

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais



Dissertação

Síntese e caracterização de fibras de zeína produzidas via rotofiação

Darwin de Oliveira Brum

Pelotas, 2023

Darwin de Oliveira Brum

Síntese e caracterização de fibras de zeína produzidas via rotofiação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof. Dr. Cristiane Wienke Raubach
Coorientador: Prof. Dr. Neftali Lenin Villarreal Carreno

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

B893s Brum, Darwin de Oliveira

Síntese e caracterização de fibras de zeína produzidas via rotofiação [recurso eletrônico] / Darwin de Oliveira Brum ; Cristiane Wienke Raubach, orientadora ; Neftali Lenin Villareal Carreño, coorientadora. — Pelotas, 2023.

58 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Fibras. 2. Bioplásticos. 3. Zeína. 4. Rotofiação. 5. Polímeros. I. Raubach, Cristiane Wienke, orient. II. Carreño, Neftali Lenin Villareal, coorient. III. Título.

CDD 620.11063

Darwin de Oliveira Brum

Síntese e caracterização de fibras de zeína produzidas via rotofiação

Dissertação aprovada, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 30 de novembro de 2023

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cristiane Wienke Raubach (orientadora)
Doutora em Química pela Universidade Federal de São Carlos.

Prof. Dr. Neftali Lenin Villarreal Carreno (coorientador)
Doutor em Química pela Universidade Federal de São Carlos.

Prof. Dr. Washington Luiz Esteves Magalhães
Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Leonardo Simon
Doutor em Ciência dos Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. André Luiz Missio (suplente)
Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria.

A excelência deve ser buscada – deve ser conquistada com todas as forças e todos os esforços que temos. Cada dia há um novo encontro. Cada semana há um novo desafio. Todo o barulho e todo o prestígio, todas as cores e toda a animação, todos os anéis e todo o dinheiro: essas são as coisas que só permanecem na memória. Mas o espírito – a vontade de se destacar; a vontade de vencer, essas são as coisas que perduram.

— VINCE LOMBARDI

RESUMO

BRUM, Darwin de Oliveira. **Síntese e caracterização de fibras de zeína produzidas via rotofiação**. Orientadora: Cristiane Wienke Raubach. 2023. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

O acúmulo de plásticos no meio-ambiente representa um dos maiores desafios contemporâneos, ameaçando diretamente não só a natureza, mas também a saúde humana. Ações globais de curto prazo visam estimular o reuso dos plásticos, enquanto medidas de longo prazo buscam a gradual substituição desses materiais por alternativas naturais. Nesse contexto, a zeína, uma proteína do endosperma do milho, surge como um promissor substituto para os plásticos sintéticos, sendo segura para consumo, biodegradável e proveniente de fonte renovável. Quando processada no formato de fibras, a zeína revela características únicas, tornando-se uma opção promissora para aplicações de complexidade variada. O método de rotofiação, uma técnica eficiente e recente, destaca-se ao permitir a produção de fibras de maneira simples, rápida e em larga escala. Assim, no presente estudo, foram desenvolvidas fibras de zeína via rotofiação, visando avaliar o potencial desse método para transformar a zeína em um material funcional para a engenharia. A viscosidade da solução polimérica de zeína foi medida, visando determinar seu comportamento reológico de acordo com a variação da concentração do polímero. As fibras resultantes foram caracterizadas por diversas técnicas, incluindo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Ângulo de Contato e testes para avaliar sua propriedade antioxidante. Os resultados indicaram que o processamento da zeína por meio da rotofiação foi eficaz, resultando em fibras hidrofílicas com diâmetros em escala micrométrica e com propriedades antioxidantes. Não foi observada diferença significativa no diâmetro entre as amostras produzidas com diferentes parâmetros de concentração de zeína na solução e velocidade de rotação. Por fim, esta pesquisa abre caminho para futuros estudos explorando a aplicação dessas fibras na fabricação de bioplásticos.

Palavras-chave: Bioplásticos. Fibras. Zeína. Rotofiação.

ABSTRACT

BRUM, Darwin de Oliveira. **Synthesis and characterization of centrifugally spun zein fibers**. Advisor: Cristiane Wienke Raubach. 2023. 58 f. Dissertation (Masters in Materials Science and Engineering) – Technology Development Center, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

The accumulation of plastics in the environment represents one of the biggest contemporary challenges, directly threatening not only nature, but also human health. Short-term global initiatives aim to promote plastic reuse, while long-term measures seek the gradual replacement of these materials with natural alternatives. In this context, zein, a protein derived from corn endosperm, emerges as a promising substitute for synthetic plastics, being considered safe for consumption, biodegradable, and sourced from renewable origins. Processed into fibers, zein exhibits unique characteristics, making it a promising option for applications of varying complexity. The centrifugal spinning method, an efficient and recent technique, stands out for enabling the simple, rapid, and large-scale production of zein fibers. Thus, in this study, zein fibers were developed via centrifugal spinning to assess the potential of this method in transforming zein into a functional material for engineering. The viscosity of the zein polymeric solution was measured, in order to determine its rheological behavior according to the variation in polymer concentration. The resulting fibers were characterized by several techniques, including Scanning Electron Microscopy (SEM), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Contact Angle and tests to evaluate their antioxidant properties. The results indicated that the processing of zein through centrifugal spinning was effective, resulting in hydrophilic fibers with micrometer-scale diameters and antioxidant properties. No significant difference in diameter was observed between samples produced with different parameters of zein concentration in the solution and rotation speed. Finally, this research paves the way for future studies exploring the application of these fibers in the manufacture of bioplastics.

Keywords: Bioplastics. Fibers. Zein. Centrifugal spinning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Volume anual da produção de plásticos	16
Figura 2	Código de identificação dos plásticos, estrutura molecular e ilustração de produtos comuns.	17
Figura 3	Estrutura α -hélice de uma proteína.	22
Figura 4	Proposta de modelo estrutural da α -zeína.	22
Figura 5	Ilustração do processo de eletrofiação	25
Figura 6	Ilustração do processo de fiação por sopro de fundido.	26
Figura 7	Ilustração do equipamento de rotofiação.	27
Figura 8	Ejeção por força centrífuga: (a) solução no bico ejetor; (b) solução em formato cônico; (c) gotícula na extremidade; (d) empescoamento por tração; (e) jato oscilante; (f) jato estabilizado.	28
Figura 9	Ilustração da metodologia utilizada na fabricação das fibras de zeína.	31
Figura 10	Fibras produzidas com concentrações de (a) 37,5%, (b) 40%, (c) 42.5% e (d) 45% de zeína e velocidade de rotação de 10.000 RPM.	34
Figura 11	Viscosidade a solução em função da concentração de zeína.	35
Figura 12	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 1 (40% de zeína, 6000 RPM).	36
Figura 13	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 2 (40% de zeína, 8000 RPM).	36
Figura 14	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 3 (40% de zeína, 10000 RPM).	37
Figura 15	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 4 (37.5% de zeína, 10000 RPM).	37
Figura 16	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 5 (42.5% de zeína, 10000 RPM).	37
Figura 17	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 6 (45% de zeína, 10000 RPM).	37
Figura 18	Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 7 (40% de zeína, 12000 RPM).	38
Figura 19	Histogramas dos diâmetros das fibras, entre 0 e 9000 nm; a) amostra 1 (40% de zeína, 6.000 RPM); b) amostra 2 (40% de zeína, 8.000 RPM); c) amostra 3 (40% de zeína, 10.000 RPM); d) amostra 4 (37.5% de zeína, 10.000 RPM); e) amostra 5 (42.5% de zeína, 10.000 RPM); f) amostra 6 (45% de zeína, 10.000 RPM); g) amostra 7 (40% de zeína, 12.000 RPM).	39

Figura 20	Espectrograma das fibras de zeína (amostra 3), na região de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , destacando a presença dos grupos funcionais característicos da proteína.	40
Figura 21	Teste de molhabilidade das fibras de zeína (amostra 3) no intervalo de 3 segundos.	42
Figura 22	Porcentagem de inibição dos radicais ABTS e DPPH.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Propriedades físico-químicas da zeína.	23
Tabela 2	Conjunto de dados completo dos parâmetros e diâmetro médio das fibras resultantes para cada amostra.	36
Tabela 3	Variação do Ângulo de Contato ao longo do tempo.	41
Tabela 4	Relação entre os parâmetros de processamento e a massa das fibras obtidas.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo geral	14
2.2	Objetivos específicos	14
3	REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1	Produção e consumo de plásticos	15
3.1.1	Composição e propriedades dos plásticos	16
3.2	Biopolímeros	19
3.2.1	Fibras poliméricas	20
3.2.2	Zeína	21
3.3	Técnicas de obtenção de fibras	24
3.3.1	Eletrofiação	24
3.3.2	Fiação por sopro de fundido	25
3.3.3	Rotofiação	26
3.3.4	Comparativo entre técnicas de fabricação de fibras	28
4	METODOLOGIA	30
4.1	Fabricação das fibras de zeína	30
4.2	Técnicas para a caracterização de fibras	31
4.2.1	Comportamento reológico	31
4.2.2	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	31
4.2.3	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	32
4.2.4	Ângulo de Contato	32
4.2.5	Propriedade antioxidante	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	Viscosidade da solução	35
5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	35
5.3	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	39
5.4	Ângulo de Contato Aparente	40
5.5	Propriedade antioxidante	42
6	CONCLUSÃO	44
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	45
	REFERÊNCIAS	46

APÊNDICE A CRITÉRIO DE SELEÇÃO DA AMOSTRA A SER CARACTERI-
ZADA 58

1 INTRODUÇÃO

Cada vez mais efeitos detrimenais da disseminação dos plásticos têm sido descobertos por estudos, destacando a urgência em reduzir a produção desses materiais (SAMIR et al., 2022; MUJTABA et al., 2019). Visando preservar a saúde humana e o meio ambiente, e romper com a dependência de recursos não-renováveis, a busca por substitutivos sustentáveis aos plásticos tornou-se um dos principais focos de pesquisa. Materiais biodegradáveis e de origem renovável, provenientes de fontes naturais como plantas, animais, fungos e bactérias, são apontados como opções promissoras para substituir os polímeros sintéticos (GOBI et al., 2021). Pesquisas com biopolímeros demonstram resultados satisfatórios em uma ampla gama de aplicações (GAO et al., 2022; KABIR et al., 2020). Uma das principais técnicas para agregar valor a materiais comuns e torná-los úteis para o desenvolvimento tecnológico envolve sua conformação ao formato de fibras (XUE et al., 2019). Fibras à base de polímeros naturais podem ser aplicadas na fabricação de embalagens, cápsulas para medicamentos de liberação controlada, sensores, entre outras áreas (KONG et al., 2023).

A zeína, proteína extraída do milho (*Zea mays*), tem despertado grande interesse na pesquisa de materiais devido à sua capacidade de ser convertida em fibras funcionais, filmes, partículas e hidrogéis (TORTORELLA et al., 2021). Ao longo do tempo, estudos têm demonstrado que a zeína é capaz de encapsular moléculas de princípios ativos, adquirindo funções especiais e tornando-se adequada para aplicações direcionadas, como embalagens bioativas, biofertilizantes e engenharia de tecidos (PÉREZ-GUZMÁN; CASTRO-MUÑOZ, 2020). Considerando que o milho é um dos grãos mais amplamente cultivados em todo o mundo, a zeína é um recurso abundante e sustentável (LIU et al., 2023; RANUM et al., 2014). Apesar dos avanços recentes em técnicas de extração de zeína que são econômicas e eficientes, a falta de aplicabilidade prática como produto tangível ainda impede sua adoção industrial, resultando em demanda limitada, produção restrita e preços elevados (JASKI et al., 2022; MATTICE; MARANGONI, 2020). Portanto, o desenvolvimento de produtos baseados na zeína oferece uma oportunidade para reduzir os custos de produção e agregar valor a um recurso abundante, diminuindo, em última instância, a pegada de carbono na produção de

plásticos (LABIB, 2018).

Diversas técnicas de fabricação, como eletrofiação, fiação por sopro de fundido e fiação por jato de ar, foram extensivamente estudadas para produzir fibras de zeína (MIYOSHI et al. 2005; LIU et al., 2016; DEFRATES et al. 2021). No entanto, o potencial da rotofiação como um método viável para a fabricação de fibras de zeína pura ainda não foi completamente elucidado. O equipamento de rotofiação consiste em um motor, um reservatório com bicos de ejeção e hastes de coleta. Neste processo, uma solução polimérica é injetada no reservatório e expelida através dos bicos, formando um jato contínuo que se solidifica ao longo do percurso (DUAN et al., 2019).

Descobertas experimentais recentes indicam que a rotofiação possui potencial para ser amplamente adotado tanto na pesquisa científica quanto nos setores industriais em um futuro próximo (ZHANG et al., 2019). Sendo assim, este estudo visa abordar esse tema, utilizando a rotofiação no processo de fabricação de fibras de zeína.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do projeto é desenvolver e caracterizar fibras de zeína através do método de rotofiação.

2.2 Objetivos específicos

- Estabelecer a dependência entre a concentração da solução de zeína, a velocidade de rotação, o diâmetro e a homogeneidade das fibras produzidas via rotofiação;
- Caracterizar as fibras obtidas quanto a composição química, hidrofiliicidade e potencial antioxidante;
- Estimar aplicações práticas para as fibras de zeína produzidas por rotofiação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Produção e consumo de plásticos

A produção e o consumo de plásticos tornaram-se profundamente enraizados na sociedade moderna, como resultado de uma convergência de fatores sociais, tecnológicos e econômicos (HEIDBREder et al., 2019). Antes do surgimento desses materiais, os polímeros utilizados na indústria eram derivados principalmente de biomassa natural, como celulose, amido e borracha (PIORKOWSKA, 2019). No entanto, após a Segunda Guerra Mundial, desenvolvimentos significativos na síntese de matérias-primas petroquímicas e avanços industriais revolucionaram a produção de plásticos sintéticos, levando à sua produção em massa (GAUR et al., 2023). Essa mudança não apenas resultou em uma redução significativamente dos seus custos de produção, mas também fez desses materiais adaptáveis para inúmeras aplicações, tornando-os atraentes para fabricantes e consumidores (PATHAK; NICTER, 2019). Como resultado, os plásticos encontraram ampla integração em diversas indústrias, como embalagens, construção, eletrônica, automotiva e médica, tornando-se onipresentes na vida diária (HELLER; MAZOR; KEOLEIAN, 2020).

Ao longo da história, a origem dos primeiros materiais plásticos se deu como resposta à necessidade de solucionar desafios relacionados à escassez de materiais convencionais. No século XIX, o cientista inglês Alexander Parkes desenvolveu a nitrocelulose, polímero derivado da celulose, que foi introduzida ao mercado nas décadas posteriores como substitutivo do marfim. Ainda que sua origem não seja sintética, a nitrocelulose assinalou o início de um padrão de criação de novos polímeros ancorado na adaptação a situações emergenciais. Nesse contexto, os polímeros sintéticos emergiram no cenário industrial em meio às guerras mundiais (GEYER, 2020; RASMUSSEN, 2021). Desde então, é difundido que a humanidade tem transitado por um período denominado Plasticeno (Era dos Plásticos), termo que adquiriu significado geológico, denotando a presença generalizada e duradoura dos plásticos no ambiente terrestre (HARAM et al., 2020).

