



UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENQ4020AD - TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO II

ANDERSON BERTOLLO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO ADITIVO ULTRAVIOLETA PARA EMBALAGENS
POLIMÉRICAS EM DIFERENTES ESPESSURAS**

CAXIAS DO SUL
2025

ANDERSON BERTOLLO

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO ADITIVO ULTRAVIOLETA PARA EMBALAGENS
POLIMÉRICAS EM DIFERENTES ESPESSURAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Matheus Poletto.

CAXIAS DO SUL

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças nos momentos de dificuldade e por iluminar meu caminho até aqui.

Aos meus pais, que com seu amor incondicional, exemplo de dedicação e coragem, foram a base sólida que me sustentou em cada etapa desta jornada, pelos valores que me ensinaram, que guiaram meus passos rumo a esta conquista. A minha namorada por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, com paciência, carinho e apoio, sua presença foi essencial nessa caminhada. Ao meu filho, cuja alegria, curiosidade e energia me inspiram todos os dias a ser um profissional e uma pessoa melhor.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Matheus Poletto, pela paciência, dedicação e por compartilhar seu conhecimento com excelência e profissionalismo. Estendo meus agradecimentos à banca examinadora, composta pela Prof.^a Dr.^a Camila Baldasso e pelo doutorando Oscar Neuwald, por dedicarem seu tempo à leitura e pelas valiosas contribuições oferecidas ao desenvolvimento deste trabalho.

Estendo meus agradecimentos aos professores do curso de Engenharia Química e à Universidade de Caxias do Sul, pelo aprendizado e pela formação acadêmica.

Agradeço aos meus colegas de trabalho pelo apoio, companheirismo e por contribuírem direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho. Também expressei minha gratidão a empresa onde atuo, pela compreensão, incentivo e por permitir que eu conciliasse compromissos profissionais e acadêmicos ao longo desta jornada.

Deixo minha sincera gratidão a todos que fizeram parte dessa trajetória, pois sem o apoio e a colaboração de cada um, este momento não teria sido possível.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da adição de aditivos fotoprotetores em filmes poliméricos coextrusados utilizados em embalagens flexíveis para alimentos, considerando diferentes espessuras. A pesquisa surgiu da crescente demanda por soluções que aumentem a durabilidade e a estabilidade de produtos expostos à luz, especialmente em pontos de venda refrigerados, onde a radiação ultravioleta (UV) pode acelerar reações de degradação oxidativa. Foram produzidas e analisadas quatro amostras de filmes multicamadas: duas contendo aditivo UV e duas sem aditivo, nas espessuras de 140 μm e 170 μm . Os ensaios experimentais incluíram medições de espessura, brilho, opacidade, taxa de transmissão de oxigênio, resistência à tração, alongamento e módulo de elasticidade, além de análises espectroscópicas (FTIR) após envelhecimento acelerado em câmara de UVB. Os resultados demonstraram que a presença do aditivo UV não alterou significativamente a espessura dos filmes, porém influenciou propriedades ópticas e mecânicas. O aditivo contribuiu para o aumento do módulo de elasticidade e da resistência à fotodegradação, indicando maior rigidez e estabilidade estrutural. As análises de FTIR confirmaram que os filmes com aditivo apresentaram menor formação de grupos oxidativos após a exposição à radiação, evidenciando a eficácia da proteção UV. Além disso, o aumento da espessura mostrou-se favorável à redução da penetração da luz, reforçando o efeito de barreira. Os resultados obtidos indicam que a combinação adequada entre espessura e aditivo fotoprotetor é determinante para otimizar o desempenho das embalagens, prolongando a vida útil dos alimentos e contribuindo para soluções mais sustentáveis na indústria de embalagens.

Palavras-chave: embalagens flexíveis; aditivo UV; filmes poliméricos; radiação ultravioleta; proteção fotodegradativa

ABSTRACT

The present study aimed to evaluate the impact of adding UV-protective additives to coextruded polymeric films used in flexible food packaging, considering different thicknesses. The research arose from the growing demand for solutions that enhance the durability and stability of products exposed to light, especially in refrigerated retail environments where ultraviolet (UV) radiation can accelerate oxidative degradation reactions. Four multilayer film samples were produced and analyzed: two containing UV additives and two without, with thicknesses of 140 μm and 170 μm . The experimental tests included measurements of thickness, gloss, opacity, oxygen transmission rate, tensile strength, elongation, and elastic modulus, as well as spectroscopic (FTIR) analyses after accelerated aging in a UVB chamber. The results showed that the presence of the UV additive did not significantly affect the thickness of the films but did influence their optical and mechanical properties. The additive contributed to increased elastic modulus and enhanced resistance to photodegradation, indicating greater rigidity and structural stability. FTIR analyses confirmed that films containing the additive exhibited lower formation of oxidative groups after UV exposure, demonstrating the effectiveness of UV protection. Moreover, increased film thickness proved favorable for reducing light penetration, reinforcing the barrier effect. The results indicate that the appropriate combination of film thickness and UV-protective additive is crucial to optimizing packaging performance, extending the shelf life of food products, and contributing to more sustainable solutions in the packaging industry.

Keywords: flexible packaging, UV additive, polymeric films, ultraviolet radiation, photodegradation protection

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Influência dos diversos segmentos na produção de embalagens no Brasil em 2023	18
Figura 2 - Percentual dos segmentos do setor de embalagens em 2023	18
Figura 3 - Previsão do crescimento de embalagens flexíveis até 2034.....	20
Figura 4 - Representação esquemática do processo de extrusão	23
Figura 5 - Representação esquemática do processo de laminação.....	24
Figura 6 - Representação esquemática do processo de impressão.....	24
Figura 7 - Representação esquemática do processo de refilamento.	25
Figura 8 - Comparativo de carne bovina moída antes e depois de exposição a luz UV	27
Figura 9 - O espectro ultravioleta, vivível e infravermelho próximo	28
Figura 10 - Estrutura molecular dos Benzotriazóis.....	31
Figura 11 - Estrutura molecular dos Benzofenonas	31
Figura 12 - Estrutura molecular das Tranzinas.....	32
Figura 13 - Análise espectrofotométrica dos compostos em diferentes concentrações molares	34
Figura 14 - Fluxograma dos processos de preparação das amostras.....	39
Figura 15 - Análise FTIR da amostra 140CA.....	56
Figura 16 - Análise FTIR da amostra 140SA.....	57
Figura 17 - Análise FTIR da amostra 170CA.....	58
Figura 18 - Análise FTIR da amostra 170SA.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -Características da luz ultravioleta	29
Tabela 2 -Comparativo entre os aditivos	35
Tabela 3- Codificação das amostras	41
Tabela 4 -Classificação da barreira de oxigênio.....	44
Tabela 5 - Análise de Espessura.....	46
Tabela 6 - Análise de Brilho	47
Tabela 7 - Análise de Opacidade	49
Tabela 8 - Análise da transmissão de oxigênio	50
Tabela 9 – Resistência a tração na força máxima da Amostra de 140 μm	51
Tabela 10 - Resistência a tração na força máxima da Amostra de 170 μm	51
Tabela 11- Alongamento das Amostras de 140 μm	53
Tabela 12 – Alongamento das Amostras de 170 μm	53
Tabela 13 - Módulo de elasticidade das amostras de 140 μm	54
Tabela 14 - Módulo de elasticidade das amostras de 170 μm	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -Composição e propriedades do filme coextrusado.....	38
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS: HISTÓRICO E PANORAMA ATUAL.....	16
2.2	EVOLUÇÃO DAS EMBALAGENS POLIMÉRICAS.....	19
2.3	EMBALAGENS FLEXÍVEIS.....	20
2.3.1	Segmentação das embalagens poliméricas flexíveis.....	21
2.3.2	Processo de fabricação das embalagens poliméricas flexíveis	22
2.3.3	Efeitos da luz UV em embalagens poliméricas flexíveis	25
2.4	FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO UV	27
2.5	MECANISMOS DE PROTEÇÃO UV	29
2.5.1	Aditivos	29
2.5.2	Mecanismos dos principais aditivos UV	30
2.5.3	Efeito da espessura na proteção UV	32
2.6	ESTADO DA ARTE	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
3.1	MATERIAIS	37
3.2	MÉTODOS	38
3.2.1	Mistura dos componentes e processo de extrusão	39
3.2.2	Modificação das espessuras	40
3.2.3	Tempo de cura do material extrusado	40
3.3	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	41
3.3.1	Análise de espessura.....	41
3.3.2	Medição de brilho.....	42
3.3.3	Análise de alongamento.....	42
3.3.4	Análise de opacidade	43
3.3.5	Análise da taxa de transmissão de oxigênio.....	43
3.3.6	Análise de envelhecimento acelerado por radiação UV.....	44
3.4	ANÁLISE ESTATÍSTICA	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.2	ANÁLISE DE BRILHO DAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR	47

4.3	ANÁLISE DE OPACIDADE DAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR	48
4.4	ANÁLISE DE TRASSMISSÃO DE OXIGÊNIO NAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR.....	50
4.5	ANÁLISES MECÂNICAS NAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR .	51
4.5.1	Resistência a tração na força máxima.....	51
4.5.2	Alongamento das amostras em direção DM e DT.....	52
4.5.3	Módulo de elasticidade das amostras em direção DM e DT	54
4.6	ANÁLISE DO FTIR APÓS ENVELHECIMENTO ACELERADO POR UV	56
5	CONCLUSÃO.....	61
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	62
	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A indústria de embalagens flexíveis vem sofrendo mudanças significativas, impulsionadas pelas demandas de soluções práticas, econômicas e sustentáveis, num cenário onde as embalagens são destacadas como uma alternativa mais versátil e podem ser utilizadas em diversos setores, como alimentício, farmacêutico, cosmético e limpeza. Esse ramo de embalagem é caracterizado de forma que sua leveza, capacidade de adaptação e formato de produtos favoreça a produção, o armazenamento e a distribuição.

