

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS: MANTAS ELETROFIADAS DE PCL
COM ADIÇÃO DE CERA DE CANDELILA**

PEDRO HENRIQUE TRINDADE PEREIRA

Ilha Solteira - SP

06/2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE BIOMATERIAIS: MANTAS ELETROFIADAS DE PCL E
CERA DE CANDELILA**

PEDRO HENRIQUE TRINDADE PEREIRA

Orientadora: Lígia Maria Manzine Costa

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentada à Faculdade de Engenharia,
Campus de Ilha Solteira, Universidade
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
(UNESP), como requisito para obtenção do
título de bacharel em Ciências
Biológicas.

Ilha Solteira - SP

06/2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Pereira, Pedro Henrique Trindade.

P436d Desenvolvimento de biomateriais: mantas eletrofiadas de PCL com adição de cera de Candelila / Pedro Henrique Trindade Pereira Pereira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
39 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em ciências biológicas)
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira, 2025

Orientador: Ligia Maria Manzine Costa

Inclui bibliografia

1. Pele. 2. Policaprolactona. 3. Eletrofiação. 4. Mantas poliméricas. 5. Curativos.

ANEXO V**ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

TÍTULO DO TRABALHO: Desenvolvimento de biomateriais: mantas eletrofiadas de poli(ϵ -caprolactona) e cera de candelila.

NOME DO ALUNO: Pedro Henrique Trindade Pereira

REGULAMENTO SOBRE A AVALIAÇÃO:

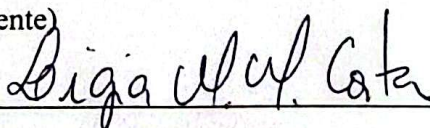
ARTIGO 25° - § 2° A apresentação pública do trabalho de TCC deverá ser de no mínimo 20 (vinte) minutos e máximo de 40 (quarenta) minutos. Após um intervalo de 5 (cinco) minutos, haverá a arguição do Trabalho pelos examinadores. O tempo de arguição, será de até 15 (quinze) minutos para cada examinador, e até 15 (quinze) minutos o tempo para a resposta do aluno a cada examinador ou no caso de se optar pelo diálogo, o tempo conjunto entre examinador e acadêmico(a) será de no máximo 30 (trinta) minutos.

ARTIGO 24° - No julgamento do TCC, a banca examinadora deverá avaliar a apresentação oral, escrita e a defesa do trabalho durante a arguição. O conceito final será **APROVADO** ou **REPROVADO**.

COMISSÃO EXAMINADORA

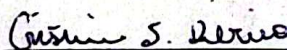
1° EXAMINADOR (Orientador-Presidente)

Nome: Ligia Maria Manzine Costa



2° EXAMINADOR

Nome: Cristiéle da Silva Ribeiro

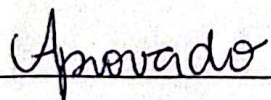


3° EXAMINADOR

Nome: Fernando Rogério de Paula



CONCEITO:



Ilha Solteira-SP, 26 de junho de 2025.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à UNESP por ter possibilitado a realização do meu TCC por meio do Laboratório de Bionanomateriais do Bioma Brasileiro, assim como a toda a equipe envolvida, em especial à professora e orientadora Lígia Maria Manzine, que foi responsável por direcionar os objetivos da pesquisa e orientar cada etapa dos testes essenciais para o desenvolvimento do trabalho. Agradeço também ao meu colega de laboratório, Higor de Souza Silva, que me auxiliou na realização dos testes apresentados, assim como a docente Dra. Márcia e o discente Lacan, que contribuíram significativamente para a realização do teste da gota séssil, o qual se integrou de maneira bem relevante ao desenvolvimento deste trabalho.

Além disso, sou grato pelos diversos amigos que fiz ao longo do curso (tanto docentes quanto discentes) — em especial, todos!

RESUMO

Este trabalho teve como foco o desenvolvimento de biomateriais à base de policaprolactona (PCL) e cera de candelila por meio da técnica de eletrofiação, com o objetivo de criar mantas com potencial uso na área da saúde. Foram preparadas soluções com diferentes proporções (5%, 10%, 15%, 20% e 50% m/m) de cera de candelila na solução do PCL, que posteriormente foram processadas por eletrofiação. As mantas produzidas foram analisadas e caracterizadas. Foram realizados testes que envolveram a medição do ângulo de contato (para avaliar a molhabilidade), análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (MEV), caracterização química por espectroscopia no infravermelho (FTIR) e análise do comportamento mecânico através do ensaio de tração. Os resultados mostraram que foi possível produzir mantas eletrofiadas contendo cera de candelila e PCL. A adição da cera alterou características importantes das mantas, como a hidrofobicidade, que aumentou principalmente na formulação com 15% de cera. Já concentrações mais elevadas causaram deformações visíveis na estrutura das fibras. A análise por FTIR indicou a presença de bandas características do PCL e Cera de Candelila, mas sem a formação de novos grupos funcionais. A manta com 5% de cera foi a única a apresentar caráter hidrofílico, enquanto as demais mantiveram ou acentuaram o comportamento hidrofóbico, sendo que a formulação com 15% apresentou o maior ângulo de contato. No MEV, foram observadas fibras com boa formação nas concentrações de até 15%, enquanto as de 20% e 50% apresentaram defeitos estruturais. Com base nesses achados, o estudo aponta que a combinação entre PCL e cera de candelila pode ser uma alternativa viável e funcional na produção de biomateriais, desde que respeitados os limites de incorporação da cera para manter a qualidade das fibras.

Palavras-chave: Pele; Policaprolactona; Eletrofiação; Mantas poliméricas; Curativos.

ABSTRACT

This work focused on the development of biomaterials based on polycaprolactone (PCL) and candelilla wax using the electrospinning technique, aiming to create mats with potential applications in the healthcare field. Solutions with different proportions of the two components were prepared and analyzed in terms of morphology, wettability, structural, and mechanical properties. The results showed that the addition of wax altered important characteristics of the mats, such as hydrophobicity, which increased mainly in the formulation with 15% wax. Higher concentrations, however, caused visible deformations in the fiber structure. FTIR analysis indicated changes in the PCL peaks, but no formation of new functional groups. The tests involved measuring the contact angle (to assess wettability), morphological analysis by scanning electron microscopy (SEM), and chemical characterization by infrared spectroscopy (FTIR). The mat with 5% wax was the only one to exhibit hydrophilic behavior, while the others maintained or increased hydrophobic behavior, with the 15% formulation showing the highest contact angle. In the SEM analysis, well-formed fibers were observed at concentrations up to 15%, while the 20% and 50% formulations presented structural defects. Regarding FTIR, it showed that the wax gradually altered the intensity of certain PCL peaks, reinforcing its influence. Based on these findings, the study suggests that the combination of PCL and candelilla wax can be a viable and functional alternative for wound dressing production, provided that the wax incorporation limits are respected to maintain fiber quality.

Keywords: Skin; Polycaprolactone; Electrospinning; Polymeric mats; wound dressing.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 Cera de candelila	10
2.2 Eletrofiação	12
2.3 Aplicações da eletrofiação	14
3. OBJETIVOS	16
3.1 OBJETIVO GERAL	16
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Material	17
4.2 Métodos	17
4.2.1 Sistema de eletrofiação	19
4.2.2 Caracterização morfológica das mantas	20
4.2.3 Análise por FTIR	21
4.2.4 Análise da molhabilidade	21
4.2.5 Ensaio mecânico	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	22
5.1 Mantas eletrofiadas	22
5.2 Caracterização morfológica e medida dos diâmetros médios das fibras	23
5.3 Análise por FTIR	26
5.4 Média do ângulo de contato	30

5.5 Ensaio mecânico.....	32
6. CONCLUSÃO	35
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

A pele, maior órgão do corpo humano, constitui a primeira barreira contra agentes físicos, químicos e biológicos capazes de comprometer a homeostase sistêmica. Lesões agudas ou crônicas sendo traumáticas, térmicas ou de origem infecciosa, representam um desafio crescente para os serviços de saúde, exigindo curativos que protejam a ferida, mantenham ambiente úmido controlado e, idealmente, acelerem a regeneração tecidual. Nesse cenário, a eletrofiação desponta como técnica de destaque na engenharia de tecidos. Ao produzir nanofibras com diâmetro na ordem de poucas centenas de nanômetros, o processo gera membranas dotadas de elevada porosidade, ampla área superficial e notável semelhança estrutural com a matriz extracelular (ECM). Tais características favorecem adesão celular, difusão de nutrientes e eventual liberação controlada de fármacos, atributos cruciais para curativos cutâneos avançados.

Entre os polímeros empregados, a policaprolactona (PCL) reúne biodegradabilidade, biocompatibilidade e processamento facilitado, além de já contar com aprovação regulatória pelo FDA e pela ANVISA para uso biomédico. Sua matriz polimérica admite a incorporação de compostos bioativos ainda durante a eletrofiação, permitindo o desenvolvimento de sistemas multifuncionais.