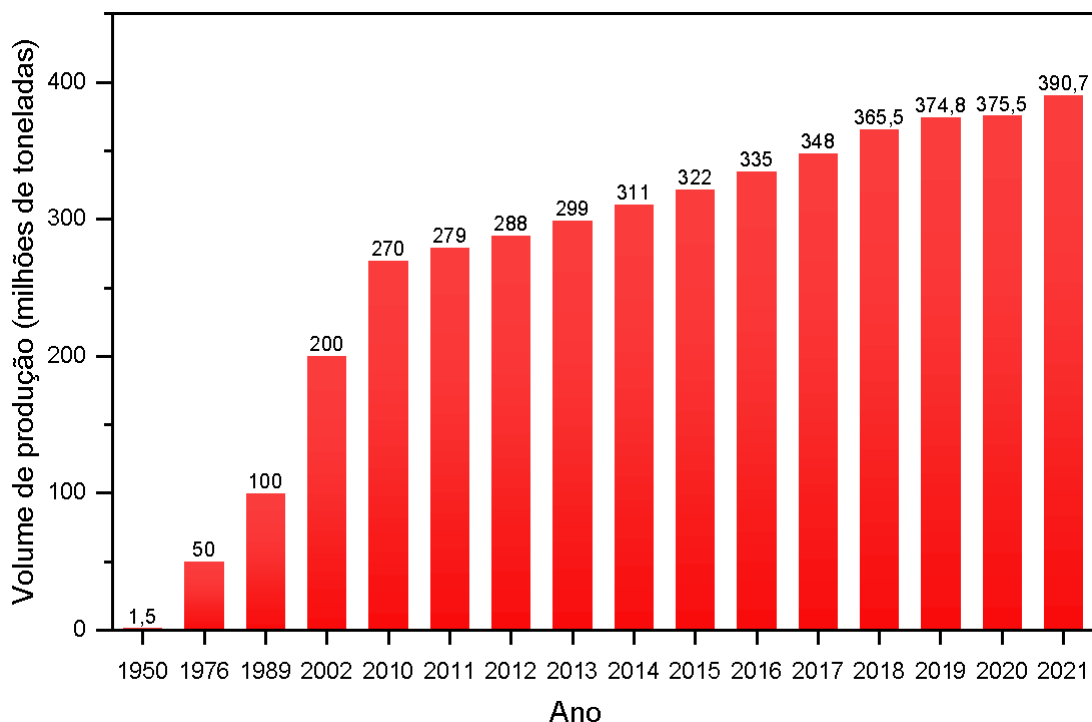


Figura 1 – Volume anual da produção de plásticos

Fonte: Adaptado de Statista (2021).

Na Figura 1, pode-se visualizar a produção anual de plásticos ao longo do tempo. Em 1950, marco inicial da era Plasticeno, foram produzidas 1,5 milhão de toneladas de plásticos (LEAL FILHO et al., 2019). Já em 2019, essa produção ultrapassou 370 milhões de toneladas (KUMAR et al., 2021). Projeções indicam a continuidade dessa tendência de crescimento, com estimativas apontando que até 2060 o volume de fabricação de plásticos deve triplicar (LEBRETON; ANDRADY, 2019). Segundo Zhou et al. (2021), é estimado que ao longo do tempo tenham sido produzidas aproximadamente 8,3 bilhões de toneladas de plástico. Dentre as aplicações desses materiais, pode-se observar a predominância das embalagens descartáveis, que representam 40% do uso global de plásticos, seguida pelos materiais de construção, que contribuem com 16% do total (ZHAO et al., 2022).

3.1.1 Composição e propriedades dos plásticos

Do ponto de vista etimológico, a palavra "plástico" deriva do grego "plastikos", que significa "moldável" (VERED; SHENKAR, 2021). Desse modo, os polímeros sintéticos são denominados comumente como plásticos, refletindo sua capacidade de serem adaptados de acordo com as necessidades (ABRAHMS KAVUNENKO, 2023; BAHL et al., 2021). Essa versatilidade é possível graças às propriedades intrínsecas desses materiais, que são compostos por cadeias moleculares longas, formadas por unidades

repetitivas chamadas monômeros (VOLLMER et al., 2021). Os polímeros sintéticos, em sua maioria, têm como base matérias-primas provenientes do petróleo bruto, como o etileno, propileno e estireno. Esses produtos químicos são submetidos a processos de refinamento e transformação para produzir os monômeros utilizados na síntese de polímeros (XAYACHAK et al., 2022).

A relação entre a composição química e molecular dos plásticos e suas características é fundamental para compreender o desempenho desses materiais. A composição química dos monômeros determina a estrutura e a natureza das ligações químicas presentes no polímero resultante (MADDUMA-BANDARAGE; MADIHALLY, 2021). Por exemplo, monômeros com regiões polares, como o oxigênio presente no polietileno-glicol, tornam o material mais susceptível à degradação hidrólise. Por outro lado, plásticos compostos majoritariamente por grupos hidrofóbicos são caracterizados por sua alta resistência à umidade, como o polietileno tereftalato (ÖZDEMIR; GÜNER, 2007; SADEGHZADE, 2023). Abaixo, a Figura 2 apresenta o código de identificação dos plásticos junto de suas estruturas moleculares, além de ilustrar uma aplicação comum do polímero.

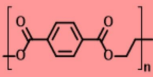
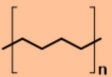
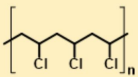
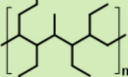
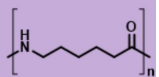
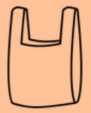
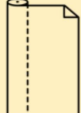
						
PET	PEAD	PVC	PEBD	PP	PS	O
Polietileno tereftalato	Polietileno de alta densidade	Policloreto de vinila	Polietileno de baixa densidade	Polipropileno	Poliestireno	Outros (como nylon)
						
						

Figura 2 – Código de identificação dos plásticos, estrutura molecular e ilustração de produtos comuns.

Fonte: Adaptado de Farac (2019).

A degradação dos plásticos é um processo que ocorre por um considerável período, muitas vezes estendendo-se por várias décadas, influenciado tanto por sua composição, quanto por fatores temporais e ambientais. Polímeros como o polietileno,

com cadeias longas e ligações carbono-carbono resistentes, são altamente duráveis, podendo persistir no ambiente por longos períodos (ZHANG et al., 2022). Além da estrutura química, os fatores ambientais desempenham um papel crucial na degradação dos plásticos. A exposição à luz solar, acelera a quebra das ligações moleculares em um processo denominado fotodegradação, enquanto variações de temperatura podem resultar na termodegradação do material. A presença de micro-organismos no ambiente também pode facilitar a desintegração dos polímeros, especialmente em condições anaeróbicas (CHAMAS et al., 2020; QUECHOLAC PIÑA et al., 2020).

3.1.1.1 Agenda de 2030

No ano de 2015, durante a Cúpula das Nações Unidas, foi apresentada a iniciativa dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs). Essas metas foram delineadas para abordar os desafios globais mais significativos da atualidade e estabelecer as bases de um futuro sustentável, com o propósito de erradicar a pobreza, preservar o meio ambiente e assegurar a paz e a prosperidade para todas as pessoas. Esse acordo foi ratificado por 193 países, que se comprometeram com a realização de esforços para atingir um total de 17 objetivos universais até o ano de 2030 (OPOKU, 2016; BEXELL; JÖNSSON, 2017). De acordo com Walker (2021), embora apenas o Objetivo 14 mencione diretamente a poluição por plásticos, doze objetivos são diretamente afetados por esse fenômeno.

Convencionalmente, os resíduos não-biodegradáveis são depositados em aterros sanitários ou são incinerados. No entanto, o impacto ambiental gerado por essas abordagens as torna incompatíveis às práticas sustentáveis de manejo de resíduos. Enquanto a incineração resulta na liberação de subprodutos prejudiciais, como CO₂ e gases ácidos, a deposição desses materiais em aterros provoca danos significativos devido à interação de materiais reativos com o lençol freático e com as substâncias tóxicas presentes nos aterros, levando à formação de lixiviados nocivos e, em última instância, à degradação das áreas circundantes (SARKINGOBIR; BELLO; YABO, 2021; NATESAN et al., 2021).

Para abordar essa questão e alcançar as metas delineadas pela Agenda 2030, medidas já foram implementadas por diversos países. Um exemplo notável ocorreu em 2020, quando a União Europeia comprometeu-se a alcançar a neutralidade de emissões de gases de efeito estufa até o ano de 2050, através da iniciativa conhecida como "The European Green Deal" (RODRIGUES et al., 2023). Uma das estratégias centrais para atingir esse objetivo envolve a transição dos plásticos convencionais para alternativas de origem biológica, biodegradáveis ou compostáveis (COSTA et al., 2023). Na França e na Inglaterra, embalagens de uso único para o armazenamento de alimentos e utensílios para alimentação foram recentemente banidas. Além disso,

países como Canadá e Austrália também impuseram severas restrições ao uso de plásticos descartáveis (AHMADI et al., 2023).

No Objetivo 9, intitulado "Indústria, Inovação e Infraestrutura", são delineadas medidas e métodos de avaliação com o propósito de estabelecer uma infraestrutura resiliente, promover uma industrialização sustentável e fomentar a inovação. Dentro desse contexto, a emissão de CO₂ figura como um dos indicadores utilizados na avaliação do impacto ambiental das atividades industriais e do progresso em direção à sustentabilidade (SHEN et al., 2020). Segundo Rosenboom et al. (2022), a inserção de polímeros de base biológica como matéria-prima na indústria é uma estratégia eficiente para reduzir a pegada de carbono. Ademais, os biopolímeros apresentam um ciclo de vida sustentável, uma vez que sua produção consome menos energia e emite menos gases de efeito estufa do que a fabricação de polímeros sintéticos (MANGAL; RAO; BANERJEE, 2023).

3.2 Biopolímeros

A pressão por alternativas sustentáveis aos polímeros derivados de fontes fósseis direcionou a atenção da comunidade científica aos biopolímeros. Constituídos por cadeias de nucleotídeos, aminoácidos e monossacarídeos, essas estruturas desempenham papéis cruciais na formação biológica dos seres vivos (ALI et al., 2022). A cadeia que constitui os biopolímeros pode incorporar uma variada combinação de átomos, incluindo carbono, nitrogênio e oxigênio (DALWADI et al., 2023). Essa diversidade química, por sua vez, resulta em uma versatilidade de propriedades, tornando-os úteis para uma vasta gama de aplicações (IBRAHIM et al., 2021).

Em oposição aos polímeros convencionais, os biopolímeros são derivados de fontes renováveis, em constante regeneração, como plantas, animais, fungos e bactérias. Nesses organismos, os polímeros são formadores de estruturas essenciais, participam de processos biológicos, atuam no armazenamento e na transmissão de informações genéticas e servem como reserva energética para a manutenção da vida (BARANWAL et al., 2022). Industrialmente, os biopolímeros são empregados na fabricação de bioplásticos para aplicação variadas, desde simples embalagens até componentes para automóveis (RAHMAN et al., 2023).

Atualmente, o setor de bioplásticos exibe uma capacidade produtiva que ultrapassa 2 milhões de toneladas por ano, o que equivale a menos de 1% da produção global de plásticos convencionais (LEAL FILHO et al., 2019). No entanto, projeções indicam que esse volume deve triplicar até 2027, impulsionado pelo viés sustentável. Segundo Cruz et al. (2022), os custos associados aos bioplásticos estão em constante declínio, como resultado da sua incorporação aos produtos de grandes empresas.

Conforme Rosenboom et al. (2022), a utilização de resíduos agrícolas é uma

alternativa viável, abundante e ética para atender à crescente demanda por bioplásticos. Polímeros comumente empregados na fabricação de bioplásticos, como o ácido polilático (PLA), zeína, amido e celulose podem ser obtidos a partir de resíduos agrícolas, como cascas de frutas, bagaços e restos de colheitas (YARADODDI et al., 2022). Ao agregar valor aos resíduos agrícolas, é conferido à produção de bioplásticos um caráter sustentável e circular (TAMASIGA et al., 2022). Além disso, a adoção de matérias-primas provenientes da agricultura pode resultar em benefícios socioeconômicos significativos ao promover a geração de empregos e fortalecer a economia local (SANTAGATA et al., 2021). Assim, a manufatura de bioplásticos alinha-se a múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU.

3.2.1 Fibras poliméricas

Uma estratégia comum para a produção de recursos úteis para a engenharia envolve a conversão de materiais em arranjos fibrosos (TEMESGEN et al., 2021). Essa abordagem apresenta uma série de vantagens, como acentuadas propriedades mecânicas, elevada relação entre área superficial e volume, e a capacidade de ajustar as características superficiais para aplicações específicas (KONG et al., 2023). A versatilidade proporcionada pela produção de fibras tem sido extensivamente explorada em diversos setores da engenharia, abrangendo desde a tradicional indústria moveleira até o desenvolvimento de nanomateriais (MENG et al., 2021; PRIYA et al., 2022).

Quando apresentada na forma de fibras, a fibroína, uma proteína extraída do algodão, desempenha um papel fundamental na produção de diversos produtos para aplicação biomédica. Estes incluem curativos, dispositivos para a liberação controlada de fármacos, biossensores, bem como na criação de estruturas biológicas artificiais, tais como tendões e próteses oculares (ÇIRKIN; YÜKSEK, 2021). A quitosana, polissacarídeo proveniente do exoesqueleto de crustáceos, mostra-se versátil ao ser empregada no desenvolvimento de fibras destinadas ao encapsulamento de fertilizantes, soluções de remediação ambiental e dispositivos biomédicos (IBRAHIM et al., 2023).

De maneira análoga, fibras poliméricas à base de amido e alginato têm sido amplamente utilizadas na fabricação de produtos em diversos setores. Estas fibras desempenham um papel crucial na produção de cosméticos, eletrônicos, superfícies superhidrofóbicas, sensores e aditivos antioxidantes, refletindo a capacidade adaptativa e a utilidade prática de fibras biopoliméricas (TEMESGEN et al., 2021; ZDIRI et al., 2022).

3.2.2 Zeína

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (2022), o Brasil produziu mais de 115 milhões de toneladas de milho na safra de 2022. Desse número, 46 milhões são considerados excedentes produtivos (SANCHES; SALES, 2022). Simultaneamente, a demanda por insumos para o setor de bioplásticos tem se acentuado, sendo necessária a descoberta de novos materiais, tecnologias e aplicações inovadoras aos recursos já existentes. Dentre os subprodutos do milho, a zeína tornou-se o foco de inúmeras pesquisas, não apenas por suas características funcionais, mas também por ser oriunda de uma fonte abundante e de baixo custo. Estudos recentes demonstram que bioplásticos à base de zeína são biocompatíveis, biodegradáveis, mecanicamente estáveis, flexíveis e funcionalizáveis (JASKI et al., 2022; PEREZ-PUYANA et al., 2020).

Oriunda do endoesperma do milho, a zeína é um polímero amorfo, que integra a família das prolaminas, proteínas compostas majoritariamente por aminoácidos hidrofóbicos. Em meio natural, as prolaminas atuam no armazenamento e na distribuição de nitrogênio aos grãos (DUVNJAK; KLJAK; GRBEŠA, 2021). A zeína é classificada em quatro categorias, de acordo com sua massa molecular relativa. A α -zeína (22-24 kDa), β -zeína (17 kDa) e a δ -zeína (10 kDa) representam, respectivamente, 75-85%, 10-15% e 10-15% da massa total do polímero no milho. A γ -zeína, por sua vez, aparece em quantidade inferior à 1%. A zeína obtida por via comercial trata-se, essencialmente, da α -zeína (ZHANG et al., 2021).

Pela ausência de uma finalidade produtiva definida, a extração anual de zeína é limitada. Assim, este polímero é um material dispendioso e comumente descartado em meio aos resíduos do milho (MATTICE; MARANGONI, 2020). Recentemente, métodos inovadores e eficientes para extração e processamento da zeína foram desenvolvidos e novas aplicações ao material foram descobertas (YOSHIOKA, 2021; DUAN et al., 2019). Nesse contexto, a recursividade oferecida pela zeína é reverberada por um panorama no qual se espera uma safra recorde de milho em 2023, tornando a exploração desse polímero oportuna e viável (IBGE, 2023; MATTICE; MARANGONI, 2020).