Segundo reportagens setoriais (SMITHERS, 2023; ALLIED MARKET RESEARCH, 2024), o mercado global de embalagens flexíveis foi avaliado entre US\$ 160–200 bilhões em 2022, com previsão de crescimento contínuo impulsionado por conveniência, porções individuais e expansão do e-commerce, alcançando entre US\$ 290 bi (2023) e US\$ 326 bi até 2032.

A evolução dos processos de fabricação de alimentos, assim como de diversos outros setores industriais, trouxe consigo inovações paralelas na indústria de embalagens. Estas deixaram de ser meros recipientes e passaram a desempenhar um papel ativo na conservação, proteção e qualidade dos produtos. Essa transformação acompanha o avanço tecnológico e industrial, ampliando o uso de embalagens em diferentes áreas além do setor alimentício.

Na indústria de polímeros fundamenta-se a seleção criteriosa de materiais poliméricos que devem atender a requisitos funcionais, econômicos e específicos. Entre os polímeros mais utilizados destacam-se o polietileno, o propileno e o polietileno tereftalato, onde suas propriedades são essenciais para diferentes aplicações, como resistência, flexibilidade, barreiras contra umidade e oxigênio, além de contribuir na conservação do produto. O uso estratégico desses polímeros deve atender as demandas de eficiência, qualidade e sustentabilidade.

Nesse cenário, a espessura dos filmes poliméricos é um parâmetro técnico essencial, pois influencia diretamente propriedades mecânicas, como resistência à tração, impacto e perfuração, além das propriedades de barreira a gases e radiação. Além disso, filmes mais espessos tendem a oferecer maior proteção contra a radiação UV. Especialmente em embalagens utilizadas para produtos cárneos, a espessura adequada contribui para garantir barreiras eficazes ao oxigênio, preservando a qualidade do alimento durante o armazenamento. Além disso, filmes mais espessos

tendem a oferecer maior proteção contra a radiação UV, reduzindo a transmissão de luz e aumentando a resistência à degradação, o que prolonga a vida útil da embalagem e do produto.

Devido a crescente adoção da exposição vertical de produtos alimentícios em refrigeradores nos pontos de venda, intensificam-se as preocupações da indústria de alimentos quanto à estabilidade e conservação de produtos sensíveis à luz. Dentre os fatores externos que afetam a qualidade desses alimentos, destaca-se a radiação ultravioleta (UV), cuja exposição pode acelerar reações de degradação oxidativa, afetando diretamente as características sensoriais, nutricionais e a vida útil dos produtos. Esse efeito é especialmente crítico em alimentos com alto teor de lipídios e pigmentos naturais. O problema se agrava consideravelmente quando se utilizam embalagens transparentes, que oferecem baixa barreira à radiação UV, permitindo maior incidência de luz sobre o conteúdo.

Nesse contexto os filmes com barreira UV surgem com uma solução eficaz combinando a funcionalidade do polímero com aditivos fotoprotetores, capazes de absorver, refletir ou dispersar a radiação UV. Estudos indicam que o uso desses filmes prolonga a vida útil do alimento, preservando atributos sensoriais essenciais, como sabores e aroma, além de prevenir o desbotamento e a degradação provocados pela exposição a luz UV.

Entretanto, a eficiência a barreira UV varia conforme o tipo de polímero utilizado e a composição dos aditivos. Polímeros como polietileno tereftalato, embora possuam boa resistência mecânica e transparência, apresentam baixa proteção a radiação UV, demandando assim o uso de estabilizantes específicos. Já em estruturas multicamadas o uso de estabilizantes vem se mostrando promissor na otimização de proteção contra a fotodegradação.

Nesse contexto a proposta deste trabalho está alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao incentivar o desenvolvimento de soluções tecnológicas mais eficientes, e 12 – Consumo e Produção Responsáveis, ao contribuir para a redução do desperdício de alimentos por meio de embalagens mais eficazes na preservação dos produtos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa entre filmes poliméricos contendo aditivos de proteção contra radiação UV, visando identificar o melhor desempenho funcional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar a influência da espessura dos filmes poliméricos na eficácia da barreira contra radiação UV;
- Avaliar as propriedades físicas e ópticas dos filmes em diferentes espessuras, com e sem aditivos fotoprotetores, considerando parâmetros como resistência mecânica e transparência;
- Analisar o desempenho de filmes sob exposição simulada a radiação UV, avaliando possíveis alterações físico-químicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico deste estudo aborda os principais conceitos e avanços relacionados às embalagens poliméricas flexíveis, com foco nas propriedades físico-químicas dos filmes poliméricos e sua capacidade de proteção contra radiação ultravioleta (UV). Segundo Andrady (2017), a barreira contra radiação UV é fundamental para a preservação da qualidade e vida útil dos alimentos embalados, sendo a espessura do filme e o uso de aditivos fotoprotetores fatores determinantes para essa eficácia.

Também são abordados os desafios econômicos e ambientais na fabricação de embalagens flexíveis, enfatizando a necessidade de soluções sustentáveis que promovam a conservação dos alimentos e reduzam o impacto ambiental (MARSH & BUGUSU, 2007). Dessa forma, o referencial fundamenta a análise da influência da espessura e dos aditivos UV em filmes poliméricos, contribuindo para o desenvolvimento de embalagens mais eficientes e sustentáveis.

2.1 A INDÚSTRIA DE EMBALAGENS: HISTÓRICO E PANORAMA ATUAL

Antigamente, o alimento era consumido onde era encontrado, as famílias e aldeias eram autossuficientes, preparando o que usavam. Com o surgimento da caça, da pesca e colheita, passou a ser necessário cuidar desses alimentos, para que condições adversas, como o calor, o frio e a chuva não estragassem todo o trabalho realizado (ABRAE, 2020).

De acordo com Montanari (2008), os alimentos, em períodos mais antigos, eram armazenados em utensílios retirados da natureza, como cabaças, conchas e folhas. Com o tempo, passaram a ser utilizados recipientes feitos de materiais como troncos ocos, fibras vegetais trançadas e partes de animais.

Através do processo de tecelagem, posteriormente, juncos foram transformados em cestos para armazenar os excedentes de alimentos. Alguns alimentos, então, podiam ser guardados para futuras refeições (MARK e BUGUSU, 2017). Com o desenvolvimento da agricultura e da pecuária, surgiram novas necessidades de armazenar e transportar alimentos. Na Idade da Pedra, o ser humano começou a utilizar materiais como argila, palha e couro para esse fim.

Segundo Jacoby (1997), o aumento do comércio na Idade Média exigiu o desenvolvimento de embalagens mais resistentes para suportar longas viagens marítimas, impulsionando a evolução das técnicas de embalagem e transporte.

A Revolução Industrial, que durou do final do século XVIII até meados do século XIX, trilhou os processos para produção em massa. Inovações como motores a vapor, fábricas mecanizadas e linhas de montagem revolucionaram os processos de fabricação. À medida que a produção aumentava, surgia também a necessidade de soluções de embalagens eficientes (FLAMINO, 2024; WILSON, 2014; CAVALCANTI, 2019).

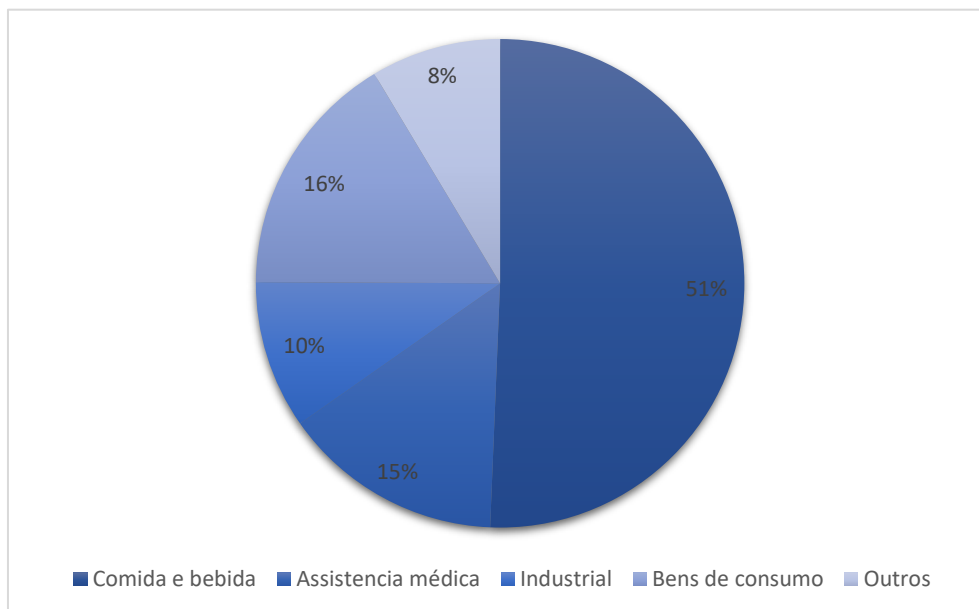
A história das embalagens no Brasil está intimamente ligada ao desenvolvimento econômico e industrial do país, com destaque para o período após a chegada da família real portuguesa em 1808, quando as atividades comerciais foram intensificadas, criando a necessidade de acondicionar produtos para transporte e armazenamento (CAVALCANTI, 2016). Contudo, o uso de materiais poliméricos no setor de embalagens só se consolidou na segunda metade do século XX, com a ascensão da indústria petroquímica brasileira.