A cera de candelila (*Euphorbia antisyphilitica*) agrega benefícios singulares a esses sistemas. Sua micro-cristalinidade hidrofóbica promove “oclusão inteligente”, reduzindo a perda de água transepidérmica sem provocar maceração, enquanto fitoesteróis minoritários exercem ação antioxidante capaz de neutralizar radicais livres gerados por radiação UV e poluentes. Ademais, a cera funciona como reservatório de moléculas bioativas, liberadas gradualmente pela fusão parcial à temperatura cutânea, prolongando o efeito terapêutico. Classificada como GRAS (21 CFR 172.886) e listada positivamente pela ANVISA, apresenta baixo potencial sensibilizante, o que valida seu emprego em formulações de uso tópico contínuo.

Dessa forma, integrar a estrutura nanofibrilar da PCL com a cera de candelila configura uma estratégia promissora para a obtenção de curativos bioativos de próxima geração. Este Trabalho de Conclusão de Curso propõe o desenvolvimento e a

caracterização de membranas eletrofiadas de PCL contendo cera de candelila, avaliando suas propriedades físico-químicas, visando futuramente aplicações como biomateriais para atuarem na cicatrização de feridas cutâneas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

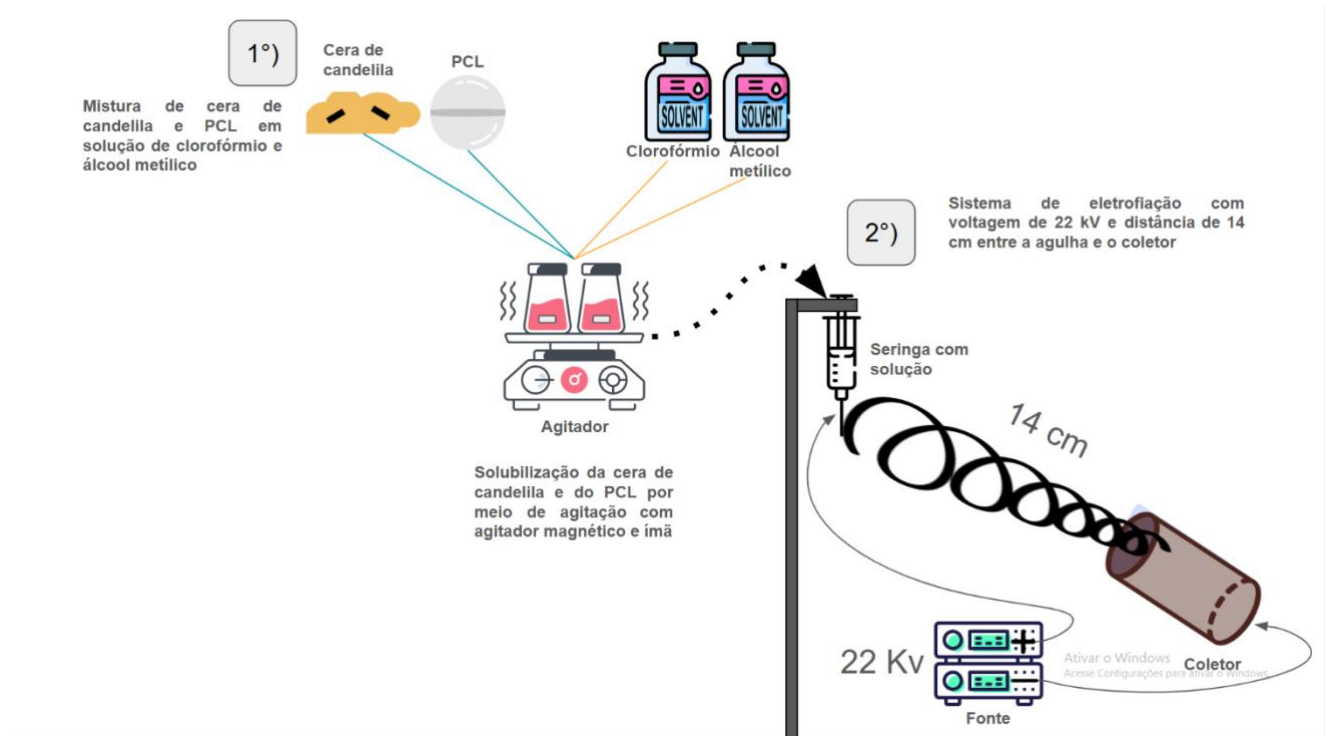
2.1 Cera de candelila

A cera de candelila é um material natural e biodegradável, amplamente requisitado por diversas indústrias, desde a cosmética até a eletrônica. Essa substância se destaca por sua estética, incluindo a maleabilidade, o brilho e a coloração amarela transparente, além de apresentar características físicas relevantes, como seu elevado nível de dureza (Cabello Alvarado et al., 2013). O seu uso é bem conhecido no revestimento comestível de alimentos como frutas, o que ajuda a aumentar a vida útil das mesmas (ROJAS MOLINA et al., 2011).

Sua obtenção ocorre a partir do caule da planta *Euphorbia antisiphilitica*, um arbusto popularmente conhecido como candelila, nativo do norte do México e do sudoeste dos Estados Unidos. O processo de extração consiste no fervimento do caule em ácido sulfúrico diluído, fazendo com que a cera se desprenda da planta e suba à superfície da mistura, sendo então recolhida e resfriada (CABELLO ALVARADO et al., 2013).

A remoção de impurezas é realizada por meio da fusão da cera com água, seguida de lavagem com ácido fosfórico. Em seguida, a cera é fervida novamente para eliminar a água residual. O branqueamento é feito, preferencialmente, com ácido fosfórico, por ser a alternativa que melhor preserva a estrutura e as propriedades da cera, uma vez que a mesma será composta por substâncias como taninos, que terá como seus componentes tanto o ácido elágico quanto o ácido gálico, que são compostos fenólicos muito importantes por suas ações antioxidante, antimicrobiana, antitumorais, antivirais e anti-inflamatórias (CABELLO ALVARADO et al., 2013). Tais propriedades se demonstram de grande importância para aplicação em curativos (Figura 1).

Figura 1 Solubilização e eletrofiação da cera de candelila e PCL.



Fonte: AUTOR, 2025.

Blake, Toro-Vazquez e Hwang (2018) apontam que, em termos de composição, os principais componentes da cera de candelila são os hidrocarbonetos, seguidos pelos ésteres, ácidos graxos livres e álcoois de ácidos graxos. Essa distribuição de compostos influencia diretamente propriedades como resistência, dureza, plasticidade e elasticidade da cera.

No cuidado com a pele, a cera de candelila desempenha um papel importante na formulação de diversos cremes corporais, devido às suas propriedades protetoras. Além disso, é amplamente utilizada na produção de batons e cosméticos capilares, contribuindo para características como textura e brilho dos produtos (SEMARNAT, 2008).

Vale ressaltar que foi identificado um composto denominado candelitanino, extraído dos resíduos da planta candelila após o processo de obtenção da cera, o qual demonstrou atividade antifúngica eficaz contra fungos fitopatogênicos como *alternaria alternata*, *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum gloeosporioides* e *Rhizoctonia solani* (ASCACIOVALDÉS et al., 2013).

A cera da candelila apresenta propriedades funcionais que a tornam especialmente útil em formulações farmacêuticas cutâneas. Sua filmogenicidade hidrofóbica forma uma barreira contra vapor d'água e gases, o que contribui para a redução da perda de água transepidérmica (TEWL – *transepidermal water loss*) e para a manutenção da hidratação da pele (GARCÍA-BETANZOS et al., 2023; GALUS et al., 2020). Além disso, seu ponto de fusão elevado e a capacidade de cristalização controlada favorecem a formação de uma rede cristalina estável em sistemas de liberação como carreadores lipídicos nanoestruturados (NLC – *Nanostructured Lipid Carriers*) e nanopartículas lipídicas sólidas (SLN – *Solid Lipid Nanoparticles*), garantindo estrutura a formulações sólidas, como bastões labiais e desodorantes, e permitindo liberação controlada de ativos (SISLIOGLU et al., 2021). Sua baixa reatividade química e alta estabilidade oxidativa conferem resistência à rancidez, prolongando a vida útil (*shelf-life*) de cremes e pomadas. A presença de fitoesteróis e triterpenoides na composição da cera também agrega propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, contribuindo para proteção contra radicais livres e irritações cutâneas (OLIVER; KENZIE, 2024). Por fim, por ser hipoalergênica e não comedogênica, a cera da candelila é considerada segura e apropriada para peles sensíveis ou acneicas (EKAKITIE, 2024).

2.2 Eletrofiação

A eletrofiação é uma técnica que utiliza um campo elétrico para produzir micro e nanofibras a partir de uma solução polimérica. Embora a patente do processo tenha sido registrada por Formhals em 1934, o interesse pela técnica só ganhou destaque a partir da década de 1990, impulsionado pela crescente demanda por novos materiais. Esse

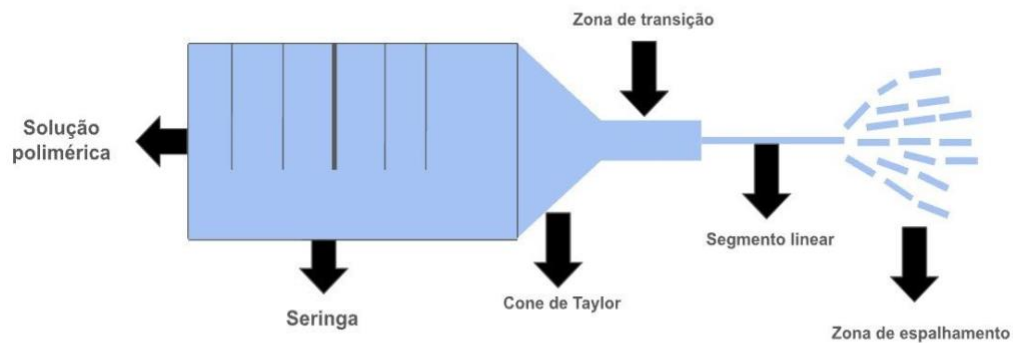
aumento de atenção está relacionado especialmente à busca por alternativas inovadoras no campo da nanotecnologia (VENTURELLI; GRIPA, 2017).