3.2.2.1 Características estruturais

A determinação estrutural da zeína compreende três níveis, de diferentes complexidades. A estrutura primária refere-se à sequência de aminoácidos conectados na formação da cadeia polipeptídica. Na molécula de α -zeína, essa estrutura é formada por uma sequência de mais de 200 aminoácidos, dos quais a leucina, a glutamina e a alanina mostram-se em frações significativas de 19%, 18% e 15%, respectivamente (PADUA; GUARDIOLA, 2015). Já a estrutura secundária está relacionada ao desdo-

bramento da cadeia de aminoácidos. A α -zeína possui uma cadeia espiral, denominada α -hélice (Figura 3), estabilizada por pontes de hidrogênio entre grupos funcionais paralelos (GEORGIEV; GLAZEBOOK, 2019).

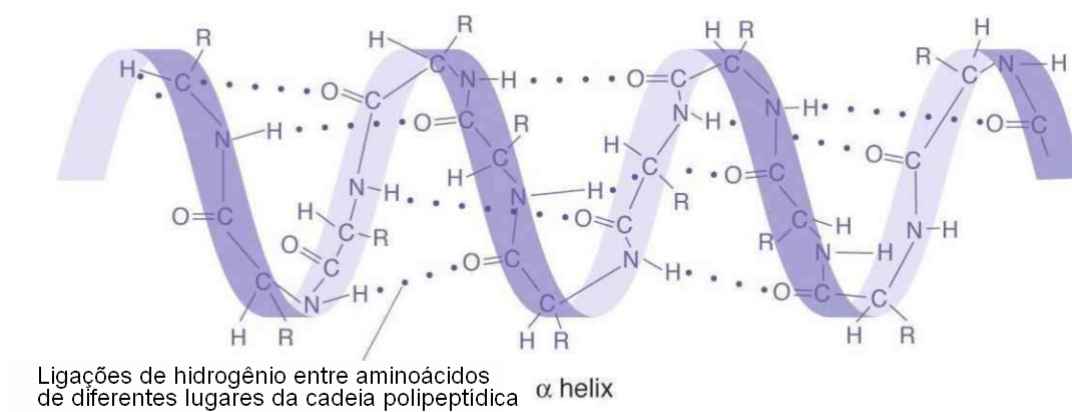


Figura 3 – Estrutura α -hélice de uma proteína.

Fonte: Adaptado de Gao et al. (2022).

A estrutura terciária trata-se da disposição da cadeia polipeptídica no espaço tridimensional. Nesse ponto, diversos modelos para a α -zeína foram propostos ao longo do tempo. De modo geral, entende-se que um monômero de zeína possui 9 segmentos helicoidais, em forma de haste e organizados linearmente. Contudo, um consenso quanto a maneira que essas divisões são distribuídas espacialmente, ainda é inexistente (ZHANG et al., 2021). Na Figura 4, é apresentada a estrutura primária e secundária da α -zeína, além de um dos modelos propostos para sua estrutura terciária.

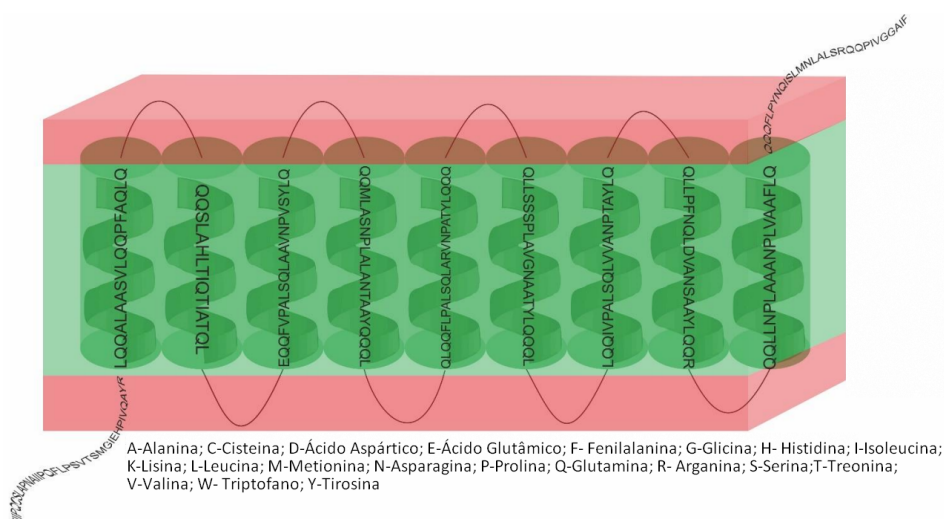


Figura 4 – Proposta de modelo estrutural da α -zeína.

Fonte: Adaptado de Barbosa *et al.* (2017).

3.2.2.2 Propriedades físico-químicas

A zeína detém uma microestrutura amorfa, caracterizada pelo desordenamento espacial de suas cadeias poliméricas. Os materiais amorfos, em determinada temperatura, passam por um estado de transição vítrea, no qual assumem aspecto semissólido (SHACKELFORD; ALEXANDER, 2016). A zeína adquire essa configuração aos 165°C, que é mantida até sua degradação térmica, a partir dos 280°C. Em temperaturas superiores à faixa de 80-87°C, a zeína sofre desnaturação (PEREZ-PUYANA *et al.*, 2020). Esse fenômeno, restrito às proteínas, resulta no rompimento das cadeias polipeptídicas e subsequente perda de propriedades funcionais. Em oposição à degradação térmica, a desnaturação é um processo passível de reversibilidade (ALBERTS *et al.*, 2022).

O peso molecular da α -zeína, de 22 a 24 kDa, denota um baixo peso molecular (< 100 kDa). Essa grandeza é diretamente proporcional ao grau de polimerização da zeína, que denota a quantidade de monômeros necessários à sua formação. De composição anfifílica, o ponto isoelétrico da zeína é dado no pH 6.2, o que a torna insolúvel em água e em etanol puros (TOKMAKOV; KUROTANI; SATO, 2021). As propriedades físico-químicas da zeína são expressadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas da zeína.

Propriedade	Valor
Temperatura de desnaturação	80.32-87.1 °C
Temperatura de transição vítrea	165 °C
Ponto de degradação térmica	280 °C
Peso molecular (α -zeína)	22-24 kDa
Grau de polimerização	210-245
Ponto isoelétrico	pH 6.2

Fonte: Adaptado de Pérez-Guzmán e Castro-Muñoz (2020).

3.2.2.3 Zeína como bioplástico

Após sua descoberta em 1821, a zeína foi explorada industrialmente até a década de 1950, na fabricação de botões, embalagens, adesivos, entre outros. Nos anos posteriores, sua demanda foi mitigada pela ascensão dos polímeros sintéticos (LAWTON, 2002). Contudo, o estabelecimento das bases para um alinhamento sustentável, na década de 1990, resultou em uma intensa busca por materiais biodegradáveis, renováveis e não-tóxicos. A partir desse evento, o interesse científico na investigação da zeína como um bioplástico passou a ser recuperado gradualmente (JASKI *et al.*, 2022).

A zeína é reconhecida pela FDA (*Food and Drugs Administration*), órgão responsável pela regulação de alimentos e fármacos nos Estados Unidos, como um material seguro para consumo (HASSAN et al., 2022). Ela pode ser moldada em diferentes formatos, como fibras, filmes e partículas (TORTORELLA et al., 2021). DeFrates et al. (2021) desenvolveram filmes e nanofibras de zeína para a liberação controlada de fármacos. As estruturas fibrosas se mostraram superiores aos filmes na entrega de fármacos, promovendo uma prolongada liberação do medicamento. Colussi et al. (2021) desenvolveram nanofibras de zeína encapsuladas com isotiocianato de alila para a conservação de morangos, extendendo o seu tempo de prateleira de 15 para 20 dias.

Materiais a base de zeína apresentam caráter antioxidante intrínseco. Desse modo, ao neutralizar radicais livres, a zeína inibe o estresse oxidativo e protege produtos sensíveis contra alterações indesejadas, garantindo sua integridade e segurança por um período prolongado (LEYVA-PORRAS et al., 2021; GHASEMI et al., 2023). Além disso, essa característica pode ser reforçada pela adição de outros compostos com propriedade antioxidante, como polifenóis e flavonóides (LI et al., 2023; DRAGO et al., 2022). Assim, o efeito sinérgico da adição desses componentes à solução polimérica proporciona um maior efeito antioxidante, potencializando os benefícios associados ao uso das fibras na fabricação de embalagens, cápsulas, dispositivos biomédicos, entre outros (BAI et al., 2022; KASAAI, 2018).

3.3 Técnicas de obtenção de fibras

Utilizadas na manufatura de nanosensores, fármacos, *biochips*, entre outras tecnologias, as fibras tornaram-se materiais de extrema relevância científica e industrial. Nas últimas décadas, diversas técnicas para o desenvolvimento de fibras, com diferentes princípios e escalas, foram elaboradas, como eletrofiação, rotofiação e fiação por sopro de fundido (ZHANG et al., 2019). A seleção de uma técnica de fabricação adequada é fundamental na determinação dos atributos estruturais, mecânicos e funcionais do produto final (LI et al., 2019).

3.3.1 Eletrofiação

O eletrofiação é uma técnica amplamente difundida no desenvolvimento de nanofibras. Nesse método, o material é obtido a partir da aplicação de uma diferença de potencial em uma solução polimérica. Desse modo, com a ação de forças eletrostáticas, a solução é ejetada até o coletor, que em rotação, promove a evaporação do solvente e a solidificação e alongamento das fibras (ZHANG et al., 2019). O diâmetro e a morfologia das fibras podem ser controlados pela alteração de parâmetros do processo, como a voltagem aplicada, velocidade de rotação do coletor, distância do

ejetor ao coletor e o fluxo volumétrico da solução (XUE et al., 2019). O processo de eletrofiação é ilustrado pela Figura 5.

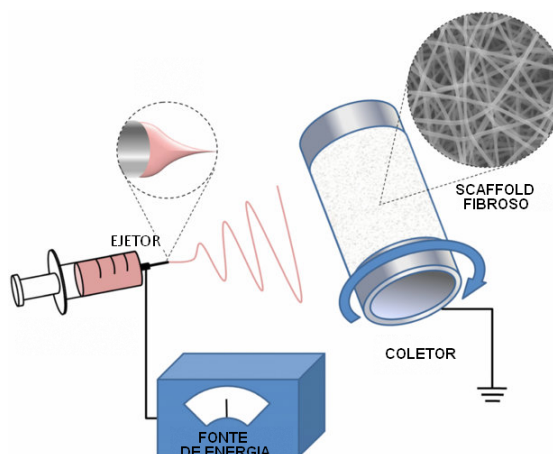


Figura 5 – Ilustração do processo de eletrofiação

Fonte: Adaptado de Rim et al. 2013.

O'Connor et al. (2021) analisaram a influência de diferentes parâmetros na formação de fibras de policaprolactona (PLC) via eletrofiação. Como resultado, foi observado que o aumento na velocidade de rotação, de 1600 RPM para 3200 RPM, gerou fibras de maior resistência mecânica, maior uniformidade e menor diâmetro. Por outro lado, a diminuição da distância entre o ejetor e o coletor resultou em fibras mais resistentes, porém menos uniformes. Conforme Chinnapann et al. (2022), os parâmetros da solução polimérica são de equivalente importância, já que valores ideais de concentração, condutividade, peso molecular e viscosidade geram fibras uniformes, de menor diâmetro, lisas e contínuas.

3.3.2 Fiação por sopro de fundido

Livre do emprego de solventes e de altas voltagens, a fiação por sopro de fundido é uma técnica baseada na extrusão de polímeros fundidos. Quando ejetados, os materiais já derretidos são acometidos por rajadas de ar quente, que os conforma no formato fibroso. Posteriormente, correntes de ar frio são incididas sob as fibras em estado vítreo, que são coletadas e alongadas por rolos em rotação. Essa metodologia, quando aplicada à fabricação de biomateriais, limita-se à utilização de polímeros termoplásticos (ZHANG et al., 2019).

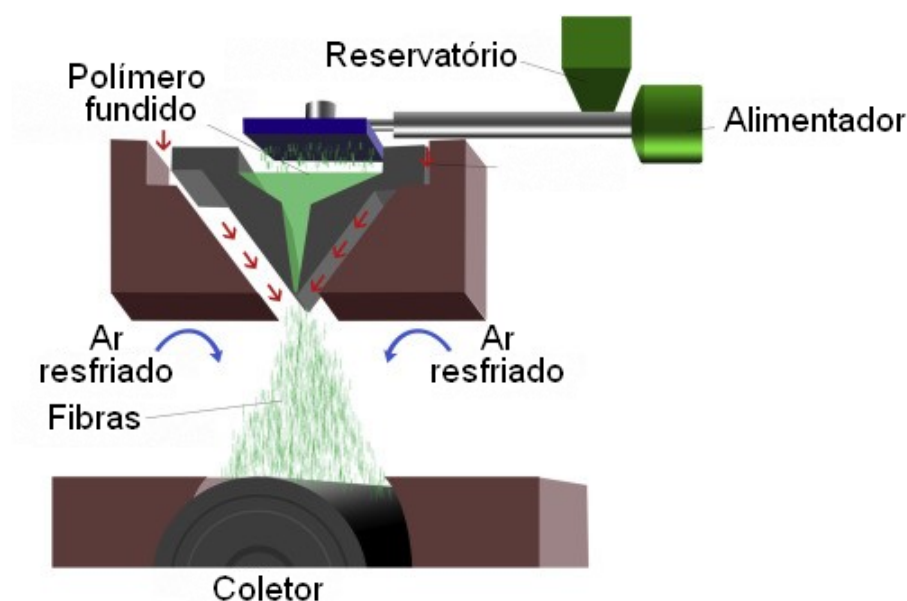


Figura 6 – Ilustração do processo de fiação por sopro de fundido.

Fonte: Adaptado de Rajendran (2018).

A fiação por sopro de fundido foi utilizado por Gazzola et al.(2019), na fabricação de *scaffolds* de ácido polilático. Durante sete dias, as estruturas exibiram efeitos positivos na proliferação de células epiteliais. Do mesmo modo, Dzierkowska et al.(2021) desenvolveram fibras de ácido polilático, em diferentes temperaturas, com a finalidade de observar o efeito do parâmetro nas propriedades e na estrutura do material. Quando processado a temperaturas entre 81 °C e 97 °C, o material demonstrou comportamento citotóxico, atribuído à cristalização da sua estrutura. Acima, na Figura 6, é representado o processo de fiação por sopro de fundido.

3.3.3 Rotofiação

A rotofiação é uma metodologia emergente, baseada na formação de fibras poliméricas pela ação da força centrífuga. Conforme a Figura 7, o equipamento é constituído, essencialmente, por um motor, um reservatório com bicos ejetores e por hastes coletoras. Desse modo, o material polimérico, em solução, é injetado no reservatório e expelido através dos bicos. Idealmente, espera-se que seja formado um jato contínuo, dos bicos às hastes coletoras e que o material seja solidificado durante o trajeto. Para que o processo ocorra em conformidade ao pretendido, se faz necessário o ajuste de parâmetros relativos ao equipamento e à matéria-prima (DUAN et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

Conforme Zhang et al. (2019), o procedimento pode ser dividido em três fases. Inicialmente, quando o motor é acionado, o reservatório preenchido pela solução polimérica rotaciona em torno do seu próprio eixo. Quando a força centrífuga do

reservatório é igualada à tensão superficial da solução, o material é deslocado aos bicos ejetores e assume formato cônico em sua extremidade. Posteriormente, a velocidade angular é acrescida até ultrapassar o valor crítico, no qual a força centrífuga torna-se maior que a tensão superficial da solução (DUAN et al., 2019).