O grande marco na produção nacional de polímeros ocorreu em 1972, com a criação da Petroquímica União, que passou a produzir eteno e propeno, matérias-primas essenciais para a fabricação de polietileno (PE) e polipropileno (PP) (SILVA, 2018). Esse progresso acompanhou a crescente demanda por embalagens leves, econômicas e de fácil processamento, características ideais para atender a mercados de grande volume, como o de alimentos e bebidas.

Segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis (ABIEF), o setor vem crescendo de forma consistente. Em 2023, a produção nacional de embalagens atingiu um valor de R\$ 144,4 bilhões, o que corresponde a um aumento de 17,21% em relação ao ano anterior, impulsionado pela demanda dos setores de alimentos, bebidas e agronegócio. (ABIEF, 2024).

Com base no setor de uso final, o mercado de embalagens poliméricas é dividido em alimentos e bebidas, saúde, indústria, bens de consumo e outros. Como mostrado na Figura 1, o segmento de alimentos e bebidas detinha cerca de 51% de participação em 2023, com destaque para embalagens tipo *pouch* (GUJAR; UGALE, 2024).

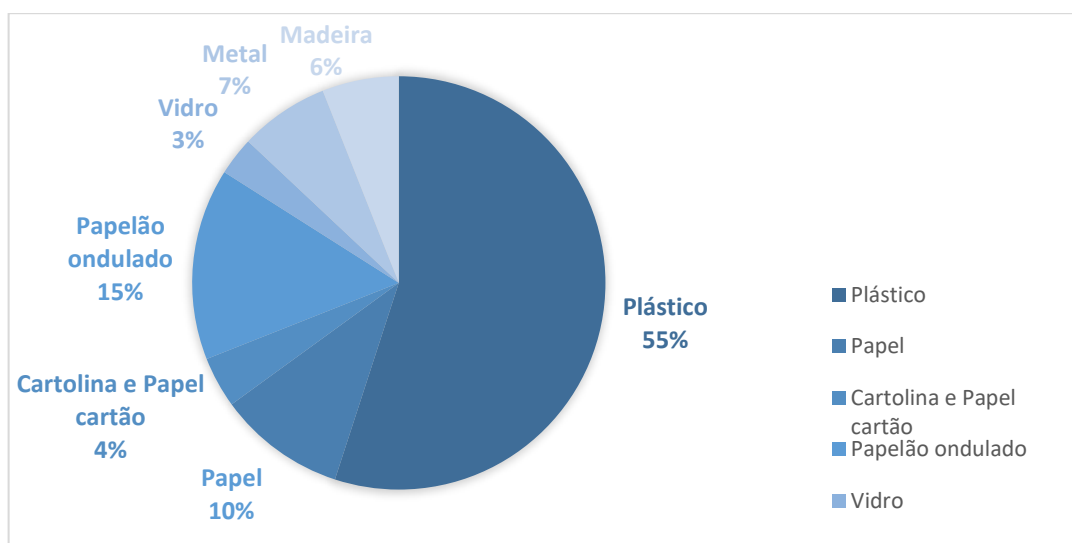
Figura 1 - Influência dos diversos segmentos na produção de embalagens no Brasil em 2023



Fonte: Adaptado de ABIEF, 2024.

Conforme está representado na Figura 2 em 2023, o nível de emprego na indústria de embalagens alcançou 254.645 postos formais, representando um aumento de 4,01% em comparação a 2022. A indústria de polímeros manteve-se como a principal empregadora, com 140.055 empregos, o que equivale a 55,0% do total do setor (ABRE, 2024).

Figura 2 - Percentual dos segmentos do setor de embalagens em 2023



Fonte: Adaptado de ABRE, 2024.

O Brasil tem consolidado sua posição como um dos principais mercados consumidores e produtores de embalagens poliméricas da América Latina, com capacidade de atender tanto às demandas locais quanto às exigências do comércio internacional. Segundo divulgado pela Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST), em 2025, o país tem se mantido competitivo por meio de inovações que garantem a adaptação às novas exigências de qualidade, segurança e sustentabilidade.

2.2 EVOLUÇÃO DAS EMBALAGENS POLIMÉRICAS

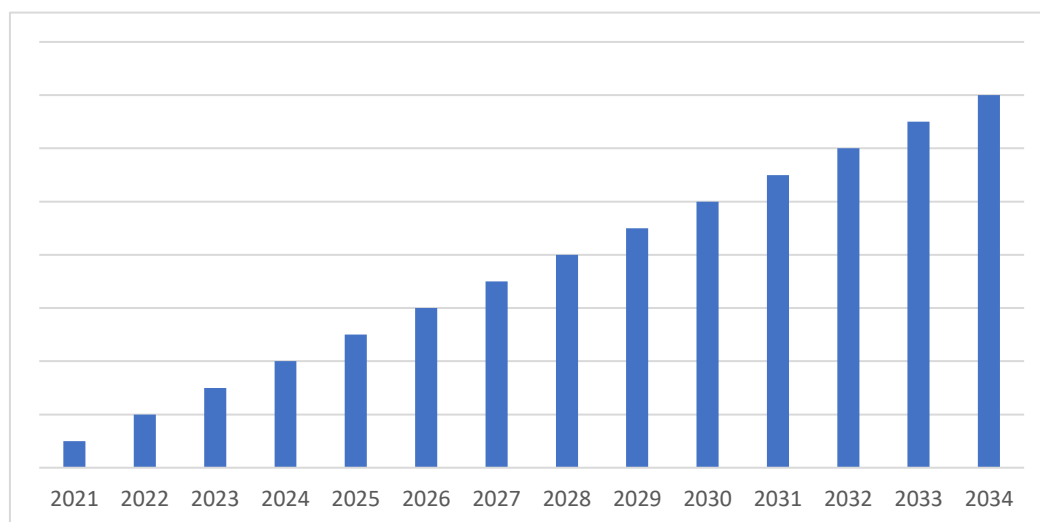
A embalagem polimérica representa uma das formas mais difundidas de acondicionamento de produtos alimentícios no mundo, em função de suas propriedades versáteis, baixo custo e facilidade de processamento. Além disso, os polímeros são altamente personalizáveis, podendo ser adaptados para atender a diferentes requisitos de proteção, como barreira contra oxigênio, luz e umidade, fatores essenciais para preservar a qualidade dos alimentos por mais tempo (GUZMÁN, 2019).

No setor alimentício, as embalagens poliméricas são amplamente usadas em produtos congelados, bebidas, laticínios, *snacks* e alimentos frescos, graças à sua capacidade de proteção. Além disso, são fundamentais na indústria farmacêutica, garantindo esterilidade e proteção contra variações térmicas e umidade. Em produtos de higiene pessoal e cosméticos, também predominam, facilitando o transporte e o uso prático. A densidade reduzida e a resistência desses materiais contribuem para processos logísticos mais eficientes e sustentáveis, reduzindo custos de transporte e armazenamento (RAPP, 2006).

O mercado global de embalagens poliméricas tem apresentado crescimento contínuo, impulsionado por inovações tecnológicas, mudanças nos hábitos de consumo e pressões regulatórias ligadas à sustentabilidade. Entre os segmentos mais relevantes está o de embalagens poliméricas flexíveis, que se destaca por sua leveza, versatilidade e capacidade de proteger produtos com eficiência, especialmente nos setores de alimentos, bebidas, farmacêutico e cosméticos (FUTURE MARKET INSIGHTS, 2024).

O mercado global de embalagens poliméricas rígidas e flexíveis foi avaliado em US\$ 395,7 bilhões em 2024. Conforme a Figura 3, o mercado de embalagens rígidas deve atingir US\$ 314,2 bilhões até 2034, enquanto as embalagens flexíveis devem apresentar uma Taxa de Crescimento Anual Composta (CAGR) superior a 4,4% no mesmo período. Esse crescimento é impulsionado por características como baixa densidade, custo reduzido e maior vida útil das embalagens flexíveis (GUJAR; UGALE, 2024).

Figura 3 - Previsão do crescimento de embalagens flexíveis até 2034



Fonte: Adaptado SURAJ GUJAR, SANDEEP UGALE, 2024.

2.3 EMBALAGENS FLEXÍVEIS

As embalagens flexíveis vêm ganhando espaço na indústria alimentícia devido à sua leveza, versatilidade e capacidade de adaptação a diferentes formatos de produtos. Elas são compostas principalmente por filmes poliméricos como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliéster (PET), polietileno tereftalato entre outros, que podem ser monocamadas ou estruturas multicamadas com propriedades específicas de barreira. Esse tipo de embalagem contribui para a redução de custos logísticos e facilita o armazenamento e o transporte dos alimentos, além de possibilitar design atrativo e impressão de alta qualidade (BAMBACE et al., 2020; MARSH & BUGUSU, 2007).