Para realizar o processo de eletrofiação, será preciso certos instrumentos, como no caso de uma seringa, uma solução polimérica, sendo acoplada a esta, uma agulha ao qual possui um diâmetro pequeno, uma fonte com alta tensão e um coletor (VENTURELLI; GRIPA, 2017).

No processo de eletrofiação (Figura 5), forma-se uma matriz fibrosa a partir de uma solução polimérica submetida a uma elevada diferença de potencial. Esse processo ocorre quando uma corrente de alta voltagem é aplicada, promovendo a formação de um jato contínuo da solução. Durante o trajeto entre a agulha e o coletor, o solvente presente na solução evapora gradualmente, enquanto o polímero é esticado devido à força do campo elétrico. Como resultado, formam-se fibras finas que se depositam sobre o coletor, originando a estrutura fibrosa desejada (VELEIRINHO et al., 2008).

Durante o processo de eletrofiação, forma-se uma estrutura conhecida como cone de Taylor (Figura 2), que surge à medida que a intensidade do campo elétrico aplicado aumenta. Esse aumento provoca a deformação da gota de solução polimérica que se encontra na ponta da agulha, inicialmente com formato hemisférico, fazendo com que ela se alongue até adquirir uma forma cônica. Quando o campo elétrico atinge um valor crítico, a força elétrica repulsiva, que atua repelindo cargas de mesmo sinal, torna-se maior do que a força de tensão superficial, que tenta manter o líquido coeso. Como resultado, um jato é ejetado da ponta do cone, dando início à formação das fibras (KWANKHAO, 2013).

Figura 2 – Cone de Taylor.



Fonte: AUTOR, 2025

2.3 Aplicações da eletrofiação

O uso da eletrofiação abre espaço para diversas possibilidades, já que os materiais envolvidos podem ser aplicados de diferentes maneiras. É possível, por exemplo, empregar um determinado polímero de forma direta, com uma função específica, ou utilizá-lo como precursor na síntese de outros materiais. Essa abordagem menos convencional tem mostrado bons resultados, como na produção de fibras cerâmicas e metálicas a partir de nanofibras poliméricas, o que evidencia o alto potencial dessa técnica em diferentes áreas (COSTA et al., 2012).

Dentre as diversas áreas de aplicação, algumas se destacam pelo uso mais expressivo da eletrofiação. É o caso da engenharia de tecidos e da área biomédica, que vêm sendo amplamente beneficiadas por essa técnica. Um dos exemplos mais promissores na produção de curativos para feridas, já que as mantas produzidas apresentam características desejáveis, como alta capacidade de absorção, porosidade

elevada, ampla área superficial. Essas propriedades contribuem para uma boa permeabilidade ao ar e excelente absorção, além de proporcionarem maior conforto durante a aplicação e remoção do curativo (PEZZIN et al., 2018).

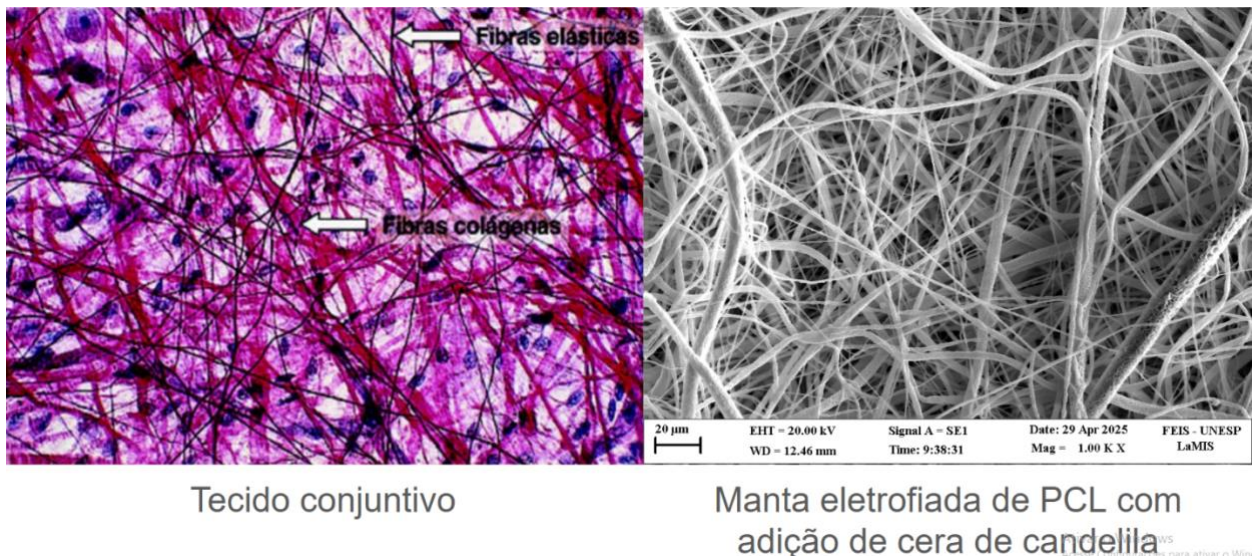
Um fator bastante relevante para o uso de mantas eletrofiadas na área da saúde é sua semelhança estrutural com a pele humana. Essa característica permite que elas imitem a matriz extracelular, oferecendo um suporte físico que favorece a regeneração dos tecidos. Esse suporte auxilia na fixação, no desenvolvimento e no crescimento das células em diferentes regiões do corpo. Devido a essas propriedades, essas mantas têm se mostrado promissoras no tratamento de diversas lesões, especialmente as queimaduras, que ainda são bastante frequentes em todo o mundo (PEZZIN et al., 2018).

A morfologia das mantas eletrofiadas, aliada às propriedades dos polímeros utilizados, é fundamental para o desenvolvimento de biomateriais eficientes. Dentre eles, a policaprolactona (PCL) se destaca pela excelente processabilidade, sendo amplamente empregada na eletrofiação. Uma das principais vantagens dessa técnica é a possibilidade de utilizar polímeros biocompatíveis e/ou biodegradáveis como a PCL, que apresenta ainda alta resistência mecânica, biodegradabilidade controlada e ótima interação celular, favorecendo processos de regeneração tecidual (DE JESUS OLIVEIRA, 2024).

A topografia das nanofibras é análoga a matriz extracelular, e essa adesão pode ser relacionada ao tecido conjuntivo (Figura 3), que contém fibras colágenas, contribuindo para a adesão e proliferação celular, além de manter a integridade estrutural (SILVA; PENNA, 2012). Além disso, as fibras elásticas conferem flexibilidade ao tecido, característica também observada em mantas eletrofiadas contendo PCL (BOHJANEN, 2017). Assim, tanto a matriz extracelular quanto o PCL eletrofiado apresentam uma porosidade significativa, que possibilita as trocas gasosas (BLACKMON et al., 2016). Dessa forma, tal característica demonstra um potencial uso em aplicações hospitalares. Conforme destacado por Vale (2005), o primeiro atendimento médico à vítima de queimadura é de extrema importância, especialmente na análise de fatores como a perda de líquidos por evaporação. Esse fator, por sua vez, pode ser atenuado devido às propriedades hidrofóbicas das mantas compostas por cera de candelila e PCL puro, as

quais apresentam potencial para reduzir a perda hídrica decorrente da destruição da barreira cutânea provocada pela queimadura.

Figura 3 – Tecido conjuntivo e manta eletrofiada através do sistema de eletrofiação.



Fonte – Junqueira & Carneiro adaptada

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver membranas de nanofibras de PCL contendo cera de candelila com potencial para uso como biomateriais.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Verificar a concentração máxima de cera de candelila que pode ser incorporada no PCL
- Analisar morfológicamente por microscopia eletrônica de varredura (MEV) quanto a possíveis defeitos na estrutura fibrilar.

- Verificar o diâmetro médio das nanofibras em resposta a adição de cera incorporada.
- Caracterizar a formação da blenda PCL/cera de candelila usando espectroscopia de infravermelho por transformada de Furier (FTIR).
- Avaliar o comportamento mecânico do material.
- Avaliação da molhabilidade através da medição do ângulo de contato utilizando o método da gota séssil.