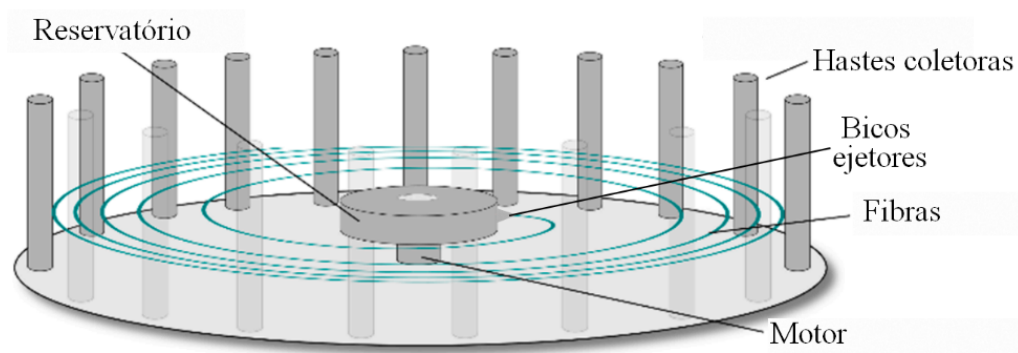


Figura 7 – Ilustração do equipamento de rotificação.
Fonte: Adaptado de Rogalski et al. (2018).

Nesse ponto, o polímero passa a ser ejetado. A continuidade do jato e a consequente formação de fibras é determinada pela viscosidade da solução polimérica e pela velocidade de rotação (DUAN et al., 2019). Soluções excessivamente viscosas apresentam dificuldades na ejeção. Soluções com viscosidade abaixo do ideal são ejetadas de maneira descontínua, no formato de grânulos. A viscosidade pode ser ajustada de modo simples, ao se alterar a concentração da solução polimérica (LI et al., 2019).

Em sua última fase, o jato é tracionado pela gotícula, e o material passa a ser alongado pela ação da inércia. Ao atingir as hastes coletoras, o jato é estabilizado enquanto o solvente evapora gradualmente, formando fibras sólidas. A dimensão das fibras pode ser modulada através do aumento da distância dos bicos às hastes coletoras e pela diminuição do diâmetro dos bicos de ejeção (DUAN et al., 2019; ZHANG et al., 2019).

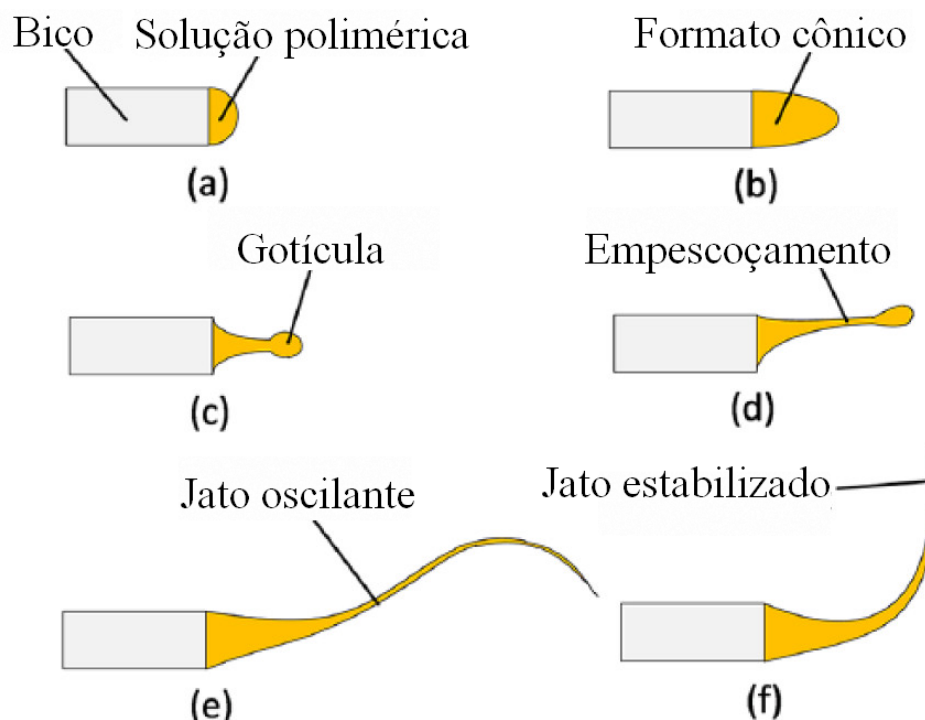


Figura 8 – Ejeção por força centrífuga: (a) solução no bico ejetor; (b) solução em formato cônico; (c) gotícula na extremidade; (d) empescoçamento por tração; (e) jato oscilante; (f) jato estabilizado.

Fonte: Adaptado de Duan et al. (2019).

A rotofiação foi utilizado por Zhang et al. (2023) para a produção de fibras de álcool polivinílico e carbometilquitosana, resultando em um filme com propriedades adequadas para uso cosmético e dermatológico, como máscara facial. Xia et al. (2022) desenvolveram nanofibras de lignina e acetato de celulose via rotofiação, gerando um material com a capacidade de adsorver íons de cobre (II), poluente de corpos hídricos altamente nocivo. Segundo Atici et al. (2022, componentes de baterias como separadores, peças de ânodos e peças de cátodos foram fabricados através da rotofiação.

3.3.4 Comparativo entre técnicas de fabricação de fibras

Em comparação às demais técnicas, a rotofiação mostra-se como uma metodologia simples, sustentável, de baixo custo produtivo e promissora aplicação industrial (ZANNINI LUZ; SANTOS, 2022). Em oposição à fiação por sopro de fundido e à eletrofiação, a rotofiação é eficiente no processamento de polímeros naturais e sintéticos, condutivos e não-condutivos. Sua utilização dispensa o emprego de altas voltagens e diminui a dependência de solventes agressivos ao meio-ambiente (ZHANG et al., 2019). Equipamentos experimentais demonstram potencial para a produção de fibras em larga escala, com um rendimento cerca de 300 vezes superior à eletrofiação (KWAK et al., 2021).

É importante salientar que a rotofiação é uma técnica recente e em processo de maturação. Os parâmetros ideais para a manufatura de polímeros pouco difundidos ainda são desconhecidos e a ausência de modelos matemáticos confiáveis impede sua previsibilidade. Atualmente, a rotofiação passa por uma fase de otimização e refinamento. Os desfechos dos experimentos conduzidos até o momento sugerem que a técnica será ativamente utilizada, em um futuro próximo, no meio científico e industrial (ZHANG et al., 2019).

4 METODOLOGIA

Com vista à obtenção de fibras, a metodologia selecionada divide-se entre o preparo da solução polimérica, o processamento e a caracterização do material obtido. Como solvente, selecionou-se o ácido acético glacial por permitir uma dissolução eficiente da zeína, como resultado da protonação da proteína Li et al. (2012). Além disso, o ácido acético glacial é amplamente reconhecido como um solvente seguro e com baixa persistência no meio-ambiente (TOBISZEWSKI; NAMIEŚNIK; PENA-PEREIRA, 2017). Por fim, o processamento da solução foi realizado via rotofiação, por ser uma técnica simples, efetiva, sustentável e escalável. Além disso, a inexistência de estudos acerca do processamento da zeína pura através desse método é, também, parte dos critérios de escolha.

4.1 Fabricação das fibras de zeína

As fibras foram fabricadas através de um equipamento de rotofiação customizado. O procedimento experimental (Figura 9) foi realizado utilizando bicos com um diâmetro de 0,3 mm, posicionados a uma distância fixa de 11 cm dos bastões de coleta. Simultaneamente, a velocidade de rotação foi variada de 6000 a 12000 rotações por minuto. Além disso, a temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas utilizando um termo-higrômetro digital (JProlab, Brasil), a fim de garantir que esses valores permanecessem acima de 30 °C e abaixo de 50%, respectivamente.

Foram utilizadas soluções de zeína (Sigma-Aldrich) e ácido acético glacial (Êxodo Científica) nas proporções de 37,5%, 40%, 42,5% e 45% (%m/m) do polímero em relação à massa do solvente. As soluções foram submetidas à agitação contínua por um período de 30 minutos em um frasco selado, à temperatura ambiente, até a completa dissolução. Vale ressaltar que a determinação de todos os parâmetros do processo foi baseada em investigações preliminares, que demonstraram um aumento na produção de fibras dentro das faixas prescritas.

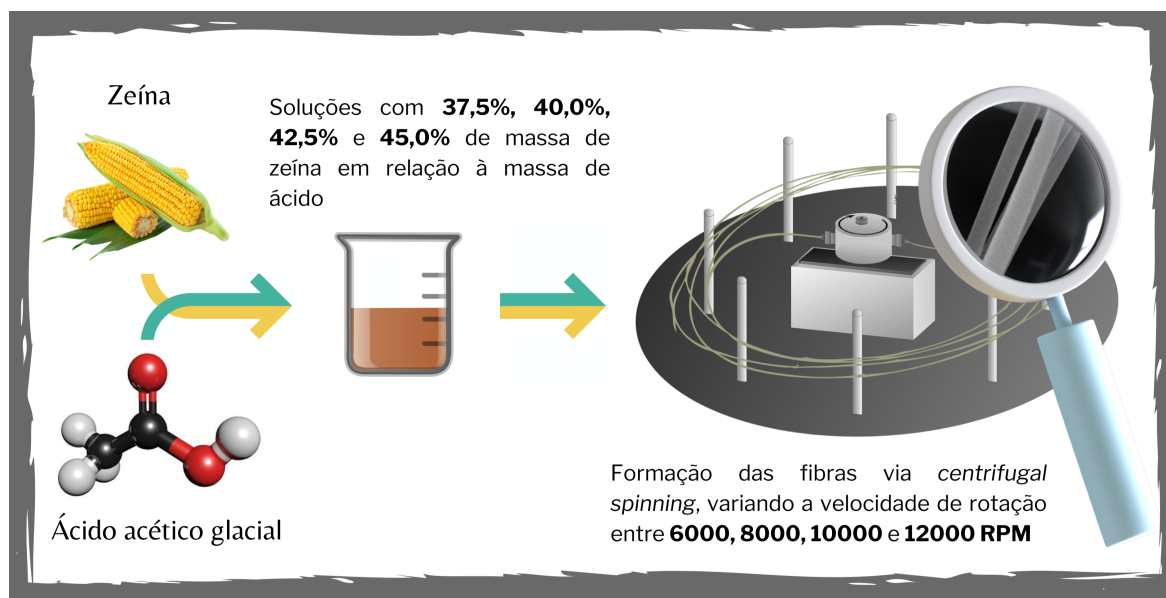


Figura 9 – Ilustração da metodologia utilizada na fabricação das fibras de zeína.

Fonte: Autoria própria.

4.2 Técnicas para a caracterização de fibras

Uma vez desenvolvidas, as fibras foram caracterizadas em torno de suas propriedades físico-químicas, mecânicas e morfológicas. Além disso, o comportamento reológico da solução polimérica foi analisado, bem como o caráter antioxidante do material para estimar uma provável aplicação.

4.2.1 Comportamento reológico

A análise da viscosidade de diferentes concentrações de zeína na solução foi conduzida utilizando o viscosímetro NDJ-5S (Hinotek), disponibilizado pelo Laboratório de Nanotecnologia (NOVONANO) da Universidade Federal de Pelotas, na temperatura de 25°C, a uma frequência de 10 Hertz e no intervalo de 37.5% a 45.0% de massa de zeína em relação ao ácido acético.

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises microscópicas foram realizadas no equipamento JSM - 6610LV (JEOL Ltd.) localizado no Centro de Microscopia Eletrônica do Sul (CEMESUL) da Universidade Federal do Rio Grande. As amostras foram pulverizadas com ouro sob vácuo. O diâmetro médio das fibras foi calculado por meio do *software* ImageJ medindo diferentes locais de imagens de MEV de aproximadamente 50 fibras.

4.2.3 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A análise de espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) foi conduzida no espectroscópio IRPrestige-21 (Shimadzu) localizado na Central Analítica da Universidade Federal de Pelotas. O equipamento foi operado no modo ATR, e os espectros de FTIR foram registrados na faixa de comprimentos de onda entre 400 cm^{-1} e 4000 cm^{-1} .

4.2.4 Ângulo de Contato

Para avaliar a afinidade entre as fibras de zeína e água, determinou-se o ângulo de contato utilizando o tensiômetro Theta Lite (Attension®). Análise foi realizada no Centro de Desenvolvimento e Controle de Biomateriais do curso de Odontologia da Universidade Federal de Pelotas. Para assegurar sua confiabilidade, a medida foi realizada em triplicata.

4.2.5 Propriedade antioxidante

O potencial antioxidante das fibras foi avaliado através da determinação da capacidade de captura de radicais utilizando os métodos DPPH (2,2-difenil-1-picril-hidrazil) e ABTS (ácido 2,2-azino-bis-(3-etil-benzotiazolina-6-sulfônico)).

A capacidade de captura do radical DPPH foi calculada seguindo o método descrito por Brand-Williams et al. (1995) com algumas adaptações. Uma solução metanólica do reagente DPPH (Sigma-Aldrich) foi preparada e ajustada até se atingir uma absorvância de $1,10 (\pm 0,02)$. Em seguida, as fibras foram dissolvidas em $300\text{ }\mu\text{L}$ de ácido acético glacial. O reagente DPPH ($3,9\text{ mL}$) e os extratos resultantes das fibras ($100\text{ }\mu\text{L}$) foram misturados por 30 segundos e deixados à temperatura ambiente por 180 minutos. A absorvância foi então medida em triplicata a 517 nm usando um espectrofotômetro UV-51 (BEL Engineering, Milão, Itália).

A atividade de captura do ABTS foi avaliada de acordo com o procedimento relatado por Re et al. (1999), com algumas modificações. Inicialmente, 5 mL de 7 mM de ABTS (Sigma-Aldrich) foram combinados com $88\text{ }\mu\text{L}$ de uma solução de persulfato de potássio (Dinâmica Química Contemporânea LTDA.) a 140 mM , e a mistura resultante foi agitada no escuro à temperatura ambiente por 16 horas. As fibras foram dissolvidas em ácido acético glacial para produzir o analito. Antes da aplicação, a solução de ABTS foi diluída com etanol até atingir uma absorvância de $0,70\text{ nm} \pm 0,05\text{ nm}$ a 734 nm . Uma mistura de 3 mL da solução de ABTS e $30\text{ }\mu\text{L}$ dos extratos de fibras foi preparada e incubada no escuro por 30 minutos.

Para quantificar a capacidade de captura de radicais livres em ambos os métodos,

a seguinte equação foi utilizada:

$$Inhibition(\%) = (A1 - A2)/A1 * 100 \quad (1)$$

Onde A1 e A2 representam os valores de absorbância da solução de DPPH ou ABTS sem e com a presença das amostras, respectivamente. Essas medições foram realizadas em duplicata e os resultados foram expressos como a média $\pm$ desvio padrão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 10 apresenta parte das amostras produzidas no experimento, geradas a 10.000 RPM com variação na concentração de zeína. Em termos gerais, as demais fibras obtidas exibem um aspecto visual semelhante, com diferenças perceptíveis apenas em relação à quantidade gerada. Essa constatação sugere que, apesar da uniformidade nas características visuais, as variações na concentração de zeína desempenham um papel significativo na produção, no que se refere ao volume aparente.