Além da praticidade, as embalagens flexíveis também desempenham um papel crucial na preservação da qualidade e da segurança dos alimentos, fornecendo barreiras contra gases, umidade, luz e contaminantes externos. A escolha dos materiais e da estrutura da embalagem influencia diretamente a vida útil do produto, sendo uma estratégia fundamental no combate ao desperdício de alimentos (HAN, 2014; SIRACUSA et al., 2008).

Recentemente, o setor também tem incorporado preocupações ambientais, com o desenvolvimento de filmes recicláveis, compostáveis e provenientes de fontes renováveis. A combinação entre desempenho técnico e sustentabilidade é um desafio atual da indústria, especialmente diante da pressão por redução de resíduos poliméricos e emissões de carbono (EUROPEAN BIOPLASTICS, 2023; GARCÍA-ARMENTA et al., 2021).

Entre os avanços mais recentes, destaca-se o uso de embalagens flexíveis com proteção à radiação ultravioleta (UV), especialmente para produtos sensíveis à luz como óleos, sucos e alimentos ricos em gordura. A exposição à radiação UV pode acelerar processos de degradação como a oxidação lipídica e a perda de compostos sensoriais e nutricionais. Embalagens com aditivos absorventes ou refletivos de UV são, portanto, essenciais para manter a qualidade e a segurança desses alimentos durante o armazenamento e distribuição (BRODY et al., 2001; HOLLAND COLOURS, 2024; SILVA et al., 2020).

2.3.1 Segmentação das embalagens poliméricas flexíveis

A indústria de embalagens poliméricas flexíveis depende de materiais específicos que são escolhidos com base em suas características funcionais e econômicas. O polietileno (PE) é um dos polímeros mais simples e mais utilizados em embalagens flexíveis por apresentar vantagens como preço, resistência mecânica, boa performance, propriedades de selagem, boa propriedade de barreira à umidade e consideráveis propriedades barreira a gases (ANYADIKE 2009). Além disso, é um polímero termoplástico, isto é, que em altas temperaturas se funde e pode ser moldado inúmeras vezes, inclusive tal característica é um dos fatores que permitem sua reciclabilidade (LEONEL, 2020).

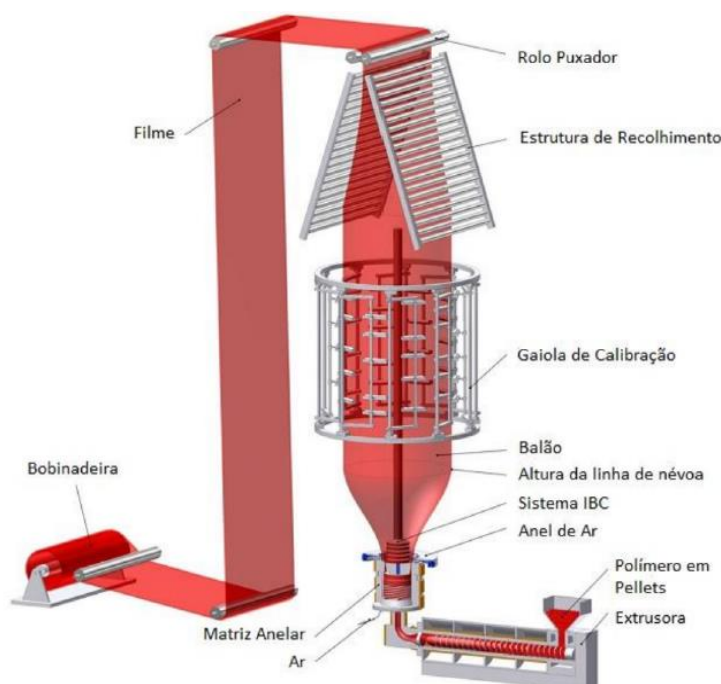
O polipropileno (PP) se destaca pelo uso em embalagens de alimentos e bebidas, principalmente para itens que necessitam de resistência térmica, como produtos congelados e refrigerados. Sua resistência a produtos químicos e a capacidade de manter a integridade dos produtos durante o processo de esterilização tornam-no ideal para embalagens de alimentos (PlasticsEurope, 2020). Além disso, a transparência do PP permite que os consumidores vejam o conteúdo da embalagem, o que agrega valor aos produtos de consumo diário, como potes de margarina e iogurtes.

Já o polietileno tereftalato (PET) é amplamente reconhecido por suas propriedades de barreira excepcionais, especialmente no que diz respeito à proteção contra oxigênio e umidade, o que é crucial para prolongar a vida útil de alimentos e bebidas (*European Plastics Converters Association*, 2020). Esse polímero é resistente, leve e durável, sendo ideal para garrafas de bebidas e embalagens de alimentos secos, como *snacks* e cereais. Sua alta taxa de reciclabilidade também faz com que o PET seja uma escolha preferida em um contexto crescente de sustentabilidade e redução do impacto ambiental das embalagens.

2.3.2 Processo de fabricação das embalagens poliméricas flexíveis

Após o recebimento das matérias-primas, o processo de produção das embalagens flexíveis tem início na etapa de extrusão, processo demonstrado na Figura 4. Nessa etapa, os polímeros são misturados a aditivos e pigmentos conforme especificações técnicas, formando uma composição adequada às exigências do cliente. O material é então fundido na extrusora e extrusado por uma matriz circular aquecida, formando um tubo que é inflado com ar, criando um balão. A quantidade de ar determina a largura e espessura do filme. O resultado é um filme polimérico leve, resistente e funcional, amplamente utilizado em embalagens industriais (IBA, 2021).

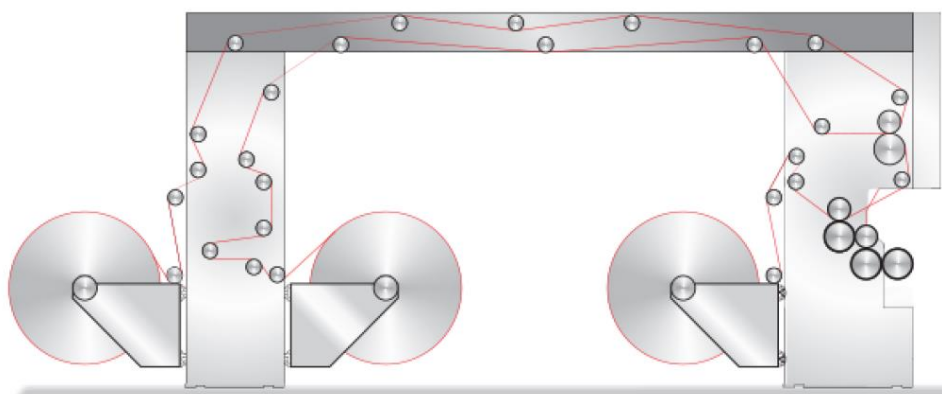
Figura 4 - Representação esquemática do processo de extrusão



Fonte: KOLARIK, 2012.

O segundo processo produtivo das embalagens poliméricas flexíveis é a laminação, representado na Figura 5, etapa que consiste na união de diferentes substratos com o objetivo de agregar valor ao material final. Através da aplicação de camadas de filmes poliméricos distintos, essa técnica contribui para o aprimoramento das propriedades estéticas e funcionais da embalagem, como o aumento da barreira contra gases e umidade, a proteção da impressão e a redução de custos de produção (CETEA, 2020; EMBRAPA, 2019; GRAVURETEC, 2021).

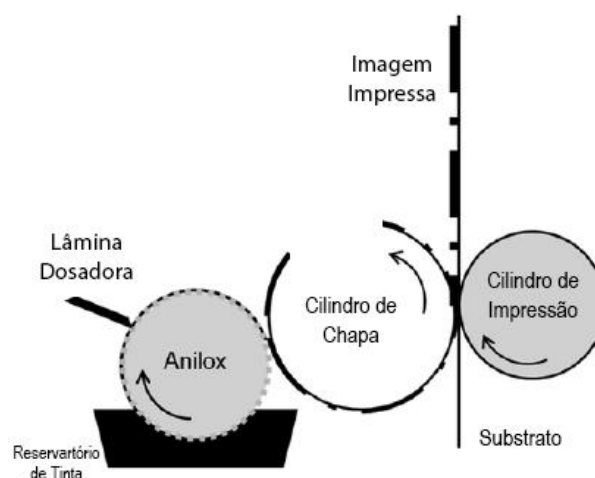
Figura 5 - Representação esquemática do processo de laminação



Fonte: CELTI, 2016.

Após a etapa de laminação, o material segue para o processo de impressão, sendo a flexografia a técnica mais comumente utilizada na produção de embalagens flexíveis. Trata-se de um processo de impressão rotativo que emprega matrizes flexíveis (*clichês*) para a transferência da tinta ao substrato. A tinta é armazenada em uma calha e aplicada por meio de um cilindro chamado anilox, que possui microcélulas responsáveis por transportar a quantidade adequada de tinta ao clichê (PHILLIPS ET AL., 2012). Conforme a Figura 6.