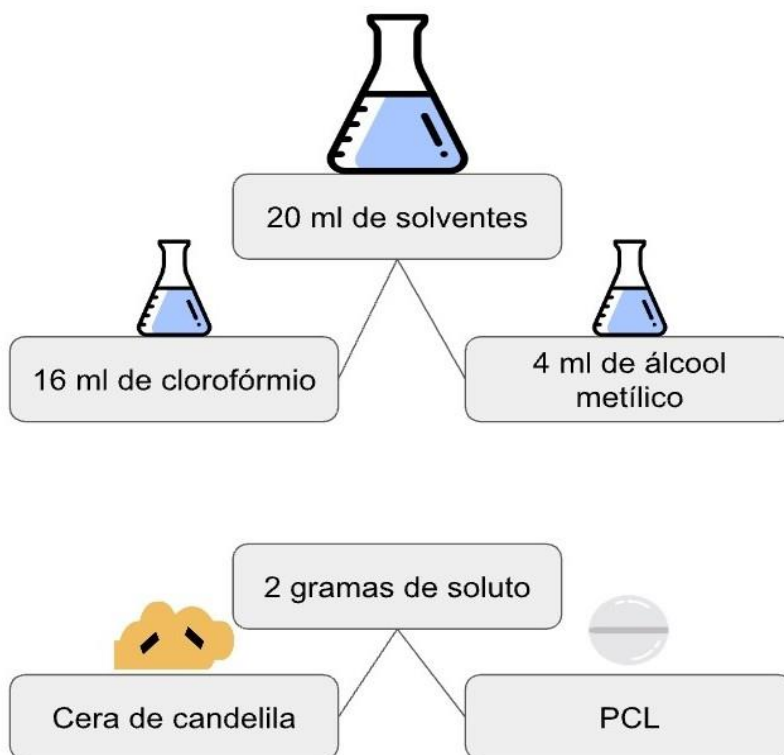
4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

- Álcool metílico P.A. (Dinâmica);
- Clorofórmio P.A. (Êxodo científica);
- Poli(ϵ -caprolactona) ou Policaprolactona (PCL) – Mw= 70000g/mol;
- Cera de candelila – Bottica Botanika (marca do produto)

4.2 Métodos

Para o preparo das soluções, foi utilizado um volume fixo de 20mL de solventes, composto por 16mL de clorofórmio e 4mL de álcool metílico, mantendo a proporção de 4:1 (COSTA; MATTOSO; FERREIRA, 2013). Para cada 20mL da solução, foram adicionados 2 gramas de solutos (Figura 4), sendo esses compostos por diferentes proporções de PCL poli(ϵ -caprolactona) e cera de candelila. As formulações variaram de modo a incluir 5%, 10%, 15%, 20% e 50% de massa de cera de candelila em relação à massa total de sólidos, o que resulta em 5 soluções de 20mL que se diferem pelas concentrações de cera e polímero (tabela 1).

Figura 4 – Componentes da solução.

Fonte: AUTOR, 2025

Tabela 1 – Massa em relação a % de cera de candelila.

Proporção PCl:Cera(%)	Massa de PCL (g)	Massa de cera (g)
95:5	1,90	0,10
90:10	1,80	0,20
85:15	1,70	0,30
80:20	1,60	0,40
50:50	1,00	1,00

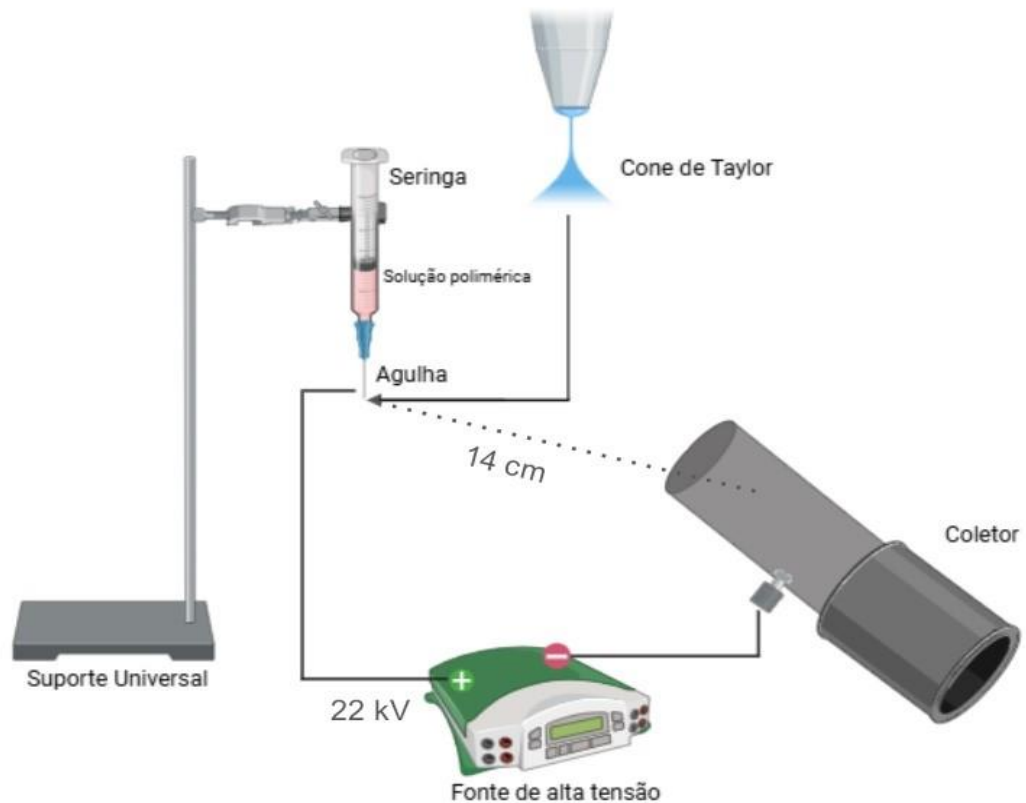
Fonte: AUTOR, 2025

4.2.1 Sistema de eletrofiação

Para o processo de eletrofiação, a primeira etapa consistiu na pesagem das cinco diferentes proporções entre PCL e cera de candelila. As massas correspondentes foram distribuídas em cinco béqueres distintos, de forma que cada composição foi acondicionada em seu respectivo recipiente.

Após a pesagem, foram adicionados a cada um dos cinco béqueres 16 ml de clorofórmio, 4 ml de metanol e um agitador magnético. Em seguida, os béqueres foram levados ao agitador magnético por aproximadamente 1 hora, até que os solutos estivessem completamente solubilizados na mistura de solventes. Durante o processo de solubilização do PCL e da cera de candelila, é preparado o sistema para a fabricação das mantas. O coletor é revestido com papel alumínio e posicionado a uma distância de 14 cm da agulha, a qual conterá a solução polimérica. Essa agulha é acoplada a um suporte universal, e todo o conjunto é disposto dentro de uma capela de exaustão. A fonte de alta tensão permanece fora da capela e seu fio terra (juntamente com o polo negativo) é conectado ao coletor, enquanto o polo positivo é ligado à agulha da seringa contendo a solução. Após a montagem do sistema, inicia-se a liberação da solução polimérica para a eletrofiação, uma vez que será liberada uma tensão de 22kV para ambas as soluções (Figura 5).

Figura 5 - Sistema de eletrofição.



Fonte: AUTOR, 2025.

4.2.2 Caracterização morfológica das mantas

Para a avaliação morfológica das mantas e análise dos diâmetros médios das fibras formadas foi utilizada a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Amostras das mantas eletrofiadas foram cuidadosamente selecionadas, revestidas com uma fina camada de ouro e fixadas em suportes próprios, sendo então inseridas em um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss, modelo EVO LS15.

A análise das fibras foi realizada com o auxílio do software TESCAN, acoplado ao equipamento, o que possibilitou a obtenção de imagens detalhadas das superfícies das

membranas. Após essa etapa, as imagens foram processadas no software *ImageJ*, utilizado para medir o diâmetro das fibras, onde se efetuaram 100 medidas por amostra. Em seguida, os valores obtidos foram organizados e tratados no programa Origin.

4.2.3 Análise por FTIR

Os grupos funcionais das amostras, conforme THANGUNPAI et al. (2021), foram identificados por meio de espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), utilizando o equipamento espectrofotômetro FT-IR Nicolet NEXUS 670. Essa técnica tem como finalidade analisar como a radiação infravermelha interage com a amostra, permitindo identificar os grupos funcionais presentes nas amostras com base na forma de absorção das energias envolvidas. No presente estudo, os dados foram analisados no modo de transmitância. Neste trabalho foi identificado os grupos funcionais presentes nas mantas de PCL puro e nas formulações contendo cera de candelila em diferentes proporções (5%, 10%, 15%, 20% e 50%). O objetivo foi observar as alterações nos espectros causadas pela incorporação da cera, tanto em relação à presença ou ausência de determinados grupos. Também foram feitas comparações entre as amostras, visando verificar se o aumento da concentração da cera resultou no surgimento de novas bandas ou em mudanças relevantes nas já existentes, indicando possíveis interações ou variações na composição química das mantas.

4.2.4 Análise da molhabilidade

Para avaliar a molhabilidade das amostras de mantas eletrofiadas, foi empregada a técnica da gota séssil utilizando um tensiômetro óptico KSV CAM-101, um medidor de ângulo de contato e tensão superficial da marca KSV Instrumenta Ltd, sendo utilizado no laboratório de caracterização, situado no Departamento de Física e Química. Essa metodologia permite a medição do ângulo de contato entre uma gota de líquido e a superfície sólida da manta. A partir desse ângulo, é possível determinar a afinidade da superfície com a água. Caso o ângulo de contato seja inferior a 90°, a superfície é considerada hidrofílica, indicando boa capacidade de espalhamento do líquido. Por outro

lado, valores superiores a 90° caracterizam a manta como hidrofóbica, evidenciando baixa afinidade com a água (BRISALORI, 2008).