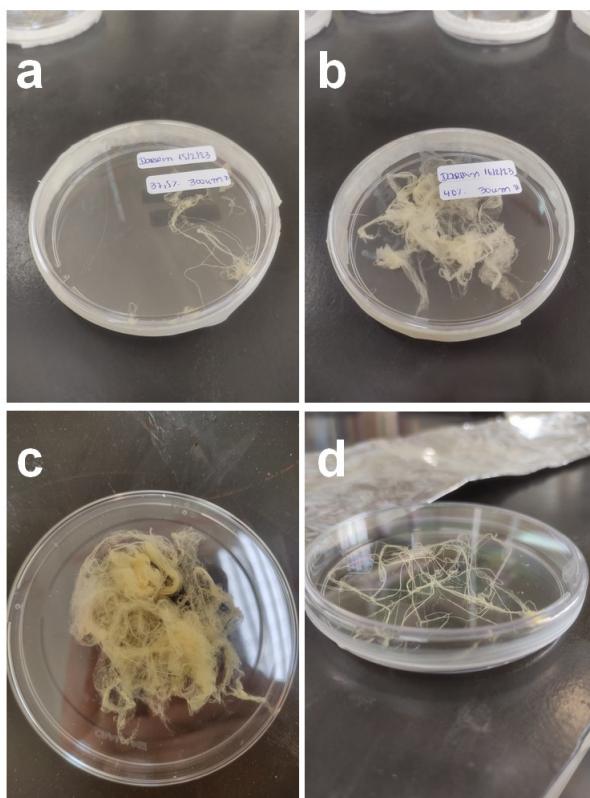


Figura 10 – Fibras produzidas com concentrações de (a) 37,5%, (b) 40%, (c) 42.5% e (d) 45% de zeína e velocidade de rotação de 10.000 RPM.

Fonte: Autoria própria.

5.1 Viscosidade da solução

O gráfico da viscosidade em função da concentração de zeína é apresentado na Figura 11. A efetiva formação de fibras ocorreu nas concentrações de 37.5% a 42.5%. Assim, pode-se concluir que nas condições de processamento estipuladas, as fibras são geradas a partir de soluções com viscosidade compreendida entre 600 mPa.s e 1000 mPa.s. O aspecto da curva revela um caráter não-linear da solução, característico de fluidos não-newtonianos. Esse aspecto demonstra concordância aos estudos de (LIU et al., 2016), onde o comportamento reológico de soluções de zeína e ácido acético glacial foi avaliado em concentrações de 15% a 45%.

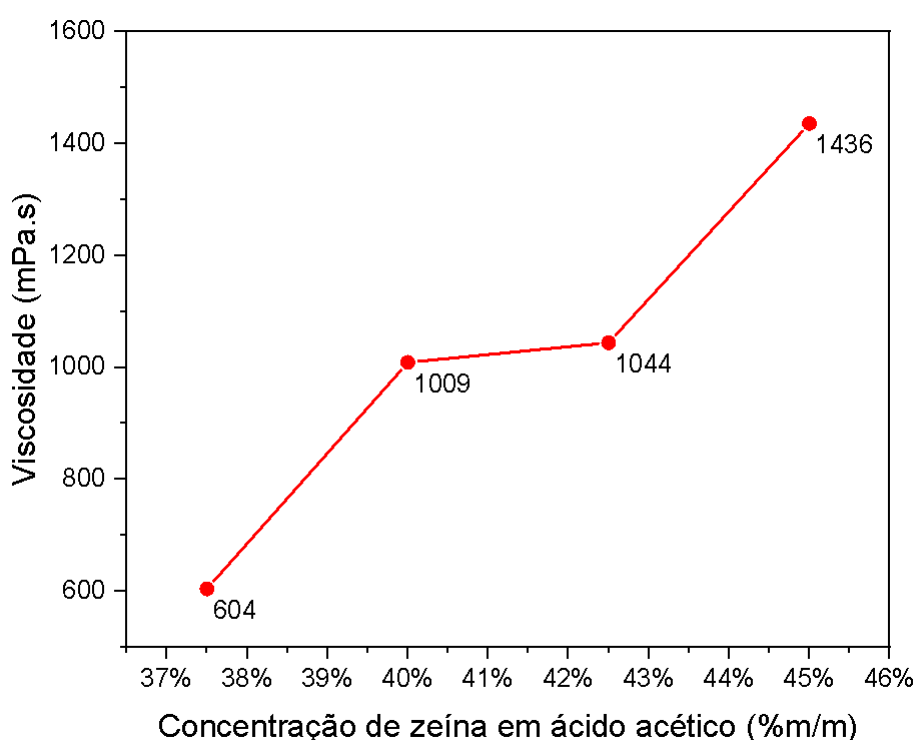


Figura 11 – Viscosidade a solução em função da concentração de zeína.

Fonte: Autoria própria.

5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens de MEV das fibras de zeína são apresentadas nas figuras de 12 a 18. De modo geral, as fibras exibiram superfícies lisas e contínuas. A análise estatística utilizando o teste de Tukey indicou que modificações nos parâmetros de velocidade de rotação e concentração de zeína não tiveram significância estatística no diâmetro médio das fibras, com exceção da amostra 7. Neste caso específico, descobertas anteriores mostraram que, ao contrário do entendimento geral de que o aumento da velocidade de rotação resulta em fibras mais finas, a utilização de uma velocidade de

rotação excessivamente alta pode aumentar o diâmetro da fibra (SKRIVANEK et al., 2022). Conforme Megelski et al. (2002), esse fenômeno ocorre devido à secagem incompleta do jato polimérico durante o percurso até as hastas coletoras, fundindo duas ou mais fibras em um aglomerado de maior diâmetro. A Tabela 3 sumariza os parâmetros de obtenção de cada uma das amostras, bem como o diâmetro médio das fibras obtidas. O teste de Tukey ($p < 0,05$) foi realizado entre amostras. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre as amostras.

Tabela 2 – Conjunto de dados completo dos parâmetros e diâmetro médio das fibras resultantes para cada amostra.

Amostra	Velocidade de rotação (RPM)	Concentração de zeína (%m/m)	Temperatura (°C)	Umidade relativa do ar (%)	Diâmetro médio das fibras (Å)
1	6000	40,0	30,0	44	24714 ^a ± 17106
2	8000	40,0	30,0	37	22580 ^a ± 9742
3	10000	40,0	30,7	36	21566 ^a ± 10355
4	10000	37,5	31,2	36	24173 ^a ± 17310
5	10000	42,5	32,6	47	23870 ^a ± 11790
6	10000	45,0	30,0	48	27900 ^{ab} ± 12330
7	12000	40,0	30,2	41	33880 ^b ± 15173

Fonte: Autoria própria.

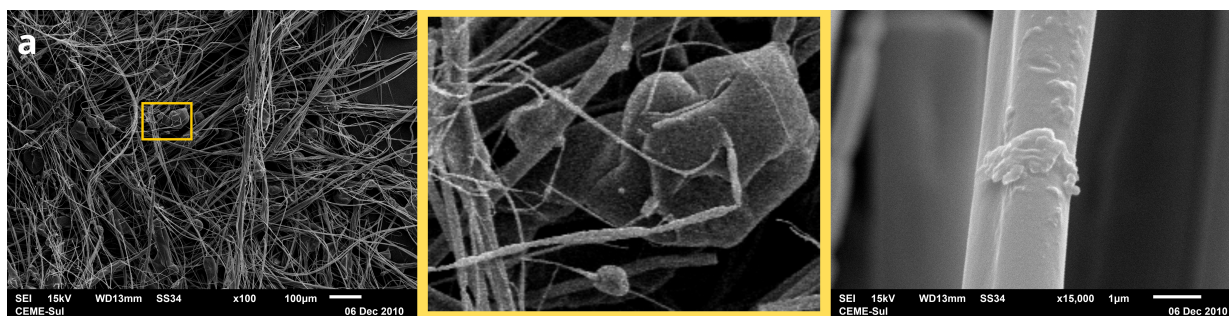


Figura 12 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 1 (40% de zeína, 6000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

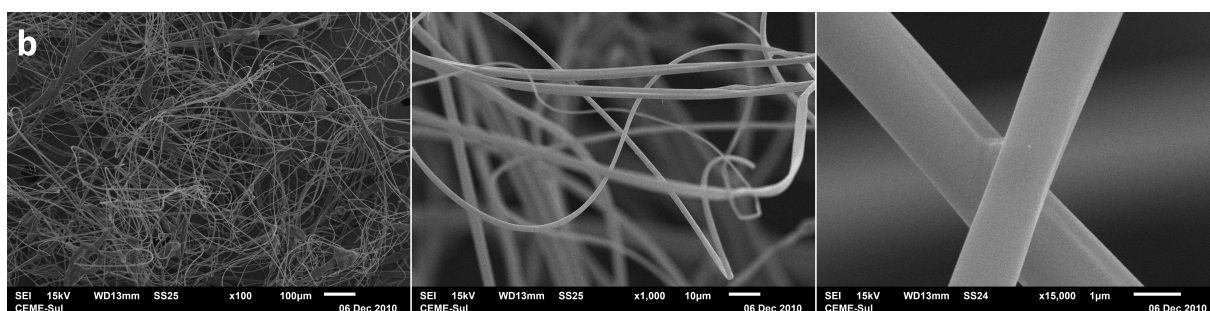


Figura 13 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 2 (40% de zeína, 8000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

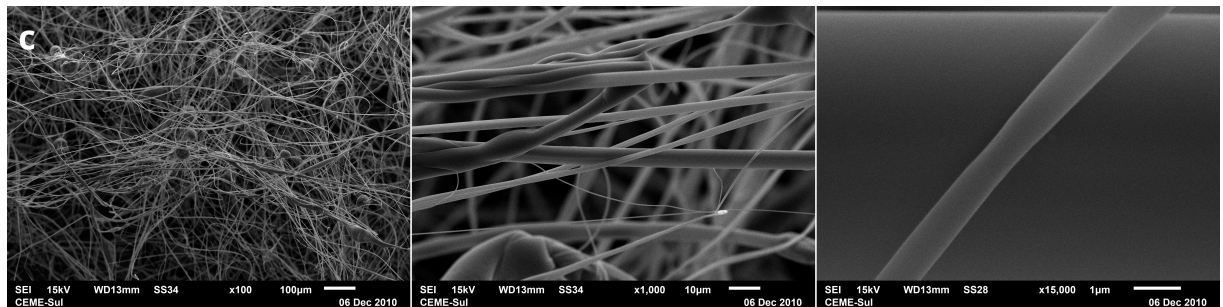


Figura 14 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 3 (40% de zeína, 10000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

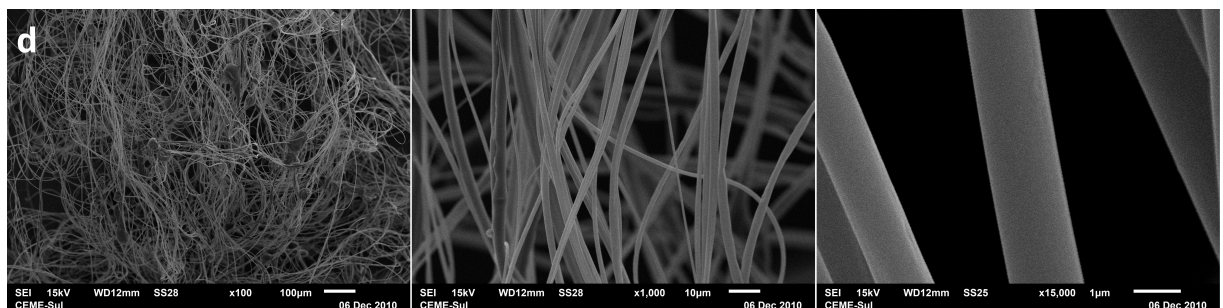


Figura 15 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 4 (37.5% de zeína, 10000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

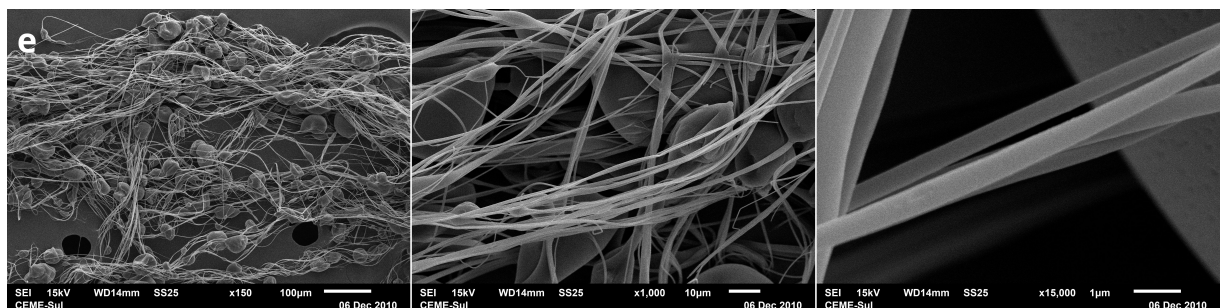


Figura 16 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 5 (42.5% de zeína, 10000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

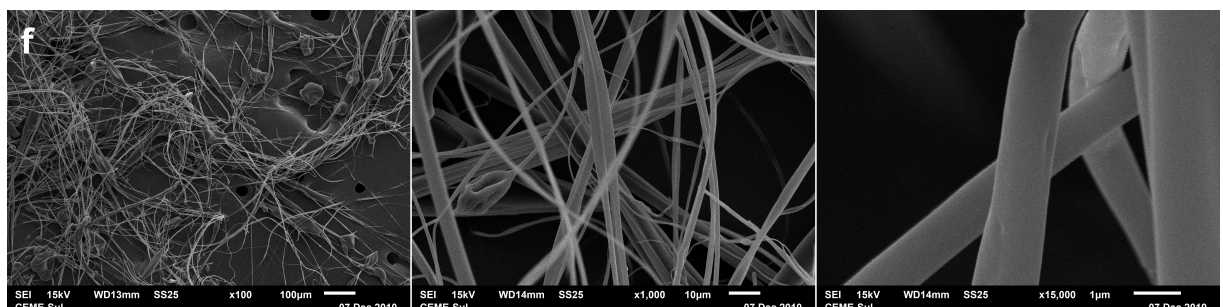


Figura 17 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 6 (45% de zeína, 10000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

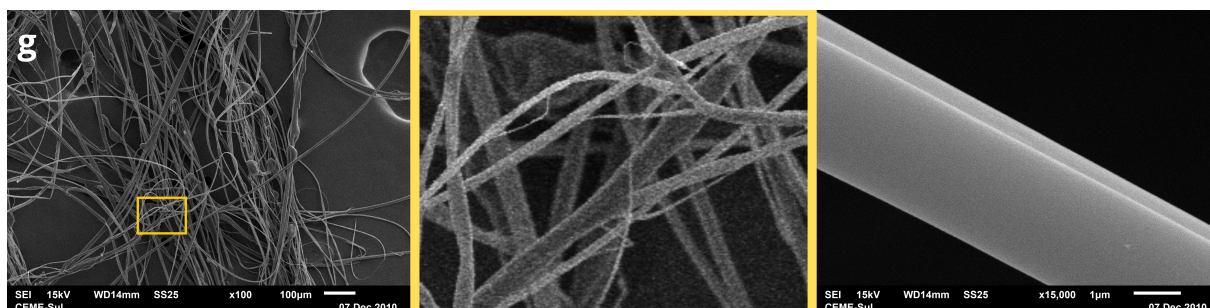


Figura 18 – Imagens da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra 7 (40% de zeína, 12000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

Microesferas poliméricas, também chamadas de *beads*, foram identificadas em todas as fibras, entretanto, sua presença foi particularmente notável nas amostras 1, 5 e 6 (Figuras 13, 17 e 18), que correspondem à amostra produzida com menor velocidade de rotação e às amostras produzidas com as maiores concentrações de zeína, respectivamente. De acordo com as investigações de Vo et al. (2018), a existência de *beads* é atribuída à instabilidade de Rayleigh. Este fenômeno, que descreve a geração de *beads* ao longo do tempo, sugere que ao ser ejetada a solução polimérica adota gradualmente uma configuração esférica para minimizar sua tensão superficial.