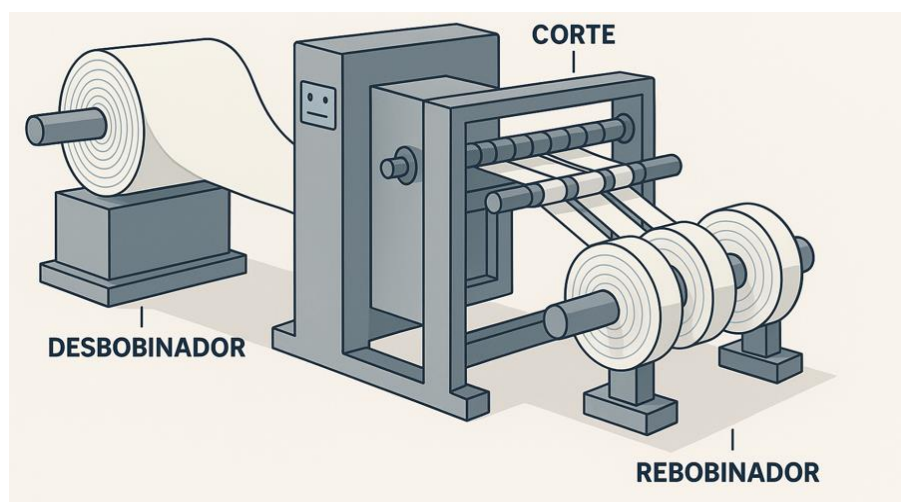
Figura 6 - Representação esquemática do processo de impressão



Fonte: PHILLIPS ET AL., 2012.

A etapa de refil, demonstrada na Figura 7, oferece cortes de filmes com diferentes tipos de materiais, garantindo que o produto tenha uma qualidade superior, ou diferenciais em sua função, o corte é realizado por uma lâmina garantindo a padronização do material em relação ao seu tamanho, formato, detalhamento e acabamento (NORMAN,2014).

Figura 7 - Representação esquemática do processo de refilamento.



Fonte: Adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA, 2014.

2.3.3 Efeitos da luz UV em embalagens poliméricas flexíveis

Conforme a recente transformação nos pontos de venda, com a adoção da exposição vertical de produtos refrigerados como frios e embutidos, tem aumentado a incidência de luz artificial e radiação ultravioleta (UV) sobre as embalagens. Essa exposição intensifica processos de degradação oxidativa nos alimentos, afetando características sensoriais — como sabor, aroma e cor — e comprometendo o valor nutricional e a vida útil dos produtos (LU et al., 2011).

Para atender às exigências do varejo moderno, a indústria de embalagens tem investido em soluções que integrem proteção eficiente contra a radiação UV. Destacam-se as estruturas plásticas com aditivos bloqueadores ou absorventes de

UV, que impedem a penetração da radiação e reduzem seus efeitos deletérios nos alimentos acondicionados (MULLER et al., 2017).

Alimentos ricos em lipídios e pigmentos naturais, como queijos e embutidos, são particularmente vulneráveis à radiação UV, que acelera a oxidação lipídica e a degradação de compostos sensíveis à luz (FERRARI et al., 2013). Assim, embalagens com barreira à luz são essenciais para preservar a qualidade desses produtos. Segundo Coltro et al. (2006), além da proteção mecânica, química e física, a barreira à radiação luminosa é crucial na conservação de alimentos fotossensíveis.

A radiação UV, presente principalmente na luz solar, pode induzir reações fotoquímicas que afetam negativamente a qualidade de alimentos, provocando oxidação lipídica, perda de cor, degradação de vitaminas e alteração de sabor. (ZHAO et al., 2020; SCHINDLER et al., 2018)

Esses efeitos tornam-se especialmente críticos em produtos com embalagens translúcidas, como garrafas PET ou sachês finos, que permitem maior penetração de radiação. Por isso, a necessidade de barreiras UV se intensifica em alimentos como óleos vegetais, laticínios, bebidas claras, molhos e temperos. A degradação causada pela radiação não apenas afeta a qualidade sensorial e nutricional dos alimentos, mas também sua vida útil e aceitabilidade pelo consumidor (SIRACUSA et al., 2008; BRODY et al., 2001).

Quando expostos à luz, compostos como hemeoproteínas, presentes em produtos cárneos, podem absorver radiação visível ou ultravioleta, o que os torna eletronicamente excitados. Esse processo induz reações de oxidação, que podem ocorrer tanto pela formação direta de radicais livres quanto pela formação de oxigênio singlete, um intermediário altamente reativo (SINGH et al., 2019).

Em carnes, como mostrado na Figura 8, a luz não resulta em mudanças de cor imediatas, mas, quando combinada com oxigênio, promove a oxidação dos pigmentos cárneos. De acordo com estudos recentes, como o de Shakouri et al. (2020), a exposição à luz por 24 horas a 4°C resulta em uma degradação visível da cor da carne bovina moída, evidenciando o impacto da luz na oxidação dos pigmentos, como a mioglobina. Essa reação fotoquímica, iniciada pela excitação de átomos de oxigênio, resulta na formação de radicais livres que alteram cor e sabor do produto. Estudos de Djenane et al. (2001) e Martinez et al. (2007) demonstraram que a radiação UV acelera esse processo oxidativo, afetando a aparência e a aceitação do alimento pelo consumidor.

Figura 8 - Comparativo de carne bovina moída antes e depois de exposição a luz UV

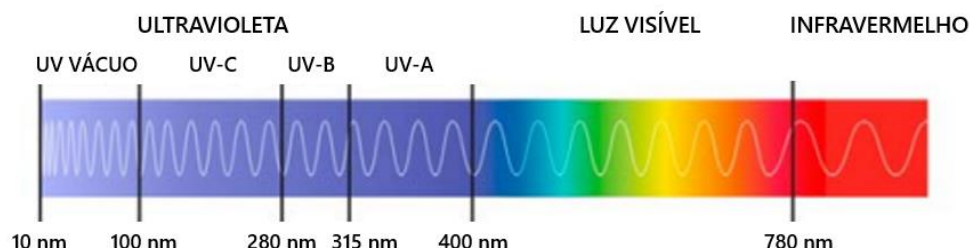


Fonte: BLUE SILO BEEF, 2023.

2.4 FUNDAMENTOS DA RADIAÇÃO UV

A radiação solar desempenha um papel importante na exposição dos alimentos às radiações UVA e UVB. No entanto, a iluminação artificial também influencia a qualidade e a estabilidade dos produtos, e suas características variam de acordo com o tipo de lâmpada e a distância entre a fonte de luz e o produto. Essas variações precisam ser cuidadosamente consideradas para garantir a máxima proteção e conservação dos alimentos expostos à luz durante o armazenamento (XU et al., 2021). A Figura 9 demonstra a intensidade da radiação que o espectro da luz emite por fontes artificiais, como lâmpadas incandescentes de vapor metálico (CHANG et al., 2019).

Figura 9 - O espectro ultravioleta, visível e infravermelho próximo



Fonte: THE SCIENCE OF UV PROTECTION, 2024.

As lâmpadas incandescentes, embora amplamente utilizadas, emitem uma radiação de espectro largo, que inclui tanto radiação visível quanto infravermelha. Isso resulta em uma maior geração de calor, o que pode ser prejudicial à qualidade dos alimentos, especialmente aquelas sensíveis à temperatura e luz (SMITH et al., 2020). Já as lâmpadas de vapor metálico, comumente usadas em ambientes de armazenamento de alimentos, emitem radiação na faixa do ultravioleta, o que pode acelerar a degradação de produtos fotossensíveis. Embora essas lâmpadas sejam eficientes em termos de iluminação, sua capacidade de promover a oxidação de lipídios e pigmentos cárneos deve ser levada em consideração (JONES & CLARK, 2020).

O espectro eletromagnético cobre uma extensiva faixa de comprimentos de ondas, sendo que é na região não ionizante entre raios X e a luz visível que ocupa a radiação ultravioleta (100- 400nm), cujo a sua classificação pode ser observada na Tabela 1. A intensidade de radiação ultravioleta é expressa como fluxo de irradiância ou intensidade (Wm^{-2}), enquanto a dose, que é uma função da intensidade e tempo de exposição, é expressa como exposição radiante (Jm^2) (GUERRERO-BELTRÁN E BARBOSA-CÁNOVAS, 2004; KOUTCHMA et al., 2009).

Tabela 1 -Características da luz ultravioleta

Tipo	Comprimento de onda	Faixa	Características
UV-A	Longo	320-400 nm	Mudanças na pele
UV-B	Médio	280-320 nm	Queimaduras
UV-C	Curto	100-280 nm	Faixa germicida
UV-V		100-200 nm	UV de vácuo

Fonte: GUERRERO-BELTRÁN; BARBOSA-CÁNOVAS, 2004.

A eficácia da desinfecção da superfície por UV-C na superfície dos alimentos é influenciada por vários fatores, incluindo dose de UV-C, tempo de exposição, características da superfície, nível de inóculo bacteriano inicial e espécie bacteriana (OTTO et al., 2011).

2.5 MECANISMOS DE PROTEÇÃO UV

Para proteger embalagens e produtos, utilizam-se aditivos absorventes de UV que convertem essa energia em formas menos agressivas e interrompem reações químicas nocivas (CHOWDHURY; MOREAU; SINGH, 2017). A escolha do aditivo depende do tipo de alimento, da estrutura e da espessura da embalagem, que influenciam a proteção contra a radiação UV (SIRACUSA et al., 2008; MARSH; BUGUSU, 2007; AURAS; SINGH; SINGH, 2005).