4.2.5 Ensaio mecânico

O ensaio de tração é um método utilizado para determinar a resistência de um material quando submetido a forças de tração. Por meio desse teste, é possível evidenciar as propriedades mecânicas do material que será empregado em um determinado projeto (AZEVEDO et al., 2023). Para a realização do teste, foi utilizado um sistema universal de ensaio INSTRON, sendo um modelo de coluna dupla.

Foram analisadas quatro amostras com diferentes concentrações de candelila 5%, 10%, 15% e 20% e a amostra de PCL puro. As análises foram realizadas em 5 corpos de prova para cada concentração. A amostra com 50% de cera não pôde ser submetida ao ensaio, pois essa concentração não era maleável. Foi produzida uma curva de tensão x deformação para as amostras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

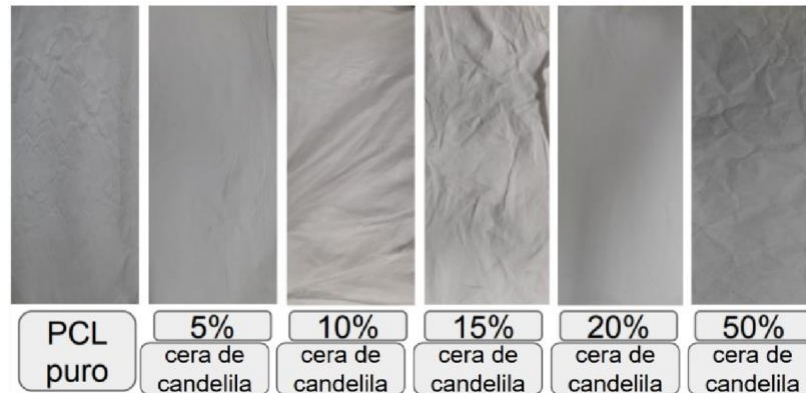
5.1 Mantas eletrofiadas

Na Figura 6, é possível observar as seis mantas obtidas por meio do processo de eletrofiação, tanto de PCL puro quanto das misturas de PCL com diferentes concentrações de cera de candelila. Em trabalhos anteriores com estruturas de filmes, a concentração de cera de candelila também demonstrou influência direta nas propriedades mecânicas, provocando alterações significativas em todos os parâmetros de tração avaliados, como observado por Kowalczyk e Baraniak (2014).

As modificações em decorrência da concentração de cera de candelila se reflete não apenas nas propriedades mecânicas, mas também nas propriedades superficiais, como evidenciado pelo teste de ângulo de contato (Figura 10). A maioria das membranas apresentou caráter hidrofóbico, comportamento compatível com o uso de materiais

similares em aplicações como revestimentos repelentes à água, conforme descrito na literatura (WANG; ZHAO, 2021).

Figura 6 – Foto digital das membranas eletrofiadas de PCL puro e PCL com as concentrações de cera de candelila.



Fonte: AUTOR, 2025

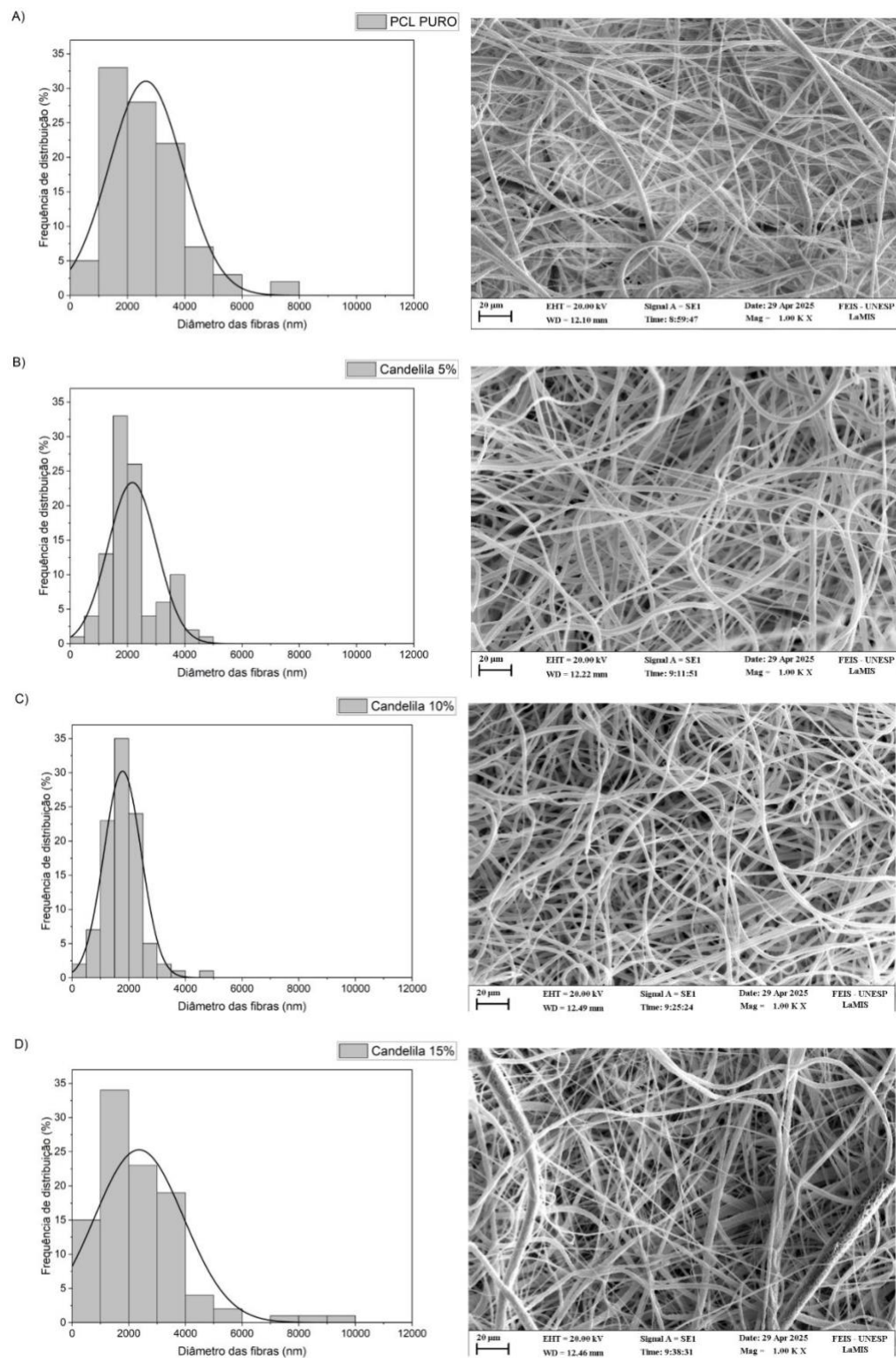
5.2 Caracterização morfológica e medida dos diâmetros médios das fibras

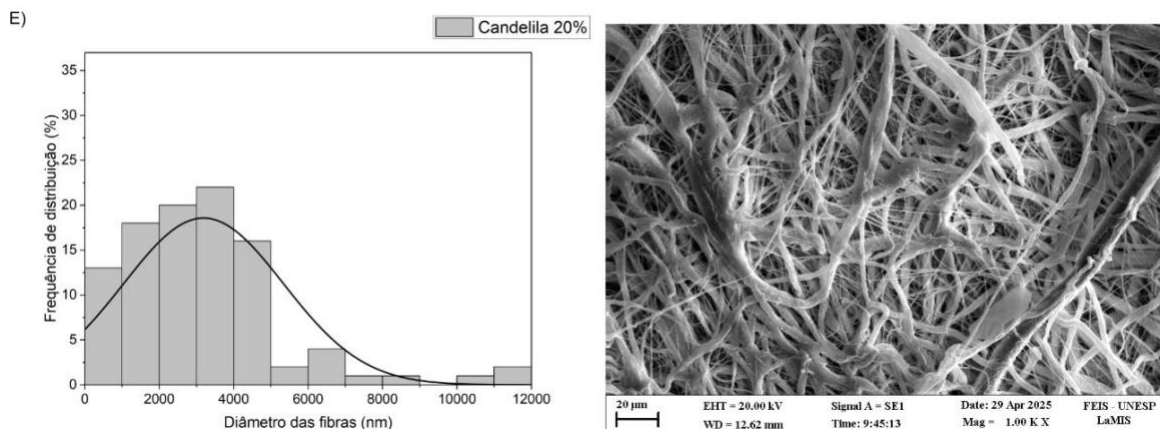
As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura permitiram observar as fibras em detalhe e serviram de base para a medição dos seus diâmetros médios. A análise revelou variações significativas entre as amostras, com valores médios de 2647, 2168, 1794, 2363, 3203 e 1338 nanômetros para o PCL puro e para as concentrações de 5%, 10%, 15%, 20% e 50% de cera de candelila, respectivamente (Figura 7). Na figura 7 é possível visualizar os histogramas de distribuição dos diâmetros das fibras correspondentes as amostras analisadas. Também é apresentada a microscopia eletrônica de varredura da amostra contendo metade de cera de candelila e metade de PCL (Figura 8).