A relação entre a velocidade de rotação, a concentração, e a instabilidade de Rayleigh foi discutida anteriormente por Ibrahim e Klingner (2020) e Xu et al. (2023). Conforme os autores, a baixa velocidade de rotação prolonga o tempo necessário para que as hastes sejam alcançadas pelo jato, favorecendo o surgimento de *beads*. Por outro lado, o aumento da concentração da solução polimérica deveria contribuir para a produção de superfícies mais lisas, uma vez que a solidificação das fibras ocorre em um intervalo de tempo menor. No entanto, neste estudo, observou-se um comportamento oposto. É hipotetizado que, neste caso, o aumento da massa da solução pode ter causado oscilações no equipamento, tornando o jato instável em intensidade e trajetória (XU et al., 2023).

A Figura 20 apresenta os histogramas da distribuição de diâmetro para cada amostra, juntamente com as curvas de distribuição normal-log. A amostra 4 (37.5% de zeína), representada na Figura 20d, exibiu uma maior proporção de fibras submicro-métricas, consistente com sua menor concentração de zeína. Contudo, essa observação também apresentou ramificações, isto é, interrupções na continuidade da fibra causadas pelo excesso da velocidade de rotação (SKRIVANEK et al., 2022).

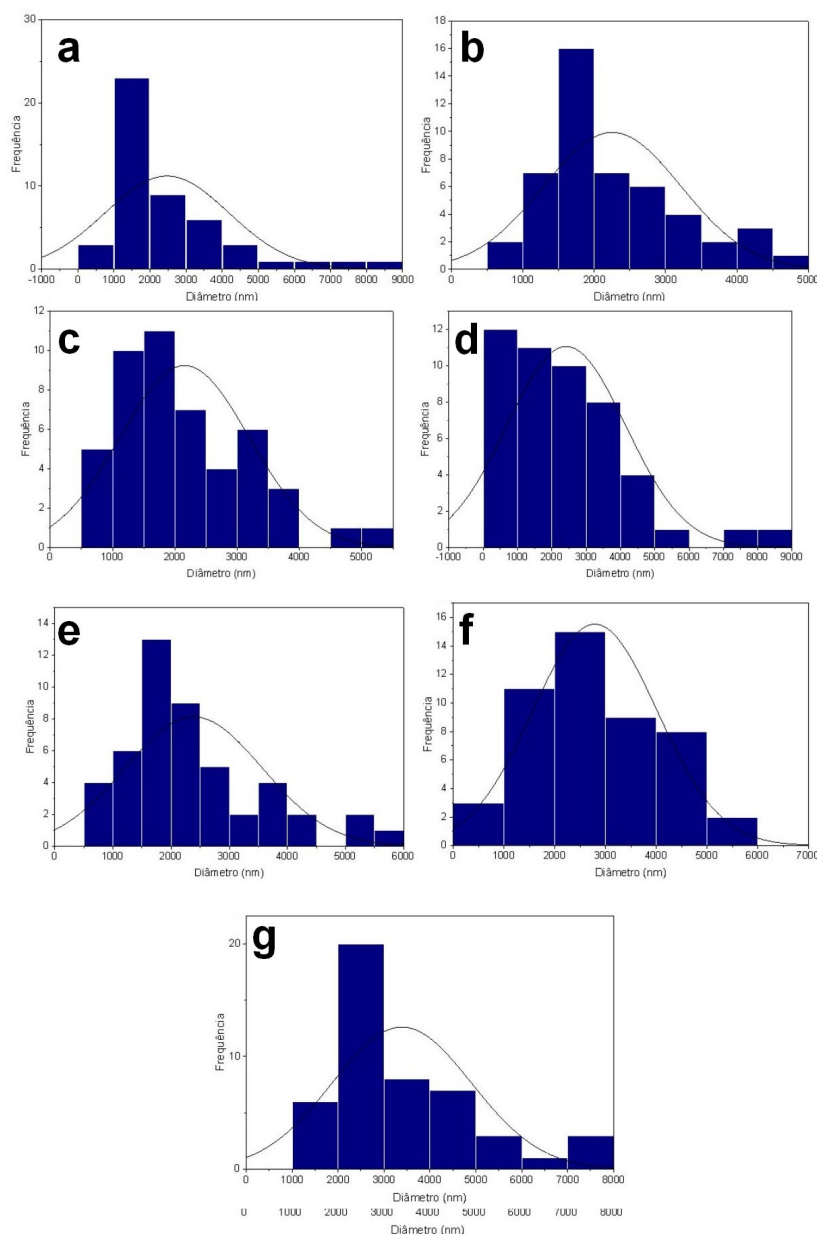


Figura 19 – Histogramas dos diâmetros das fibras, entre 0 e 9000 nm; a) amostra 1 (40% de zeína, 6.000 RPM); b) amostra 2 (40% de zeína, 8.000 RPM); c) amostra 3 (40% de zeína, 10.000 RPM); d) amostra 4 (37.5% de zeína, 10.000 RPM); e) amostra 5 (42.5% de zeína, 10.000 RPM); f) amostra 6 (45% de zeína, 10.000 RPM); g) amostra 7 (40% de zeína, 12.000 RPM).

Fonte: Autoria própria.

5.3 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

Diante da semelhança no diâmetro entre as fibras produzidas, a amostra 3 (40% de zeína, 10.000 RPM) foi escolhida para as demais caracterizações. O critério de seleção foi baseado na massa de fibras geradas a partir da mesma quantidade de solução polimérica. Esses dados podem ser conferidos no Apêndice A.

De acordo com estudos anteriores, os espectros de FTIR, apresentados na Figura 20, confirmam a composição pura das fibras de zeína. Na região da amida A, são ob-

servadas bandas distintas em 3304 cm^{-1} e 2952 cm^{-1} , correspondendo às vibrações de estiramento N-H e ligações O-H, respectivamente. Um pico proeminente também é observado em 1648 cm^{-1} , indicando vibrações de estiramento C=O ligadas à estrutura de -hélice da zeína. Na região da amida II, a banda em 1537 cm^{-1} é atribuída às vibrações de deformação angular da ligação N-H e vibrações de estiramento de C-H (RANIMOL et al., 2021; MIAO et al., 2017). Adicionalmente, a banda em 1451 cm^{-1} corresponde às vibrações de grupos hidrocarbonetos presentes na zeína (DO CARMO et al., 2017). Por fim, o pico em 1238 cm^{-1} corresponde à banda da amida III, resultante das vibrações combinadas de estiramento de C-N e flexão de N-H.

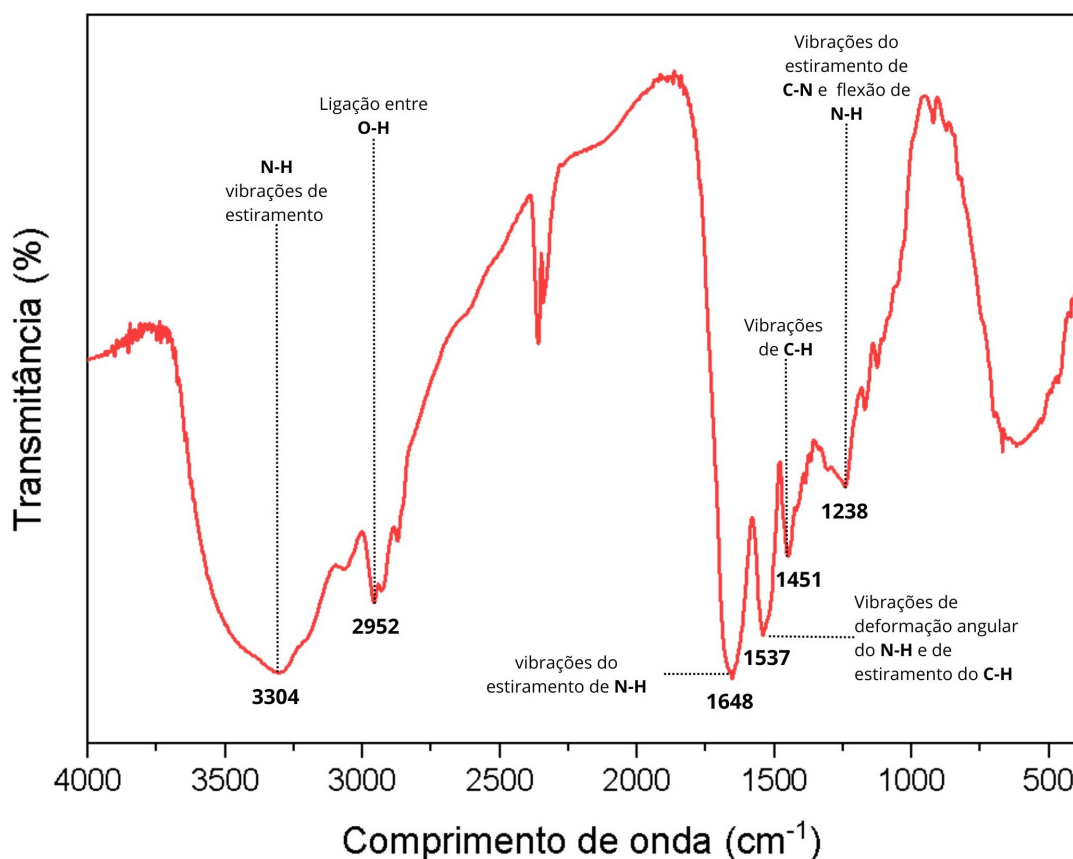


Figura 20 – Espectrograma das fibras de zeína (amostra 3), na região de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , destacando a presença dos grupos funcionais característicos da proteína.

Fonte: Autoria própria.

5.4 Ângulo de Contato Aparente

Embora a zeína seja principalmente composta de aminoácidos hidrofóbicos, as fibras de zeína pura exibiram um comportamento super hidrofílico, passando de um ângulo médio de $122 \pm 4^\circ$ para 0° em aproximadamente 2 ± 1 segundos. A mesma característica foi encontrada nos estudos de Khatri et al. (2020), onde as fibras de zeína foram preparadas com um solvente eutético profundo (DES). Experimentos anteriores indicaram que a rearranjo das cadeias poliméricas durante a evaporação do

solvente pode expor resíduos hidrofílicos, facilitando assim o desenvolvimento de uma superfície polar (LUO et al., 2021). A Tabela 4 apresenta a variação do ângulo de contato das fibras em função do tempo.

Tabela 3 – Variação do Ângulo de Contato ao longo do tempo.

Tempo (s)	Ângulo de Contato Médio (°)
0,00	126,90
0,16	119,32
0,33	114,00
0,50	102,50
0,66	90,00
0,83	81,10
1,00	67,12
1,16	55,27
1,33	35,83

Fonte: Autoria própria.

Além disso, a presença de *beads* na estrutura fibrosa aumenta sua hidrofiliicidade ao acentuar a rugosidade da superfície. Essas irregularidades fornecem às fibras uma maior área superficial, oferecendo locais de ligação adicionais para interações água-fibra (ABDULLAH et al., 2021; RODRICKS et al., 2021). De acordo com Misic et al. (2021) e Song et al. (2022), a propriedade hidrofílica das fibras abre caminho para diversas aplicações, incluindo sua utilização como cápsulas para compostos lipídicos. A característica hidrofílica dessas fibras também confere-lhes uma afinidade com os tecidos biológicos, favorecendo sua aplicação como curativos e *scaffolds* (VARGHESE et al., 2020). Na Figura 21, que exibe o teste de molhabilidade (amostra 3), pode-se observar a rápida absorção de água pelas fibras.

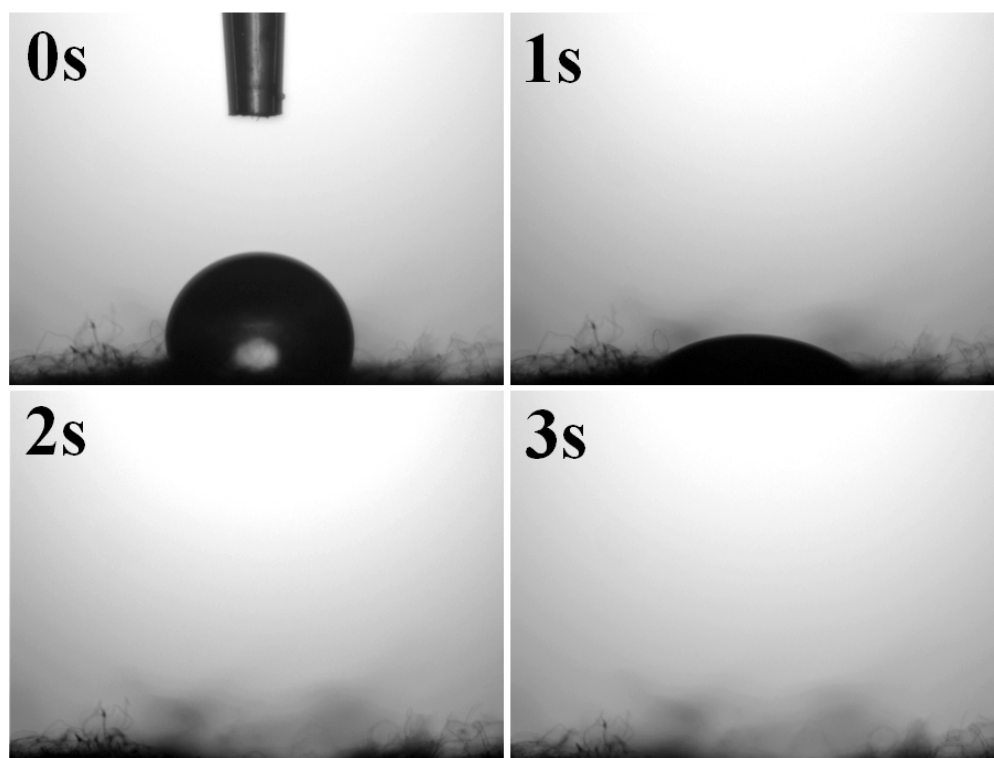


Figura 21 – Teste de molhabilidade das fibras de zeína (amostra 3) no intervalo de 3 segundos.

Fonte: Autoria própria.

5.5 Propriedade antioxidante

Ensaio de captura de radicais são frequentemente utilizados para medir a capacidade antioxidante de materiais, avaliando sua eficácia na neutralização de radicais livres (MOHARRAM; YOUSSEF, 2014). Baseando-se em estudos anteriores que se concentraram em avaliar o potencial antioxidante do zeína, os métodos ABTS e DPPH foram escolhidos para determinar as capacidades antioxidativas das fibras.

Os resultados da capacidade de captura de radicais ABTS e DPPH para as fibras estão indicados na Figura 22. As fibras de zeína pura exibiram atividade antioxidante significativa, com valores de 37% para o ABTS e 59% para o DPPH. Consistente com estudos anteriores, essas descobertas são atribuídas à presença de ácidos graxos e aminoácidos antioxidantes, incluindo histidina, arginina, alanina, valina, metionina e leucina na zeína (WU et al., 2023; ZHANG et al., 2011).