2.5.1 Aditivos

Os aditivos utilizados em embalagens alimentícias são substâncias incorporadas aos materiais poliméricos com o objetivo de aprimorar suas propriedades funcionais, estéticas ou de conservação. Entre os principais tipos, destacam-se os antioxidantes, estabilizantes térmicos, agentes antimicrobianos, plastificantes, corantes e os absorvedores de radiação ultravioleta (UV). Cada aditivo desempenha uma função específica, podendo atuar na proteção contra agentes ambientais — como luz, oxigênio, calor e umidade — ou interagir diretamente com o

alimento, contribuindo para sua preservação e segurança (ROBERTSON, 2013; ANDRADY & NEAL, 2009).

A escolha do aditivo mais adequado depende de diversos fatores, como o tipo de alimento, a estrutura da embalagem (monocamada ou multicamada), as condições de armazenamento e exposição, além dos requisitos regulatórios. A compatibilidade entre o aditivo e a matriz polimérica, bem como sua estabilidade térmica, migratória e fotoquímica, são aspectos fundamentais no desenvolvimento de embalagens funcionais e seguras (SILVA et al., 2018; SIRACUSA et al., 2008).

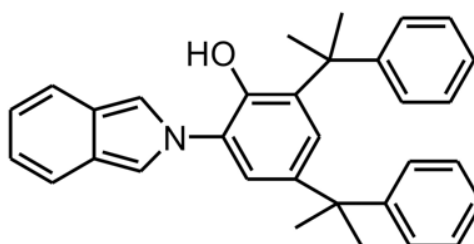
Os aditivos absorventes de radiação ultravioleta (UV) são compostos químicos incorporados nas matrizes poliméricas, eles agem por meio da absorção da energia UV, convertendo-a em calor ou outra forma de energia menos nociva, evitando a degradação dos polímeros e do alimento embalado (FREIRE et al., 2019). O uso desses aditivos é especialmente crítico para alimentos sensíveis à oxidação fotoinduzida, que pode comprometer sabor, cor e valor nutricional (MENDES et al., 2021).

Além da absorção direta, os aditivos UV podem atuar como estabilizantes fotoquímicos, interrompendo reações em cadeia de radicais livres gerados pela exposição solar ou artificial, aumentando a vida útil da embalagem e do produto (SANTOS & ALMEIDA, 2020).

2.5.2 Mecanismos dos principais aditivos UV

Os benzotriazóis estão entre os aditivos mais utilizados para proteção contra radiação ultravioleta. Segundo Tan et al. (2023), esses compostos apresentam estruturas aromáticas conjugadas, as quais conferem alta capacidade de absorção de radiação UV no intervalo de 300 a 385 nm. A Figura 10 apresenta a estrutura molecular típica dos benzotriazóis. A presença de substituintes, como átomos de cloro nas posições 3' e 5' do anel fenólico, provoca um deslocamento para o vermelho (*red shift*) do pico de absorção no espectro UV, resultando em uma absorção mais eficiente em comprimentos de ondas maiores. Esse efeito contribui para uma proteção mais abrangente dos polímeros frente à radiação UV.

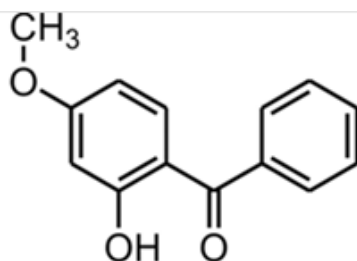
Figura 10 - Estrutura molecular dos Benzotriazóis



Fonte: DUARTE et al, 2019.

De acordo com Balogh Gáspár (2004), as benzofenonas apresentam elevada estabilidade térmica e resistência à oxidação, características que contribuem para sua eficácia em aplicações de longa duração. Essas moléculas são compostas por dois anéis aromáticos conectados por um grupo carbonila (C=O), estrutura que permite eficiente absorção de radiação ultravioleta na faixa de 200 a 340 nm, abrangendo as regiões UVB e UVA — principais responsáveis pela fotodegradação de polímeros. A Figura 11, ilustra a estrutura molecular das benzofenonas. Após a absorção dos fótons UV, a molécula atinge um estado excitado singlete e, por meio de conversão intersistema, transita para o estado triplete, no qual permanece excitada por mais tempo. Esse processo favorece a dissipação controlada da energia absorvida, predominantemente sob forma de calor, protegendo o material polimérico contra a degradação foto-oxidativa.

Figura 11 - Estrutura molecular dos Benzofenonas

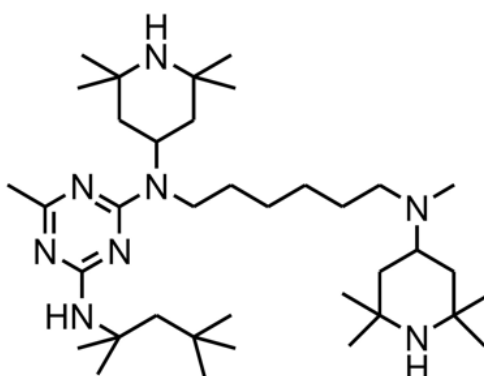


Fonte: DUARTE et al, 2019.

As triazinas, cuja estrutura molecular é apresentada na Figura 12, atuam por meio da absorção seletiva da radiação ultravioleta, predominantemente na faixa de

270 a 340 nm, seguida da dissipação da energia absorvida sob forma de calor. Esse mecanismo contribui para a prevenção da quebra das cadeias poliméricas, fenômeno conhecido como degradação foto-oxidativa (QIU; RUAN; LI, 2020). No entanto, a migração dessas substâncias para os alimentos constitui um aspecto crítico em termos de segurança alimentar. Estudos demonstram que a migração de triazinas tende a aumentar com o tempo de armazenamento e com o aumento da temperatura, sendo mais significativa em simulantes lipofílicos, como o isoctano (QIU; RUAN; LI, 2020).

Figura 12 - Estrutura molecular das Triazinas



Fonte: DUARTE et al, 2019.

Estudos indicam que a migração desses materiais pode representar riscos à saúde humana, em razão da toxicidade de certos compostos em concentrações específicas (MIEDICO et al., 2020; FOOD PACKAGING FORUM, 2020). Essa migração depende de diversos fatores, incluindo a temperatura de armazenamento, o tipo de alimento, o tempo de contato e a natureza da matriz polimérica. Em virtude desses potenciais riscos, legislações como a da União Europeia estabelecem limites específicos de migração para compostos utilizados em materiais destinados ao contato com alimentos, visando à proteção do consumidor (GAO et al., 2024).

2.5.3 Efeito da espessura na proteção UV

A espessura de um filme é definida pela distância perpendicular entre as duas superfícies principais de um material. É um parâmetro utilizado como referência na área de embalagens poliméricas flexíveis. Segundo Sarantópoulos et al. (2002)

conhecendo a espessura e sua natureza química, é possível obter informações teóricas sobre suas propriedades mecânicas e de barreira, que na teoria aumentam de forma linear ou não, com o aumento da espessura. Através da espessura de uma embalagem polimérica é possível estipular a vida útil de alguns produtos acondicionados e o desempenho mecânico da embalagem. (SARANTOPOULOS, TEIXEIRA,2017).

De acordo com Sydenstricker et al. (2007) em filmes multicamadas utilizadas em embalagens termoformadas, para produtos cárneos, a espessura adequada é essencial para garantir as especificações técnicas de média ou alta barreira ao oxigênio, evitando contaminações e riscos à saúde durante o tempo de prateleira.

A espessura influencia significativamente nas propriedades mecânicas das embalagens, como resistência a tração, impacto e a perfuração. Variações na espessura pode vir a comprometer a integridade da embalagem e seu desempenho mecânico (CRISTINA LINO,2015). Embalagens mais espessas oferecem uma barreira mais robusta contra danos físicos, umidade e luz e outros elementos externos que podem vir a comprometer a integridade do produto que está embalado (ALPFILM,2024).

Um estudo de Amano (2020) destaca que a transmitância da luz em filmes depende significativamente da geometria do revestimento e da distribuição do agente de bloqueio, sendo a espessura um fator determinante na eficácia da barreira UV.

Segundo Han et al (2023), filmes de polietileno linear de baixa densidade com diferentes espessuras (0,005 mm a 0,02mm) expostos a radiação UV, observou-se que filmes mais espessos apresentaram menor redução na força de rasgo após 180 horas de exposição, indicando assim maior resistência a degradação UV.