Em relação aos resultados obtidos por MEV, observou-se que as amostras com 5%, 10% e 15% de cera de candelila apresentaram boa consistência estrutural. Por outro lado, as amostras com 20% e 50% mostraram deformações, como efeito gota e presença de interconexões entre as fibras. A utilização da eletrofiação, associada à análise morfológica

por MEV, é amplamente empregada na caracterização estrutural dessas membranas, sendo praticamente indispensável nesse tipo de estudo. Esse procedimento também foi adotado por Alves (2021), em pesquisa com matrizes híbridas poliméricas.

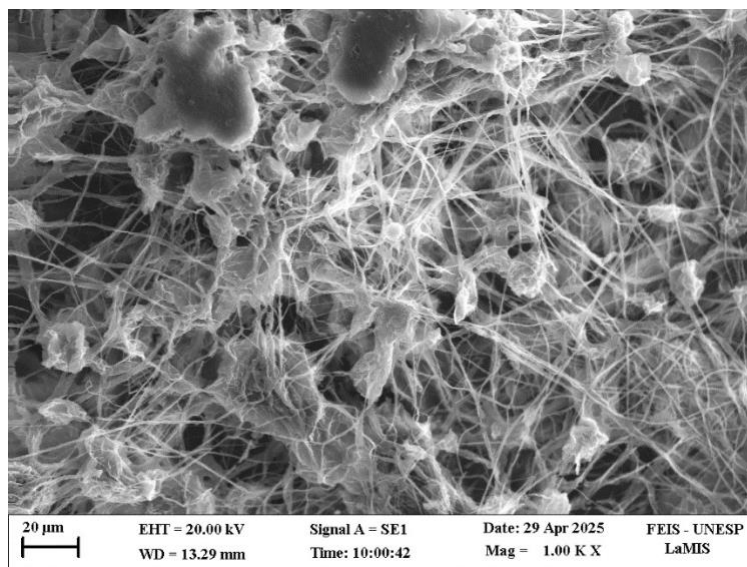
Figura 7 – Distribuição dos diâmetros das fibras para as formulações de PCL puro, seguido de PCL com 5%, 10%, 15% e 20% de cera de candelila.





Fonte: AUTOR, 2025

Figura 8 – Microscopia eletrônica de varredura do PCL contendo 50% de cera de candelila.



Fonte: AUTOR, 2025

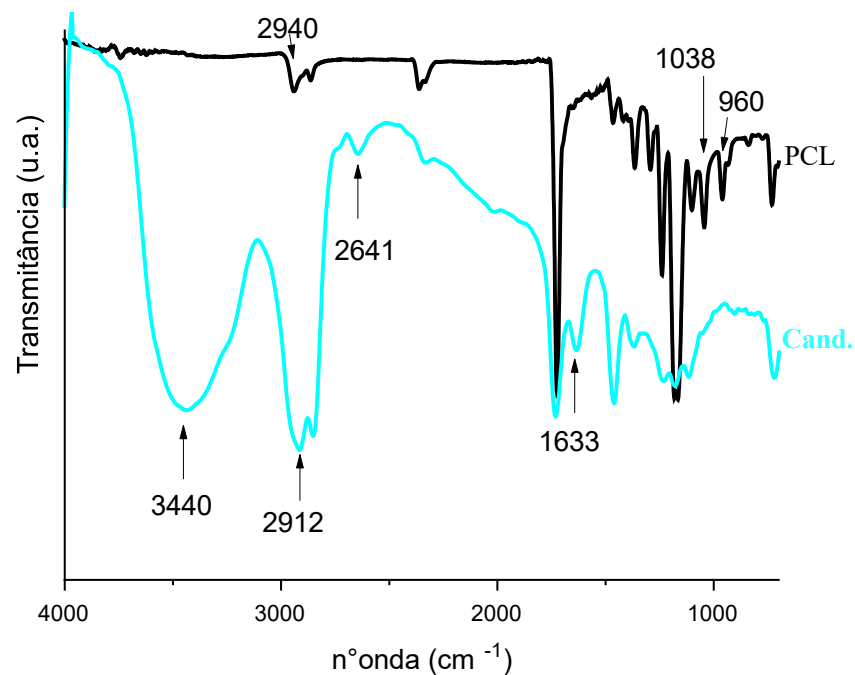
5.3 Análise por FTIR

No que se refere aos resultados obtidos para o PCL puro, durante a análise de FTIR em modo de transmitância, observaram-se picos em 2940 cm^{-1} e 2912 cm^{-1} (Figura 9), correspondentes às vibrações de estiramento do grupo C–H₂. Além disso, foi identificado um pico intenso em 1724 cm^{-1} , atribuído à vibração de estiramento da ligação C=O

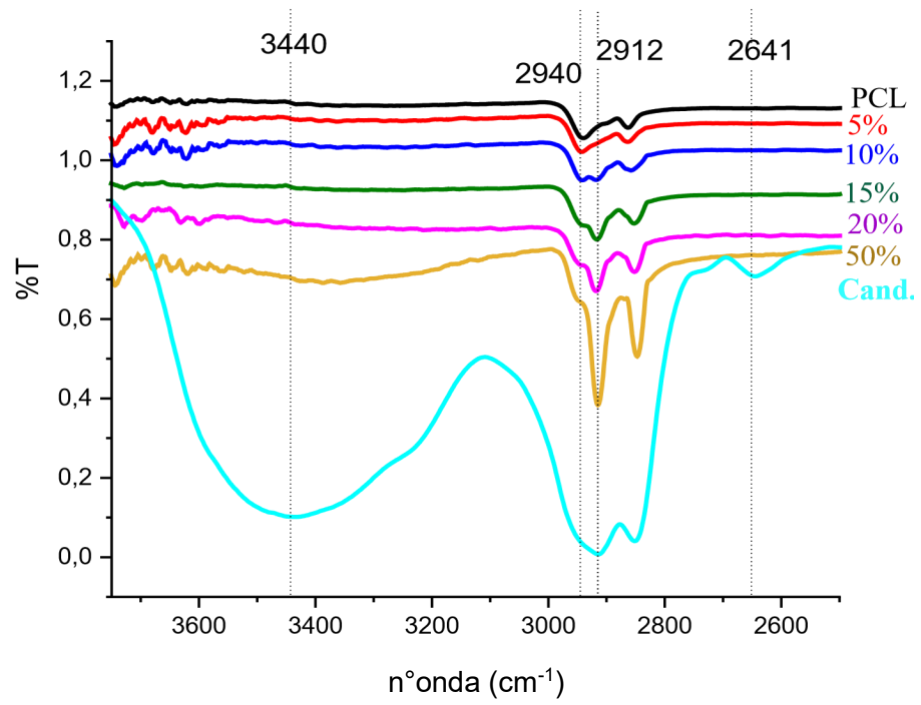
(carbonila), e um pico adicional em 1172 cm^{-1} , característico do grupo C–O–C (éster). Esses valores apresentaram-se bastante próximos aos observados por Thangunpai et al. (2021), que relataram picos em 2950 cm^{-1} e 2869 cm^{-1} para o grupo CH_2 , 1730 cm^{-1} para C=O e 1179 cm^{-1} para C–O–C.

Figura 9 – Gráfico de FTIR das amostras a) candelila e PCL puro eletrofiado, b) PCL puro eletrofiado e amostras eletrofiadas de PCL contendo 5,10,15,20,50% candelila e candelila pura com eixo x de 3.750 a 2.600 cm^{-1} b) 2.000 a 700 cm^{-1} .

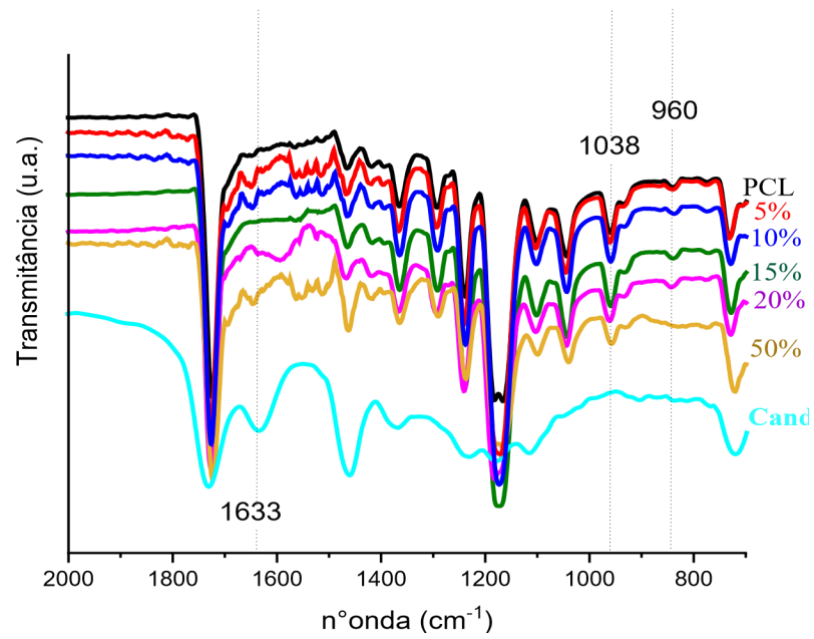
a)



b)



c)

**Fonte:** AUTOR, 2025

Na figura 9a é possível visualizar as bandas de absorção no infravermelho que diferem o PCL da candelila, as mais evidentes são: 3440, 2940, 2912, 2641, 1633, 1038 e 960 cm^{-1} . Ao analisar os espectros de infravermelho das amostras (8b e 8c), observa-se que a banda em torno de 1720 cm^{-1} , atribuída ao estiramento da ligação C=O (carbonila) dos grupos éster presentes no PCL, permanecendo praticamente inalterada mesmo com a adição crescente de cera de candelila. Esse comportamento sugere que o PCL continua como fase majoritária na blenda, e que sua estrutura química não sofreu modificações significativas com a incorporação da cera, sendo mantido o caráter estrutural original do polímero.

