono**. 2016. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

YAN, Bomin et al. Electrospun nanofibrous membrane for biomedical application. **SN Applied Sciences**, v. 4, n. 6, p. 172, 2022.

YAN, Sai et al. Electrospun organic/inorganic hybrid nanofibers for accelerating wound healing: a review. **Journal of Materials Chemistry B**, v. 12, n. 13, p. 3171-3190, 2024.

YASUNIWA, Munehisa et al. Crystallization behavior of poly (l-lactic acid). **Polymer**, v. 47, n. 21, p. 7554-7563, 2006.

YU, Hao et al. Multifunctional porous poly (L-lactic acid) nanofiber membranes with enhanced anti-inflammation, angiogenesis and antibacterial properties for diabetic wound healing. **Journal of nanobiotechnology**, v. 21, n. 1, p. 110, 2023.

ZHOU, Xian-Qing et al. Zinc oxide nanoparticles: synthesis, characterization, modification, and applications in food and agriculture. **Processes**, v. 11, n. 4, p. 1193, 2023.