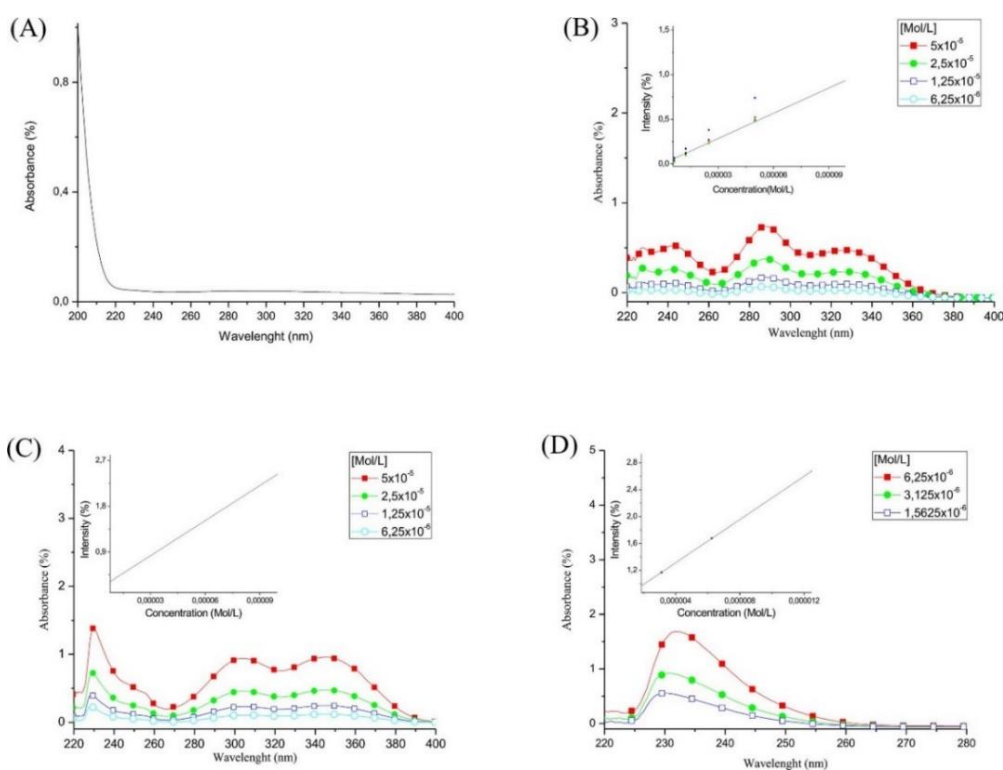
2.6 ESTADO DA ARTE

Duarte et al. (2019) investigou como o tratamento corona afeta a eficácia de diferentes estabilizadores de radiação ultravioleta (UV) em filmes de polietileno de baixa densidade (PEBD). Foram analisados três tipos de absorvedores UV, benzofenona, benzotriazol e triazina, incorporados à matriz polimérica em proporção de 1 % (m/m). Os filmes foram produzidos usando a técnica de revestimento por

rotação e foram submetidos tanto a radiação UV, quanto ao tratamento corona, simulando condições de exposição ao ambiente externo.

Na Figura 13(A), o espectro do polietileno de baixa densidade (PEBD) indica uma absorbância praticamente nula de 220 a 400 nm indicando que o PEBD não absorve significativamente a radiação UV. Já os espectros referentes à benzofenona (Figura 13(B)) e ao benzotriazol (Figura 13(C)) mostram padrões de absorção semelhantes, com bandas distribuídas em regiões de alto, médio e baixo número de onda, características da absorção UV dessas moléculas. Por sua vez, a triazina (Figura 13(D)) apresenta um espectro com absorção predominante na faixa de baixos números de onda, sugerindo menor estabilidade frente à radiação UV após o tratamento térmico ou oxidativo.

Figura 13 - Análise espectrofotométrica dos compostos em diferentes concentrações molares



(A) Polietileno de baixa densidade (LDPE) (B) Benzofenona (C) Benzotriazol
(D) Triazina

Fonte: Duarte et al., 2019

Com base na Lei de Beer-Lambert representada na Equação 1 e nos resultados obtidos na análise espectrofotométrica, foi possível determinar a absorvidade molar (ϵ) para cada molécula analisada. A leitura foi realizada na concentração mais elevada representada pela curva em vermelho nos gráficos, uma vez que a mesma apresentou maior intensidade de absorvância. Para os cálculos, foi considerado o valor padrão de 1 cm para o caminho óptico da célula (l), conforme amplamente utilizado em espectrofotometria de UV-Vis.

$$A = \epsilon \cdot c \cdot l \quad (1)$$

Sendo:

A é a absorvância (sem unidade),

ϵ é a absorvidade molar ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$),

c é a concentração da substância ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),

l é o caminho óptico da célula (normalmente em cm).

A Tabela 2 apresenta os valores de forma comparativa entre os três compostos benzofenona, benzotriazol e triazina testados por Duarte (2019).

Tabela 2 -Comparativo entre os aditivos

Composto	Faixa absorção (nm)	Eficiência UV	ϵ ($\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)
<i>Benzofenona</i>	200-340	Média (UV-B)	240
<i>Benzotriazol</i>	300-385	Alta (UV-B + UV-A)	320
<i>Triazina</i>	270-340	Muito alta	2880

Fonte: Adaptado de Duarte et al., 2019

Os resultados indicados na Tabela 2 mostram que a benzofenona apresenta o menor valor de absorvidade molar, seguida pelo benzotriazol e pela triazina. Portanto, é possível concluir que a triazina é o aditivo que pode ser utilizado em menor quantidade quando comparado aos demais. Embora a benzofenona e o benzotriazol

sejam moléculas com capacidade de absorver radiação ultravioleta em todo o espectro UV (UV-A, UV-B e UV-C), entre esses dois aditivos, o benzotriazol possui a maior absorvidade molar.

A espessura da embalagem também é determinante para a proteção contra radiação UV. Estudos realizados por Poveda (2015) indicam que filmes mais espessos, especialmente aqueles reforçados com nanopartículas de ZnO, fornecem barreira mais eficiente à luz UV, reduzindo a fotodegradação em alimentos. Nesse trabalho, as nanopartículas foram aplicadas em proporções de 0,25 % e 0,75 % (massa/massa) em PEBDL, e os resultados mostraram melhora significativa na proteção UV, bem como aprimoramento das propriedades mecânicas e da barreira ao oxigênio. Além disso, a adição de aditivos absorvedores de UV como o benzotriazol em embalagens de PET para óleo comestível demonstrou reduzir as taxas de fotoxidação do óleo em cerca de 15 %, sugerindo que, mesmo sem especificar espessura, a combinação de aditivo UV e resistência óptica e a característica da embalagem contribui para a preservação do alimento.

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da espessura do filme na eficácia da barreira contra radiação UV em embalagens poliméricas utilizadas para alimentos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste estudo, foram avaliadas quatro amostras de filmes coextrusados: duas contendo aditivo de proteção UV e duas sem a adição desse componente. A fim de investigar a influência da espessura na eficácia do aditivo, analisaram-se duas espessuras distintas, sendo duas amostras com 140 μm e duas com 170 μm . As propriedades físico-químicas dos filmes foram avaliadas de forma comparativa, com o objetivo de verificar o impacto da presença do aditivo e da variação de espessura no desempenho funcional do material.

3.1 MATERIAIS

O filme analisado foi obtido por meio do processo de coextrusão em uma extrusora de nove camadas, na qual cada camada foi projetada com composições específicas para conferir ao produto final propriedades funcionais distintas, como barreira, resistência mecânica e processabilidade.

O aditivo UV foi incorporado na camada correspondente à parte externa do filme, de modo a proporcionar maior barreira à radiação ultravioleta, é adicionado normalmente por meio de um concentrado sólido disperso em uma matriz polimérica compatível com a formulação do material. A dosagem do aditivo foi controlada com precisão e ajustada conforme o nível de proteção UV requerido para a aplicação final. Durante o processo de extrusão, as temperaturas foram rigorosamente monitoradas, a fim de evitar a degradação térmica do aditivo, o que poderia vir comprometer sua eficácia. Além disso, foi essencial acompanhar a estabilidade do sistema, uma vez que alterações no comportamento do aditivo poderiam impactar negativamente na viscosidade do polímero e, conseqüentemente, na qualidade do processamento e nas propriedades finais do filme.

O Quadro 1 apresenta a disposição das camadas da estrutura coextrudada, indicando o tipo de componente presente em cada camada, bem como suas respectivas propriedades físico-químicas, como ponto de fusão e densidade.

Quadro 1 -Composição e propriedades do filme coextrusado.

Camadas	Componente	Descrição	Ponto de Fusão (°C)	Densidade (g/cm ³)
A	1	Aditivo	192	1,400
	2	Poliamida	220 a 260	1,180
	3	Poliamida	220 a 260	1,180
B	4	PELBD	105	0,920
	5	UV	130	0,950
	6	Compatibilizante	101	0,922
C	7	UV	130	0,950
	8	PELBD	105	0,920
D	9	PELBD	105	0,920
	10	UV	130	0,950
	11	Compatibilizante	101	0,922
E	12	Poliamida	220 a 260	1,180
	13	Poliamida	220 a 260	1,180
F	14	EVOH	173°C	1,160
G	15	Poliamida	220 a 260	1,180
	16	Poliamida	220 a 260	1,180
H	17	Compatibilizante	101	0,922
	18	UV	130	0,950
	19	PELBD	105	0,920
J	20	PEBD	100	0,923
	21	PELBD	105	0,920
	22	UV	130	0,950

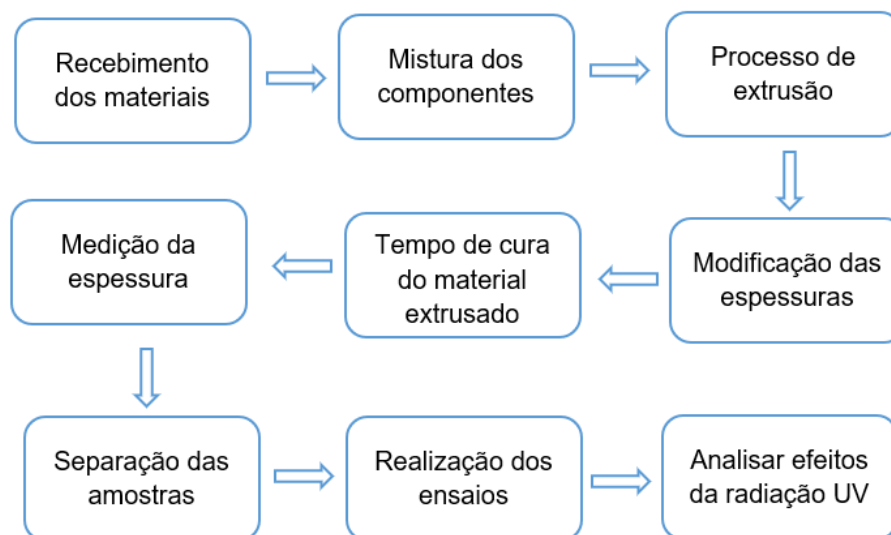
Fonte: O autor, 2025.