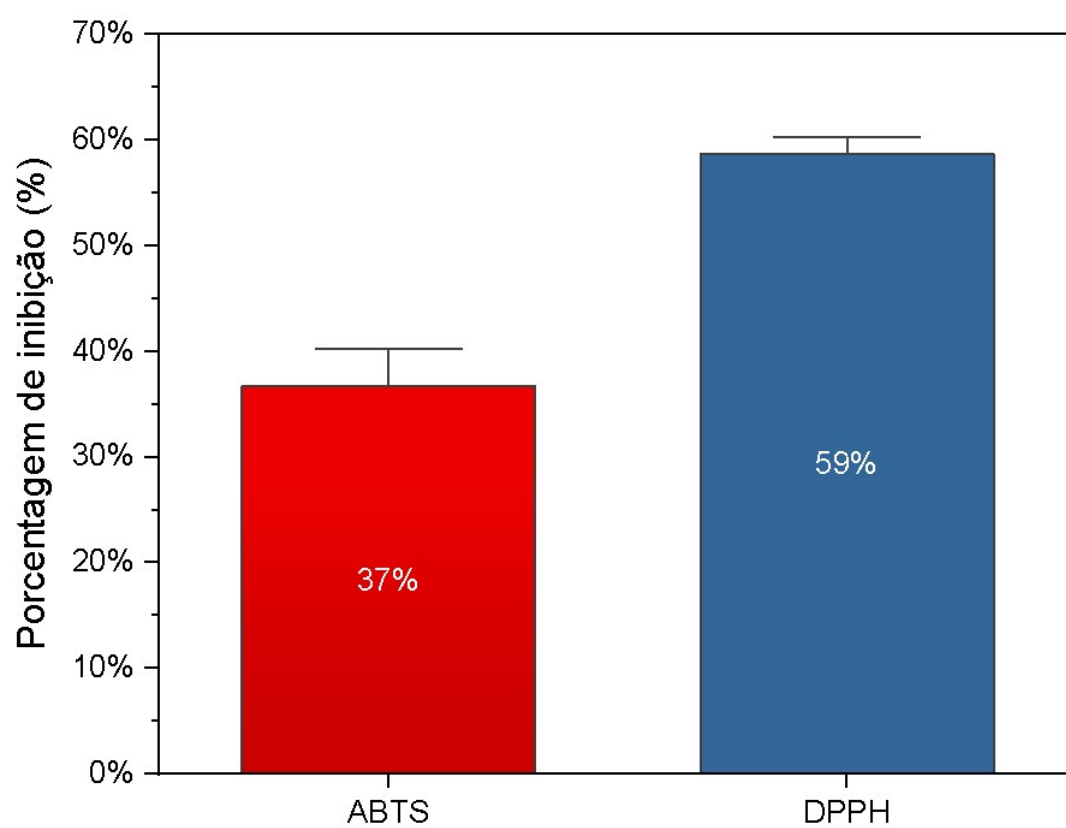


Figura 22 – Porcentagem de inibição dos radicais ABTS e DPPH.

Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

A partir da metodologia estabelecida nesse trabalho, foi possível não apenas desenvolver fibras de zeína através da rotofiação, mas também otimizar o processo ao observar as implicações da alteração dos parâmetros de velocidade de rotação e concentração da solução nas fibras resultantes.

A caracterização das fibras foi importante para avaliar seus aspectos morfológicos, físico-químicos e funcionais. Inicialmente, a microscopia eletrônica de varredura revelou a formação de fibras contínuas com superfícies regulares, sendo que a variação dos parâmetros afetou o diâmetro médio e a quantidade de *beads*. Predominantemente, as fibras apresentaram diâmetro em escala micrométrica, com uma presença menos frequente de fibras submicrométricas.

Posteriormente, a análise por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) confirmou a composição pura das fibras, indicando que o processo promoveu a completa evaporação do solvente. No teste de Ângulo de Contato Aparente, observou-se um aumento na super-hidrofiliabilidade das fibras, atribuído à sua conformação fibrosa. Por fim, testes de neutralização de radicais livres revelaram propriedades antioxidantes intrínsecas nas fibras de zeína.

Diante do exposto, evidencia-se que a rotofiação se configura como uma metodologia eficaz na produção de fibras de zeína, permitindo o processamento do material de maneira simples, rápida e segura. Apesar de, por vezes, serem apontados como defeitos, os *beads* podem ser explorados a favor do encapsulamento de compostos que requerem proteção contra o estresse oxidativo, que necessitam de uma liberação prolongada. No entanto, a obtenção de fibras alinhadas e sem microesferas ainda é um desafio pendente, demandando ajustes no equipamento e na solução para oferecer ao operador maior controle sobre o produto final.

Consequentemente, ratifica-se que a utilização da rotofiação na produção de fibras de zeína possui o potencial de torná-las uma alternativa tangível e sustentável aos polímeros sintéticos, para além do âmbito científico.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, sugere-se realizar uma análise abrangente da pegada de carbono associada à produção das fibras de zeína, com o objetivo de avaliar se há uma efetiva redução das emissões de gases do efeito estufa. Caso essa redução seja confirmada, é necessário avaliar se o impacto ambiental resultante é significativo o bastante para justificar a preferência pelo material em detrimento dos plásticos sintéticos. Essa avaliação deve abranger todas as fases do processo produtivo, desde o preparo do solo, o plantio do milho até as etapas de colheita, transporte, extração da zeína e produção das fibras.

Adicionalmente, sugere-se uma avaliação precisa do mecanismo de evaporação do ácido acético das fibras, com a finalidade de determinar se sua integral evaporação foi atingida durante o processo. Caso resíduos do solvente sejam encontrados, investigações posteriores devem ser conduzidas para elucidar suas eventuais interferências nas características das fibras. Por fim, sugere-se a exploração de métodos para a recuperação do ácido acético evaporado, visando minimizar a emissão de resíduos e estimular o reaproveitamento o solvente.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, M. F.; ANDRIYANA, A.; MUHAMAD, F.; ANG, B. C. Effect of core-to-shell flowrate ratio on morphology, crystallinity, mechanical properties and wettability of poly (lactic acid) fibers prepared via modified coaxial electrospinning. **Polymer**, [S.l.], v.237, p.124378, 2021.
- ABRAHMS-KAVUNENKO, S. Toward an anthropology of plastics. **Journal of Material Culture**, [S.l.], v.28, n.1, p.3–23, 2023.
- AHMADI, L.; SHADBAHR, J.; SHIM, G. W.; HAWCO, M. Review of the global evolution of regulations on single-use plastics and lessons drawn for Canada. **Waste Management & Research**, [S.l.], p.0734242X231184451, 2023.
- ALBERTS, B. et al. **Molecular Biology of the Cell**: Seventh International Student Edition with Registration Card. [S.l.]: Norton, 2022.
- ALI, S. S. et al. Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. **Bioresource Technology**, [S.l.], p.127869, 2022.
- ATICI, B.; ÜNLÜ, C. H.; YANILMAZ, M. A review on centrifugally spun fibers and their applications. **Polymer Reviews**, [S.l.], v.62, n.1, p.1–64, 2022.
- BAHL, S.; DOLMA, J.; SINGH, J. J.; SEHGAL, S. Biodegradation of plastics: A state of the art review. **Materials Today: Proceedings**, [S.l.], v.39, p.31–34, 2021.
- BAI, L. et al. Antioxidant activities of natural polysaccharides and their derivatives for biomedical and medicinal applications. **Antioxidants**, [S.l.], v.11, n.12, p.2491, 2022.
- BARANWAL, J. et al. Biopolymer: A sustainable material for food and medical applications. **Polymers**, [S.l.], v.14, n.5, p.983, 2022.
- BARBOSA, J. A.; CONWAY, B. R.; MERCHANT, H. A. Going natural: using polymers from nature for gastroresistant applications. **British Journal of Pharmacy**, [S.l.], v.2, n.1, p.14–30, 2017.

BEXELL, M.; JÖNSSON, K. Responsibility and the United Nations' sustainable development goals. In: FORUM FOR DEVELOPMENT STUDIES, 2017. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2017. v.44, n.1, p.13–29.

BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M.-E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT-Food science and Technology**, [S.l.], v.28, n.1, p.25–30, 1995.

BRASIL. **Produção de grãos É estimada em 272,5 Milhões de Toneladas com clima favorável para as Culturas de 2ª Safra**. [S.l.]: Companhia Nacional do Abastacimento (CONAB), 2022. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4684-producao-de-graos-e-estimada-em-272-5-milhoes-de-toneladas-com-clima-favoravel-para-as-culturas-de-2-safra>>.

CHAMAS, A. et al. Degradation rates of plastics in the environment. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, [S.l.], v.8, n.9, p.3494–3511, 2020.

CHINNAPPAN, B. A.; KRISHNASWAMY, M.; XU, H.; HOQUE, M. E. Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: effects of process parameters. **Polymers**, [S.l.], v.14, n.18, p.3719, 2022.

ÇIRKIN, D. S.; YÜKSEK, M. Fibroin nanofibers production by electrospinning method. **Turkish Journal of Chemistry**, [S.l.], v.45, n.4, p.1279–1298, 2021.

COLUSSI, R. et al. Postharvest quality and antioxidant activity extension of strawberry fruit using allyl isothiocyanate encapsulated by electrospun zein ultrafine fibers. **Lwt**, [S.l.], v.143, p.111087, 2021.

COSTA, A. et al. Bioplastics: Innovation for Green Transition. **Polymers**, [S.l.], v.15, n.3, p.517, 2023.

CRUZ, R. M. et al. Bioplastics for Food Packaging: Environmental Impact, trends and regulatory aspects. **Foods**, [S.l.], v.11, n.19, p.3087, 2022.

DALWADI, S. et al. The Integration of Biopolymer-Based Materials for Energy Storage Applications: A Review. **International Journal of Molecular Sciences**, [S.l.], v.24, n.4, p.3975, 2023.

DEFRATES, K. et al. Air-jet spinning corn zein protein nanofibers for drug delivery: Effect of biomaterial structure and shape on release properties. **Materials Science and Engineering: C**, [S.l.], v.118, p.111419, 2021.

DO CARMO, C. S. et al. Microencapsulation of α -tocopherol with zein and β -cyclodextrin using spray drying for colour stability and shelf-life improvement of fruit beverages. **RSC advances**, [S.l.], v.7, n.51, p.32065–32075, 2017.

DRAGO, E. et al. Zein electrospun fibers purification and vanillin impregnation in a one-step supercritical process to produce safe active packaging. **Food Hydrocolloids**, [S.I.], v.122, p.107082, 2022.

DUAN, Y. et al. The movement and forces of spinning solution in the nozzle during high-speed centrifugal spinning. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, [S.I.], v.14, p.1558925019828207, 2019.

DUVNJAK, M.; KLJAK, K.; GRBEŠA, D. Nitrogen Storage in Crops: Case Study of Zeins in Maize. In: **Nitrogen in Agriculture-Physiological, Agricultural and Ecological Aspects**. [S.I.]: IntechOpen, 2021.

DZIERZKOWSKA, E. et al. Effects of process parameters on structure and properties of melt-blown poly (lactic acid) nonwovens for skin regeneration. **Journal of Functional Biomaterials**, [S.I.], v.12, n.1, p.16, 2021.

FARAC, N.-F. **Green marketing in the plastic era**: Honesty or hype? Disponível em: <<https://greenchemuoft.wordpress.com/2019/09/13/green-marketing-in-the-plastic-era-honesty-or-hype/>>.

GAO, Y. et al. Physicochemical properties of zein films cross-linked with glutaraldehyde. **Polymer Bulletin**, [S.I.], v.79, n.7, p.4647–4665, 2022.

GAUR, V. K. et al. A review on the effect of micro-and nano-plastics pollution on the emergence of antimicrobial resistance. **Chemosphere**, [S.I.], v.311, p.136877, 2023.

GAZZOLA, W. H.; BENSON, R. S.; CARVER, W. Meltblown Polylactic Acid Nanowebs as a Tissue Engineering Scaffold. **Annals of Plastic Surgery**, [S.I.], v.83, n.6, p.716–721, 2019.

GEORGIEV, D. D.; GLAZEBROOK, J. F. On the quantum dynamics of Davydov solitons in protein α -helices. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [S.I.], v.517, p.257–269, 2019.

GEYER, R. Production, use, and fate of synthetic polymers. In: **Plastic waste and recycling**. [S.I.]: Elsevier, 2020. p.13–32.

GHASEMI, S. et al. Evaluation of the effects of zein incorporation on physical, mechanical, and biological properties of polyhydroxybutyrate electrospun scaffold for bone tissue engineering applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S.I.], v.253, p.126843, 2023.

GOBI, R.; RAVICHANDIRAN, P.; BABU, R. S.; YOO, D. J. Biopolymer and synthetic polymer-based nanocomposites in wound dressing applications: a review. **Polymers**, [S.I.], v.13, n.12, p.1962, 2021.

HARAM, L. E.; CARLTON, J. T.; RUIZ, G. M.; MAXIMENKO, N. A. A plasticene lexicon. **Marine pollution bulletin**, [S.l.], v.150, p.110714, 2020.

HASSAN, E. A.; HATHOUT, R. M.; GAD, H. A.; SAMMOUR, O. A. A holistic review on zein nanoparticles and their use in phytochemicals delivery. **Journal of Drug Delivery Science and Technology**, [S.l.], p.103460, 2022.

HEIDBREDER, L. M.; BABLOK, I.; DREWS, S.; MENZEL, C. Tackling the plastic problem: A review on perceptions, behaviors, and interventions. **Science of the total environment**, [S.l.], v.668, p.1077–1093, 2019.

HELLER, M. C.; MAZOR, M. H.; KEOLEIAN, G. A. Plastics in the US: toward a material flow characterization of production, markets and end of life. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v.15, n.9, p.094034, 2020.

IBGE. **IBGE prevê safra recorde de 296,2 milhões de toneladas para 2023, com alta de 12,6% frente a 2022**. [S.l.]: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/36073-ibge-preve-safra-recorde-de-296-2-milhoes-de-toneladas-para-2023-com-alta-de-12-6-frente-a-2022>>.

IBRAHIM, H. M.; KLINGNER, A. A review on electrospun polymeric nanofibers: Production parameters and potential applications. **Polymer Testing**, [S.l.], v.90, p.106647, 2020.

IBRAHIM, M. A. et al. A Review of Chitosan and Chitosan Nanofiber: Preparation, Characterization, and Its Potential Applications. **Polymers**, [S.l.], v.15, n.13, p.2820, 2023.

IBRAHIM, N. I. et al. Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. **Coatings**, [S.l.], v.11, n.11, p.1423, 2021.

JASKI, A. C. et al. Zein-a plant-based material of growing importance: New perspectives for innovative uses. **Industrial Crops and Products**, [S.l.], v.186, p.115250, 2022.

KABIR, E. et al. Prospects of biopolymer technology as an alternative option for non-degradable plastics and sustainable management of plastic wastes. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.258, p.120536, 2020.

KASAAI, M. R. Zein and zein-based nano-materials for food and nutrition applications: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [S.l.], v.79, p.184–197, 2018.

KHATRI, M. et al. Zein nanofibers via deep eutectic solvent electrospinning: Tunable morphology with super hydrophilic properties. **Scientific Reports**, [S.l.], v.10, n.1, p.15307, 2020.

KONG, B. et al. Tailoring micro/nano-fibers for biomedical applications. **Bioactive Materials**, [S.l.], v.19, p.328–347, 2023.

KUMAR, R. et al. Impacts of plastic pollution on ecosystem services, sustainable development goals, and need to focus on circular economy and policy interventions. **Sustainability**, [S.l.], v.13, n.17, p.9963, 2021.

KWAK, B. E.; YOO, H. J.; LEE, E.; KIM, D. H. Large-scale centrifugal multispinning production of polymer micro-and nanofibers for mask filter application with a potential of cospinning mixed multicomponent fibers. **ACS macro letters**, [S.l.], v.10, n.3, p.382–388, 2021.

LABIB, G. Overview on zein protein: A promising pharmaceutical excipient in drug delivery systems and tissue engineering. **Expert opinion on drug delivery**, [S.l.], v.15, n.1, p.65–75, 2018.

LAWTON, J. W. Zein: A history of processing and use. **Cereal chemistry**, [S.l.], v.79, n.1, p.1–18, 2002.

LEAL FILHO, W. et al. An overview of the problems posed by plastic products and the role of extended producer responsibility in Europe. **Journal of cleaner production**, [S.l.], v.214, p.550–558, 2019.

LEBRETON, L.; ANDRADY, A. Future scenarios of global plastic waste generation and disposal. **Palgrave Communications**, [S.l.], v.5, n.1, p.1–11, 2019.

LEYVA-PORRAS, C. et al. Application of antioxidants as an alternative improving of shelf life in foods. **Polysaccharides**, [S.l.], v.2, n.3, p.594–607, 2021.

LI, S. et al. Development of Zein/tannic acid nanoparticles as antioxidants for oxidation inhibition of blackberry seed oil emulsions. **Food Chemistry**, [S.l.], v.403, p.134236, 2023.