Em contrapartida, a banda localizada em 3440 cm^{-1} apresenta aumento progressivo de intensidade conforme a concentração de cera de candelila aumenta. A banda em 3440 cm^{-1} está relacionada ao estiramento de grupos hidroxila livres ($-\text{OH}$) da cera de candelila, enquanto a de 1038 cm^{-1} , tem uma diminuição progressiva com o aumento da concentração de cera de candelila, esta é associada às vibrações de ligações C–O, características do PCL. Esses resultados estão de acordo com dados da literatura, que apontam essas bandas como típicas da cera de candelila extraída por métodos convencionais. O crescimento dessas bandas nas blends indica que a cera foi efetivamente incorporada à matriz polimérica, embora sem formação de novas bandas, o que reforça a hipótese de uma interação do tipo físico (não covalente) entre os componentes, sem evidência de reações químicas entre os grupos funcionais (NÚÑEZGARCÍA et al., 2022).

As bandas em 2940 cm^{-1} e 2912 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento das ligações C–H dos grupos metila e metileno permanecem dominantes, sendo a banda em 2940 cm^{-1} característica da cadeia do PCL e a 2912 cm^{-1} , sendo característica da candelila. Assim, suas intensidades podem ser utilizadas como marcadores espectroscópicos da fração relativa de PCL na blenda, uma vez que a candelila apresenta menor contribuição nessas regiões espectrais (NÚÑEZ-GARCÍA et al., 2022).

Por fim, a banda em 960 cm^{-1} , correspondente ao movimento angular (rocking) dos grupos CH_2 , demonstra redução ou suavização com o aumento da fração de cera (BUCIO et al., 2021).

Segundo estudos prévios com misturas de ceras e polímeros semicristalinos, esse comportamento pode estar relacionado a alterações na cristalinidade do PCL, decorrentes da presença da fase cerosa. A introdução da cera pode atuar como agente interferente no empacotamento das cadeias do polímero, favorecendo uma reorganização molecular menos ordenada, o que afeta diretamente as propriedades térmicas e mecânicas da blenda (ELZEIN et al., 2004).

5.4 Média do ângulo de contato

Na Figura 10, observa-se a variação do ângulo de contato, evidenciada pela análise da gota séssil, em função da presença e da concentração de cera de candelila nas formulações com PCL. Os resultados indicam que a cera de candelila se comporta predominantemente como um material hidrofóbico, uma vez que, das seis composições analisadas, apenas uma apresentou caráter mais hidrofílico. Como evidenciado por Hernández (2018) que designou a cera de candelila como um material de caráter hidrofóbico.

A média do ângulo de contato foi obtida a partir da análise de três imagens de três gotas distintas, para cada porcentagem de cera testada. Os valores médios encontrados foram: $87,39 (2,97)^\circ$ para a amostra com 5% de cera de candelila, $115,40 (2,47)^\circ$ para 10%, $133,24 (0,21)^\circ$ para 15%, $126,50 (6,54)^\circ$ para 20%, $125,67 (5,27)^\circ$ para 50% e $117,77 (2,72)^\circ$ para o PCL puro.

A formulação com 15% de cera de candelila apresentou o maior valor de ângulo de contato, indicando o mais elevado grau de hidrofobicidade entre as amostras. Por outro lado, a amostra com 5% de cera foi a única a apresentar caráter hidrofílico (ângulo inferior a 90°), embora muito próximo do limiar da hidrofobicidade, com $87,39 \pm 2,97^\circ$.

O ângulo de contato do PCL puro ($117,77 \pm 2,72^\circ$) confirma seu caráter hidrofóbico, e o aumento dos valores médios nas formulações com 15% ($133,24 \pm 0,21^\circ$), 20% ($126,50 \pm 6,54^\circ$) e 50% ($125,67 \pm 5,27^\circ$) de cera reforça o comportamento hidrofóbico do material, conforme também observado por Hernández (2018).

Para aplicações como cosméticos a hidrofobicidade da cera de candelila é desejada uma vez que impede a evaporação de líquidos da pele, reduz perda de água transepidérmica (TEWL) e mantém a hidratação (GALUS et al., 2020). No caso de curativos utilizados no tratamento de queimaduras, essa propriedade também é desejável, pois a falência orgânica em queimaduras de grande extensão geralmente está relacionada à perda excessiva de líquidos corporais por desidratação. Uma vez que a cera de candelila é utilizada no reparo da barreira cutânea e em formulações voltadas para a redução da perda de água transepidérmica (TEWL), contribuindo significativamente para a restauração e manutenção da função de barreira da pele (DRAELOS, 2018).

Figura 10 – Média do ângulo de contato.

Amostra	Ângulo de contato	Imagem	Amostra	Ângulo de contato	Imagem
Candelila 5%	$87,39 \pm 2,97$		Candelila 15%	$133,24 \pm 0,21$	
Candelila 10%	$115,40 \pm 2,47$		Candelila 20%	$126,50 \pm 6,54$	
Candelila 50%	$125,67 \pm 5,27$		PCL puro	$117,77 \pm 2,72$	

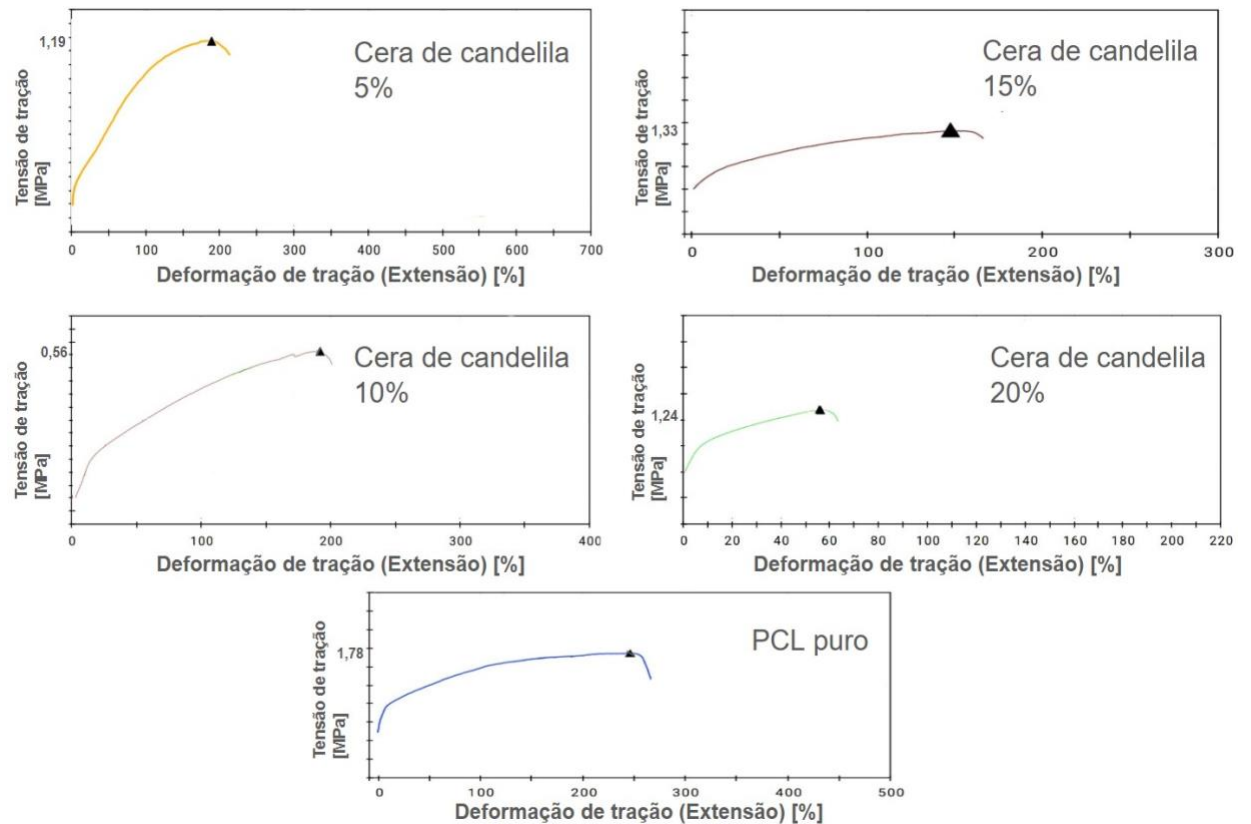
Fonte: AUTOR, 2025

5.5 Ensaio mecânico

De acordo com Azevedo et al. (2023), a deformação apresentada no gráfico da análise corresponde ao alongamento, medido em milímetros, ao qual os corpos de prova

são submetidos durante o ensaio na máquina universal de ensaios sendo essa relação entre tensão e deformação ilustrada na Figura 11, com os respectivos valores organizados na Tabela 2.

Figura 11 – Gráfico de tensão x deformação.