LI, Y. et al. Understanding the dissolution of α -zein in aqueous ethanol and acetic acid solutions. **The Journal of Physical Chemistry B**, [S.l.], v.116, n.39, p.12057–12064, 2012.

LI, Z. et al. High efficiency fabrication of chitosan composite nanofibers with uniform morphology via centrifugal spinning. **Polymers**, [S.l.], v.11, n.10, p.1550, 2019.

LIU, F. et al. Preparation of zein fibers using solution blow spinning method. **Journal of food science**, [S.l.], v.81, n.12, p.N3015–N3025, 2016.

LIU, G.; AN, D.; LI, J.; DENG, S. Zein-based nanoparticles: Preparation, characterization, and pharmaceutical application. **Frontiers in Pharmacology**, [S.l.], v.14, p.1120251, 2023.

LUO, S. et al. Fabrication and characterization of dextran/zein hybrid electrospun fibers with tailored properties for controlled release of curcumin. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, [S.l.], v.101, n.15, p.6355–6367, 2021.

MADDUMA-BANDARAGE, U. S.; MADIHALLY, S. V. Synthetic hydrogels: Synthesis, novel trends, and applications. **Journal of Applied Polymer Science**, [S.l.], v.138, n.19, p.50376, 2021.

MANGAL, M.; RAO, C. V.; BANERJEE, T. Bioplastic: an eco-friendly alternative to non-biodegradable plastic. **Polymer International**, [S.l.], v.72, n.11, p.984–996, 2023.

MATTICE, K. D.; MARANGONI, A. G. Evaluating the use of zein in structuring plant-based products. **Current research in food science**, [S.l.], v.3, p.59–66, 2020.

MEGELSKI, S.; STEPHENS, J. S.; CHASE, D. B.; RABOLT, J. F. Micro-and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. **Macromolecules**, [S.l.], v.35, n.22, p.8456–8466, 2002.

MENG, X. et al. Production of three-dimensional fiber needle-punching composites from denim waste for utilization as furniture materials. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.281, p.125321, 2021.

MIAO, Y.; YANG, R.; DENG, D. Y.; ZHANG, L.-M. Poly (L-lysine) modified zein nanofibrous membranes as efficient scaffold for adhesion, proliferation, and differentiation of neural stem cells. **Rsc Advances**, [S.l.], v.7, n.29, p.17711–17719, 2017.

MISIC, Z.; MUFFLER, K.; SYDOW, G.; KUENTZ, M. Novel starch-based PVA thermoplastic capsules for hydrophilic lipid-based formulations. **Journal of pharmaceutical sciences**, [S.l.], v.101, n.12, p.4516–4528, 2012.

MIYOSHI, T.; TOYOHARA, K.; MINEMATSU, H. Preparation of ultrafine fibrous zein membranes via electrospinning. **Polymer international**, [S.l.], v.54, n.8, p.1187–1190, 2005.

MOHARRAM, H.; YOUSSEF, M. Methods for determining the antioxidant activity: A review. **Alexandria Journal of Food Science and Technology**, [S.l.], v.11, n.1, p.31–42, 2014.

MUJTABA, M. et al. Novel, multifunctional mucilage composite films incorporated with cellulose nanofibers. **Food Hydrocolloids**, [S.l.], v.89, p.20–28, 2019.

NATESAN, U. et al. Spatial distribution of microplastic concentration around landfill sites and its potential risk on groundwater. **Chemosphere**, [S.l.], v.277, p.130263, 2021.

O'CONNOR, R.; CAHILL, P.; MCGUINNESS, G. Effect of electrospinning parameters on the mechanical and morphological characteristics of small diameter PCL tissue engineered blood vessel scaffolds having distinct micro and nano fibre populations—a DOE approach. **Polymer Testing**, [S.l.], v.96, p.107119, 2021.

OPOKU, A. SDG2030: A sustainable built environment's role in achieving the post-2015 United Nations Sustainable Development Goals. In: ANNUAL ARCOM CONFERENCE, 32., 2016. **Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2016. v.2, p.1149–1158.

ÖZDEMİR, C.; GÜNER, A. Solubility profiles of poly (ethylene glycol)/solvent systems, I: Qualitative comparison of solubility parameter approaches. **European Polymer Journal**, [S.l.], v.43, n.7, p.3068–3093, 2007.

PADUA, G. W.; GUARDIOLA, L. V. Microcapsules produced from zein. In: **Microencapsulation and microspheres for food applications**. [S.l.]: Elsevier, 2015. p.3–20.

PATHAK, G.; NICHTER, M. The anthropology of plastics: an agenda for local studies of a global matter of concern. **Medical anthropology quarterly**, [S.l.], v.33, n.3, p.307–326, 2019.

PÉREZ-GUZMÁN, C. J.; CASTRO-MUÑOZ, R. A review of zein as a potential biopolymer for tissue engineering and nanotechnological applications. **Processes**, [S.l.], v.8, n.11, p.1376, 2020.

PEREZ-PUYANA, V.; JIMÉNEZ-ROSADO, M.; ROMERO, A.; GUERRERO, A. Polymer-based scaffolds for soft-tissue engineering. **Polymers**, [S.l.], v.12, n.7, p.1566, 2020.

PIORKOWSKA, E. Overview of biobased polymers. **Thermal Properties of Bio-based Polymers**, [S.l.], p.1–35, 2019.

PRIYA, S. et al. Polysaccharide-based nanofibers for pharmaceutical and biomedical applications: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S.l.], 2022.

QUECHOLAC-PIÑA, X. et al. Degradation of plastics under anaerobic conditions: A short review. **Polymers**, [S.l.], v.12, n.1, p.109, 2020.

RAHMAN, M. Z. et al. Advanced biopolymers for automobile and aviation engineering applications. **Journal of Polymer Research**, [S.l.], v.30, n.3, p.106, 2023.

RAJENDRAN, S. **Advanced textiles for wound care**. [S.l.]: Woodhead Publishing, 2018.

RANIMOL, G.; PAUL, C.; SUNKAR, S. Optimization and efficacy studies of Laccase immobilized on Zein-Polyvinyl pyrrolidone nano fibrous membrane in decolorization of Acid Red 1. **Water Science and Technology**, [S.l.], v.84, n.10-11, p.2703–2717, 2021.

RANUM, P.; PEÑA-ROSAS, J. P.; GARCIA-CASAL, M. N. Global maize production, utilization, and consumption. **Annals of the new York academy of sciences**, [S.l.], v.1312, n.1, p.105–112, 2014.

RASMUSSEN, S. C. From parkesine to celluloid: The birth of organic plastics. **Angewandte Chemie**, [S.l.], v.133, n.15, p.8090–8094, 2021.

RE, R. et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. **Free radical biology and medicine**, [S.l.], v.26, n.9-10, p.1231–1237, 1999.

RIM, N. G.; SHIN, C. S.; SHIN, H. Current approaches to electrospun nanofibers for tissue engineering. **Biomedical materials**, [S.l.], v.8, n.1, p.014102, 2013.

RODRICKS, C. W.; GREENFELD, I.; WAGNER, H. D. Polymer beads as interfacial obstacles in fibre composites. **Composites science and technology**, [S.l.], v.210, p.108793, 2021.

RODRIGUES, R. et al. 2040 greenhouse gas reduction targets and energy transitions in line with the EU Green Deal. , [S.l.], 2023.

ROGALSKI, J. J.; BASTIAANSEN, C. W.; PEIJS, T. PA6 nanofibre production: a comparison between rotary jet spinning and electrospinning. **Fibers**, [S.l.], v.6, n.2, p.37, 2018.

ROSENBOOM, J.-G.; LANGER, R.; TRAVERSO, G. Bioplastics for a circular economy. **Nature Reviews Materials**, [S.l.], v.7, n.2, p.117–137, 2022.

SADEGHZADE, S. et al. Soft acrylate monomer-based optically clear adhesive for foldable electronics: Mechanical characterization and fractography analysis under large strain. **European Polymer Journal**, [S.l.], v.197, p.112337, 2023.

SAMIR, A.; ASHOUR, F. H.; HAKIM, A. A.; BASSYOUNI, M. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications. **Npj Materials Degradation**, [S.l.], v.6, n.1, p.68, 2022.

SANCHES, A.; SALES, C. **Expressivo aumento nas exportações brasileiras de milho impõe mudanças na dinâmica do mercado nacional**. [S.l.]: USP, 2022. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/opinio-ao-cepea/expressivo-aumento-nas-exportacoes-brasileiras-de-milho-impoe-mudancas-na-dinamica-do-mercado-nacional.aspx>: :text=28

SANTAGATA, R.; RIPA, M.; GENOVESE, A.; ULGIATI, S. Food waste recovery pathways: Challenges and opportunities for an emerging bio-based circular economy. A systematic review and an assessment. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.286, p.125490, 2021.

SARKINGOBIR, Y.; BELLO, M.; YABO, H. Harmful effects of plastics on air quality. **Academia Letters**, [S.l.], p.2, 2021.

SHACKELFORD, J. F.; ALEXANDER, W. **CRC materials science and engineering handbook**. [S.l.]: CRC press, 2016.

SHEN, M. et al. (Micro) plastic crisis: un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change. **Journal of Cleaner Production**, [S.l.], v.254, p.120138, 2020.

SKRIVANEK, J. et al. Optimization of the spinneret rotation speed and airflow parameters for the nozzleless forcespinning of a polymer solution. **Polymers**, [S.l.], v.14, n.5, p.1042, 2022.

SONG, T. et al. Recent advances in bio-based smart active packaging materials. **Food**, [S.l.], v.11, n.15, p.2228, 2022.

STATISTA. **Annual Production of Plastics Worldwide from 1950 to 2021**. [S.l.]: Statista Hamburg, Germany, 2021.

TAMASIGA, P.; MIRI, T.; ONYEAKA, H.; HART, A. Food waste and circular economy: Challenges and opportunities. **Sustainability**, [S.l.], v.14, n.16, p.9896, 2022.

TEMESGEN, S.; RENNERT, M.; TESFAYE, T.; NASE, M. Review on spinning of biopolymer fibers from starch. **Polymers**, [S.l.], v.13, n.7, p.1121, 2021.

TOBISZEWSKI, M.; NAMIEŚNIK, J.; PENA-PEREIRA, F. Environmental risk-based ranking of solvents using the combination of a multimedia model and multi-criteria decision analysis. **Green Chemistry**, [S.l.], v.19, n.4, p.1034–1042, 2017.

TOKMAKOV, A. A.; KUROTANI, A.; SATO, K.-I. Protein pl and Intracellular Localization. **Frontiers in Molecular Biosciences**, [S.l.], v.8, 2021.

TORTORELLA, S. et al. Zein as a versatile biopolymer: different shapes for different biomedical applications. **RSC advances**, [S.I.], v.11, n.62, p.39004–39026, 2021.

VARGHESE, S. A. et al. Novel biodegradable polymer films based on poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) and Ceiba pentandra natural fibers for packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, [S.I.], v.25, p.100538, 2020.

VERED, G.; SHENKAR, N. Monitoring plastic pollution in the oceans. **Current Opinion in Toxicology**, [S.I.], v.27, p.60–68, 2021.

VO, P. P. et al. Centrifugally spun recycled PET: Processing and characterization. **Polymers**, [S.I.], v.10, n.6, p.680, 2018.

VOLLMER, I. et al. Plastic waste conversion over a refinery waste catalyst. **Angewandte Chemie International Edition**, [S.I.], v.60, n.29, p.16101–16108, 2021.

WALKER, T. R. (Micro) plastics and the UN sustainable development goals. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, [S.I.], v.30, p.100497, 2021.

WU, X. et al. Development of an edible food packaging gelatin/zein based nanofiber film for the shelf-life extension of strawberries. **Food Chemistry**, [S.I.], p.136652, 2023.

XAYACHAK, T. et al. Pyrolysis for plastic waste management: An engineering perspective. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S.I.], p.108865, 2022.

XIA, L. et al. Centrifugal spinning of lignin amine/cellulose acetate nanofiber for heavy metal ion adsorption. **Fibers and Polymers**, [S.I.], p.1–9, 2022.

XU, H. et al. A Review on Current Nanofiber Technologies: Electrospinning, Centrifugal Spinning, and Electro-Centrifugal Spinning. **Macromolecular Materials and Engineering**, [S.I.], v.308, n.3, p.2200502, 2023.

XUE, J.; WU, T.; DAI, Y.; XIA, Y. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications. **Chemical reviews**, [S.I.], v.119, n.8, p.5298–5415, 2019.

YARADODDI, J. S. et al. Bio-based material from fruit waste of orange peel for industrial applications. **Journal of Materials Research and Technology**, [S.I.], v.17, p.3186–3197, 2022.

YOSHIOKA, S. A. Método inovador para extrair proteína do milho deve inserir mais bioplásticos no mercado. **Portal USP São Carlos**, [S.I.], 2021.

ZANNINI LUZ, H.; SANTOS, L. A. Loureiro dos. Centrifugal spinning for biomedical use: a review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, [S.I.], p.1–16, 2022.

ZDIRI, K. et al. Alginate-Based Bio-Composites and Their Potential Applications. **Journal of Functional Biomaterials**, [S.l.], v.13, n.3, p.117, 2022.

ZHANG, B.; LUO, Y.; WANG, Q. Effect of acid and base treatments on structural, rheological, and antioxidant properties of α -zein. **Food Chemistry**, [S.l.], v.124, n.1, p.210–220, 2011.

ZHANG, B. et al. Facile preparation of biocompatible and antibacterial water-soluble films using polyvinyl alcohol/carboxymethyl chitosan blend fibers via centrifugal spinning. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], p.121062, 2023.

ZHANG, X. et al. Zein as a structural protein in gluten-free systems: An overview. **Food Science and Human Wellness**, [S.l.], v.10, n.3, p.270–277, 2021.

ZHANG, Y.; PEDERSEN, J. N.; ESER, B. E.; GUO, Z. Biodegradation of polyethylene and polystyrene: From microbial deterioration to enzyme discovery. **Biotechnology Advances**, [S.l.], v.60, p.107991, 2022.

ZHANG, Z.-M.; DUAN, Y.-S.; XU, Q.; ZHANG, B. A review on nanofiber fabrication with the effect of high-speed centrifugal force field. **Journal of Engineered Fibers and Fabrics**, [S.l.], v.14, p.1558925019867517, 2019.

ZHAO, J. R. et al. A mini-review on building insulation materials from perspective of plastic pollution: Current issues and natural fibres as a possible solution. **Journal of Hazardous Materials**, [S.l.], v.438, p.129449, 2022.

ZHOU, A. et al. Microplastics and their potential effects on the aquaculture systems: a critical review. **Reviews in Aquaculture**, [S.l.], v.13, n.1, p.719–733, 2021.

Apêndices

APÊNDICE A – Critério de seleção da amostra a ser caracterizada

Após a coleta, as fibras foram cuidadosamente pesadas utilizando uma balança analítica. Com base nesse resultado, a amostra 3, que apresentou a maior massa, foi escolhida para conduzir as demais etapas de caracterização. A decisão de utilizar uma amostra representativa fundamentou-se na constatação de que as fibras não exibiram diferenças significativas em seus diâmetros médios e na ausência disparidades expressivas em suas propriedades que pudessem levar a resultados distintos. A Tabela 5 relaciona os parâmetros de processamento à massa de fibras obtidas ao fim do processo, a partir de uma quantidade fixa de solução.

Tabela 4 – Relação entre os parâmetros de processamento e a massa das fibras obtidas.

Amostra	Velocidade de rotação (RPM)	Concentração de zeína (%m/m)	Massa da amostra (mg)
1	6000	40	4,7
2	8000	40	36,2
3	10000	40	198,6
4	10000	37,5	31,7
5	10000	42,5	83,0
6	10000	45	129,0
7	12000	40	13,0

Fonte: Autoria própria.