Fonte: AUTOR, 2025

Tabela 2 – Resultados de tensão máxima de tração (Mpa) e deformação máxima (%) das mantas eletrofiadas PCL/Candelila.

Amostras	Tensão de tração [MPa]	Deformação por tração (alongamento) [%]
PCL	1,78	258,72
PCL/C5%	1,19	183,34
PCL/C10%	0,56	187,51
PCL/C15%	1,33	157,17
PCL/C20%	1,24	59,10

Fonte: AUTOR, 2025

Em relação à tensão máxima, o PCL puro registrou o maior valor, de 1,78 MPa, seguido pela cera de candelila a 15%, com 1,33 MPa, o que demonstra uma diferença relevante entre os dois melhores resultados. Além disso, no que diz respeito ao maior valor de deformação na tensão máxima, o PCL puro novamente se destacou, atingindo 258,72%, seguido pela cera de candelila a 10%, com 187,51%, revelando mais uma vez uma diferença significativa entre os dois maiores valores.

Quanto aos menores valores em cada critério, a cera de candelila a 10% apresentou a menor tensão máxima, de 0,56 MPa, enquanto a cera de candelila a 20% teve a menor deformação na tensão máxima, com 59,10%. Esse resultado pode estar relacionado à alta concentração de cera de candelila, que influencia na formação da manta, fator que, inclusive, impediu a realização do teste com 50% de cera, devido à inviabilidade da membrana para ser usada como corpo de prova.

Dessa forma foi visto que a adição de cera de candelila diminuiu o desempenho mecânico das amostras, porém todos os valores observados incluindo para a amostra de 20% foram acima de 1 Mpa e também acima de 50% de elasticidade, conferindo a este material maleabilidade necessária para aplicação como curativo.

Esses resultados indicam que a incorporação da cera de candelila ao PCL pode ser uma estratégia eficaz para ajustar propriedades específicas das membranas, como hidrofobicidade, maleabilidade e adesividade, de acordo com a concentração utilizada.

6. CONCLUSÃO

A integração de policaprolactona (PCL) e cera de candelila em membranas nanofibrilares obtidas por eletrofiação revelou-se uma estratégia promissora no desenvolvimento de biomateriais voltados para o tratamento de queimaduras. O estudo demonstrou a compatibilidade química entre os dois componentes e a viabilidade do processo de eletrofiação, resultando em fibras contínuas com diâmetros submicrométricos e elevada porosidade, características que são análogas à matriz extracelular da pele. Essa morfologia é benéfica para o processo de regeneração tecidual.

A adição graduada de cera de candelila promoveu um aumento da hidrofobicidade das membranas, o que pode favorecer a retenção de umidade em lesões térmicas, contribuindo para a manutenção do ambiente úmido ideal à cicatrização. Apesar da redução na resistência mecânica com o aumento da cera, todas as formulações apresentaram tensão de ruptura superior a 1 MPa e alongamento acima de 50%, valores adequados para a aplicação em curativos flexíveis.

Tanto a PCL quanto a cera de candelila já são utilizadas em dispositivos médicos, com reconhecida segurança por órgãos regulatórios como FDA e ANVISA, o que fortalece o potencial de aplicação clínica das formulações desenvolvidas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARADO, Christian Javier Cabello et al. Cera de Candelilla y sus aplicaciones. **Avances em química**, v. 8, n. 2, p. 105-110, 2013.

ASCACIO-VALDÉS, Juan et al. Antifungal ellagitannin isolated from *Euphorbia antisiphilitica* Zucc. **Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine**, v. 3, n. 1, p. 4146, 2013.

BLACKMON, Richard L. et al. Imaging extracellular matrix remodeling in vitro by diffusion-sensitive optical coherence tomography. **Biophysical journal**, v. 110, n. 8, p. 1858-1868, 2016.

BLAKE, Alexia I.; TORO-VAZQUEZ, Jorge F.; HWANG, Hong-Sik. Wax oleogels. In: **Edible oleogels**. AOCS Press, 2018. P. 133-171.

BOHJANEN, Kimberly. Estrutura e funções da pele. **Dermatologia Clínica. Seção I Bases para diagnóstico e tratamento**, 2017.

BUCIO, Adolfo et al. Characterization of beeswax, candelilla wax and paraffin wax for coating cheeses. **Coatings**, v. 11, n. 3, p. 261, 2021.

COSTA, Ligia Maria Manzine; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; FERREIRA, Mariselma. Electrospinning of PCL/natural rubber blends. **Journal of materials science**, v. 48, p. 8501-8508, 2013.

COSTA, Rodrigo GF et al. Eletrofiação de polímeros em solução: parte II: aplicações e perspectivas. **Polímeros**, v. 22, p. 178-185, 2012.

DE AZEVEDO, Cyro Martins Passos et al. Ensaio Mecânico de Tensão-Deformação sob Tração: Um Estudo Integrado com a disciplina de cálculo. **Exatas & Engenharias**, v. 6, n. 15, 2016.

OLIVEIRA, M. J. de J. et al. Preparação de membranas de PCL/HA produzidas por eletrofiação. **Anuário de Resumos Expandidos do IX SAPCT - SENAI CIMATEC [online]**, Salvador, v. 1, p. 1–10, 2024. ISSN 0805-2010.

DRAELOS, Zoe Diana. New treatments for restoring impaired epidermal barrier permeability: skin barrier repair creams. **Clinics in dermatology**, v. 30, n. 3, p. 345348, 2012.

EKAKITIE, E. Euphorbia cerifera cera (candelila) emollient properties, uses and effectiveness in skincare products. **Journal of Knowledge Learning and Science Technology ISSN: 2959-6386 (online)**, v. 3, n. 3, p. 225-234, 2024.

ELZEIN, Tamara et al. FTIR study of polycaprolactone chain organization at interfaces. **Journal of colloid and interface science**, v. 273, n. 2, p. 381-387, 2004.

ESPINAL HERNÁNDEZ, P. Respuestas poscosecha de frutos de pitaya (*Stenocereus griseus* H.), con y sin espinas a tratamientos con 1-MCP y recubrimiento de quitosano. 2018. 94 f. Tesis (Maestría) – Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 2018.

GALUS, Sabina et al. Effects of candelilla and carnauba wax incorporation on the functional properties of edible sodium caseinate films. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 24, p. 9349, 2020.

GARCÍA-BETANZOS, Claudia I. et al. Study of Candelilla Wax Concentrations on the Physical Properties of Edible Nanocoatings as a Function of Support Polysaccharides. **Polymers**, v. 15, n. 5, p. 1209, 2023.

JUNQUEIRA CARNEIRO, UCHOA, C.; Histologia basica: texto, atlas. **Rio De Janeiro (Rj): Guanabara Koogan**, 2008.

KWANKHAO, Bintasan. **Microfiltration membranes via electrospinning of polyethersulfone solutions**. 2013. Tese de Doutorado. Duisburg, Essen, 2013.

NÚÑEZ-GARCÍA, Itzel C. et al. Candelilla wax extracted by traditional method and an ecofriendly process: assessment of its chemical, structural and thermal properties. **Molecules**, v. 27, n. 12, p. 3735, 2022.

OLIVER, George; KENZIE, Florence. Euphorbia Cerifera and Candelilla Wax: Natural Emollients with Moisturizing Effects and Skin Barrier Protection in Skincare Products. 2024.

PEZZIN, Sérgio Henrique et al. Preparation of PHB membranes by electrospinning and characterization for tissue engineering applications. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. e12218, 2018.

ROJAS MOLINA, Romeo et al. Pasado, presente y futuro de la candelilla. **Revista mexicana de ciencias forestales**, v. 2, n. 6, p. 7-18, 2011.

MÉXICO, Distrito Federal; TAMARGO, José Luis Luege. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. **Instituto de Ecología. Consejo Civil Mexicano para la Silvicultura Sostenible AC**. 2008. 107 p. Disponível em: http://www.semarnat.gob.mx/informacionambiental/publicaciones/Publicaciones/Manual_Clima%20%C3%81rido.pdf. Acesso em: 4 mar. 2025.

DA SILVA, Tatiane Ferreira; PENNA, Ana Lúcia Barretto. Colágeno: Características químicas e propriedades funcionais. **Revista do Instituto Adolfo Lutz**, v. 71, n. 3, p. 530-539, 2012.

SISLIOGLU, Kubra et al. In vitro digestion of edible nanostructured lipid carriers: Impact of a Candelilla wax gelator on performance. **Food Research International**, v. 140, p. 110060, 2021.

THANGUNPAI, Kotchaporn et al. Thermal stability of polycaprolactone grafted densely with maleic anhydride analysed using the coats–redfern equation. **Polymers**, v. 14, n. 19, p. 4100, 2022.

VALE, Everton Carlos Siviero do. Primeiro atendimento em queimaduras: a abordagem do dermatologista. **Anais Brasileiros de Dermatologia**, v. 80, p. 9-19, 2005.

VELEIRINHO, Beatriz; LOPES-DA-SILVA, J. A. Application of electrospun poly (ethylene terephthalate) nanofiber mat to apple juice clarification. **Process Biochemistry**, v. 44, n. 3, p. 353-356, 2009.

VENTURELLI, Rafaela Bohaczuk; GRIPA, Sidnei. Eletrofiação: uma alternativa para a produção de nãotecidos. **Revista da UNIFEBE**, v. 1, n. 22, p. 150-165, 2017.