3.2 MÉTODOS

Para a produção das amostras, o primeiro processo que foi envolvido é a extrusão, no qual os polímeros, as resinas e os aditivos, previamente separados, foram inseridos no interior da extrusora. A Figura 14 apresenta um modelo esquemático do processo utilizado para a preparação das amostras, abrangendo

desde a confecção do filme coextrusado até a realização dos ensaios físico-químicos e de exposição à radiação ultravioleta (UV).

Figura 14 - Fluxograma dos processos de preparação das amostras



Fonte: o autor, 2025.

3.2.1 Mistura dos componentes e processo de extrusão

Os materiais que inseridos na extrusora foram selecionados conforme as especificações técnicas do item que foi produzido, de modo a agregar propriedades específicas de acordo com suas funcionalidades. No caso do filme multicamadas produzidas em coextrusoras, as camadas A e B foram projetadas para receber tratamento de superfície, sendo fundamentais para assegurar a adesão eficiente de tintas, adesivos e outros componentes aplicados nas etapas subsequentes de conversão. As camadas intermediárias (B, C, D, E, F e G) desempenham papel estrutural essencial, contribuindo para a estabilidade do balão extrusado, além de conferir resistência mecânica e atuar como barreira à permeação de gases e compostos voláteis. Já as camadas externas da estrutura (H e J), são responsáveis pelas propriedades de selagem, viabilizando o desempenho adequado da embalagem durante o processo de envase e garantindo sua integridade no uso final. (RODRIGUES, 2015).

3.2.2 Modificação das espessuras

No processo de extrusão sopro, a espessura do filme foi determinada por diversos parâmetros operacionais, sendo modificada principalmente pelo controle da vazão do polímero fundido, pela abertura da matriz circular e pela relação entre a velocidade de tração e a taxa de inflagem do balão. A vazão do material foi ajustada por meio da rotação dos parafusos das extrusoras, que define a quantidade de polímero extrudado por unidade de tempo. Na matriz, permitiu-se a regulação da abertura pela qual o polímero é extrudado na forma de tubo fundido. Após a saída da matriz, a espessura do filme foi controlada pela velocidade de tração dos rolos de calandra e pela razão de sopro, ou seja, a proporção entre o diâmetro do balão inflado e o diâmetro da matriz (SARANTOPOULOS et al., 2002).

3.2.3 Tempo de cura do material extrusado

O tempo de cura constituiu numa etapa essencial no processo de produção do material extrusado, especialmente filmes multicamadas, pois influencia diretamente em suas propriedades finais, como resistência mecânica, adesão e estabilidade térmica. Essa cura envolveu reações químicas e físicas que transformaram o material em sólido estável, podendo ocorrer por métodos térmicos ou radiação ultravioleta (UV).

Fatores como temperatura, tipo de polímero e método de cura influenciam esse processo, sendo que temperaturas elevadas aceleram a reticulação, mas podem causar degradação se forem excessivas. A cura inadequada compromete as propriedades mecânicas, a adesão e a integridade da embalagem (BAKARIĆ et al., 2019; LINSEIS, 2023; PPG INDUSTRIES, 2020).

Na Tabela 3, são apresentadas as codificações das amostras submetidas à análise conforme os ensaios descritos a seguir, com o intuito de atender aos objetivos propostos neste estudo.

Tabela 3- Codificação das amostras

Amostra	Espessura (µm)	Presença de aditivo (%)	Tempo de cura (h)
140SA	140	Não aplicável	12
170SA	170	Não aplicável	12
140CA	140	Aplicável	12
170CA	170	Aplicável	12

Fonte: o autor, 2025

3.3 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Os ensaios físicos e mecânicos que foram realizados neste trabalho são os seguintes: análise da espessura, medição de brilho, análise de alongamento, medição de opacidade, taxa de transmissão de gás oxigênio, análise de transmitância de radiação UV.

3.3.1 Análise de espessura

Com o objetivo de comparar a espessura dos filmes extrusados, as medições foram realizadas conforme a norma ISO 4593. O procedimento consistiu em posicionar a amostra na direção máquina no equipamento AUTO ME-1000 e realizou-se as leituras na direção transversal. Para cada amostra, foram analisados três pontos distintos, sendo calculado o valor médio das espessuras obtidas. A análise realizou-se posicionando o filme sob o pino medidor e sendo necessário apenas deslocá-lo manualmente ao longo da largura do filme para a coleta das medições nos pontos previamente determinados. A mesma foi calculada pela Equação 2 a seguir.

$$e^- = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (2)$$

Onde:

e = espessura média (μm)

e_i = espessura medida no ponto i

n = número total de pontos medidos

3.3.2 Medição de brilho

A medição de brilho teve como objetivo aferir o grau de reflexividade superficial das amostras, indicando a intensidade de brilho presente em cada uma delas. Essa análise foi realizada por meio de um glossímetro da marca Instrutherm modelo Br-100 (*glossmeter*), conforme os procedimentos estabelecidos na norma ISO 2813, que define os métodos para a determinação do brilho em superfícies poliméricas e similares. A calibração do glossímetro foi realizada posicionando o equipamento sobre a placa de calibração e seguindo as instruções do fabricante até a exibição do valor padrão de brilho (93,7 GU). Após a calibração, o glossímetro foi posicionado sobre cada uma das amostras, apoiadas sobre uma superfície branca, e a medição foi realizada. O aparelho emitiu um feixe de luz em um ângulo específico de 85° e mediu-se a quantidade de luz refletida pela superfície da amostra.

3.3.3 Análise de alongamento

O alongamento é a relação percentual entre o comprimento do corpo de prova e seu comprimento inicial (o quanto o material alonga), e a ruptura é a relação entre força máxima de tração por unidade de largura inicial do corpo de prova. O procedimento foi conduzido de acordo com a norma ASTM D-882/95. As amostras foram acondicionadas em ambiente padrão de laboratório antes da realização dos ensaios. Para o teste de tração, as amostras foram dobradas em sentidos distintos: Direção Máquina e Direção Transversal, com dobras de aproximadamente 10 mm, conforme orientação da norma interna da empresa. Em seguida, 40 corpos de prova foram cortados com gabarito padrão de 25,5 mm de largura, por 50mm de comprimento, garantindo a ausência de defeitos como rebarbas, rugas ou cortes irregulares. Durante o teste, foi inserida manualmente a espessura individual de cada corpo de prova. Os ensaios de tração foram realizados em dinamômetro da marca

Instron modelo EMIC 23-5D, com distância entre garras fixada em 25,4 mm (1pol), e uma velocidade de ensaio de 500mm/min.

3.3.4 Análise de opacidade

A análise de opacidade realizada com o auxílio de um Espectrofotômetro da marca Exact e modelo Pantone Xrite, configurado previamente na função de medição de opacidade. O procedimento seguiu os princípios da norma ASTM D1003. Inicialmente, procedeu-se a calibração do equipamento, realizando uma medição sobre uma superfície preta (placa de mármore), seguida por uma segunda medição sobre um fundo branco. Esse processo é necessário para que o equipamento estabeleça a referência óptica correta. Após a calibração, foram realizadas três medições em diferentes pontos de cada amostra. O valor de opacidade exibido automaticamente no visor do equipamento após cada leitura, representou a porcentagem de bloqueio da luz pela amostra, sendo um parâmetro crítico para materiais brancos ou opacos utilizados em embalagens flexíveis. Calculou-se a opacidade segundo Equação 3.

$$Opacidade = \left(\frac{Rb}{Rw} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

Rb = refletância da amostra sobre fundo preto

Rw = refletância da amostra sobre fundo branco

3.3.5 Análise da taxa de transmissão de oxigênio

Determinou-se a taxa de transmissão de oxigênio conforme a norma ASTM D3985-02, que estabelece um método para quantificar a permeação de oxigênio através de filmes poliméricos utilizando um sensor. As amostras de dimensionamento 5.64 cm² foram acondicionadas no OX-TRAN, da marca Macon modelo 2/20, que estabeleceu um método para quantificar a permeação de oxigênio através dos filmes poliméricos utilizando um sensor culométrico. A amostra foi acondicionada entre duas câmaras: uma contendo oxigênio e outra purgada com gás nitrogênio. O oxigênio que

atravessou o filme foi transportado pelo nitrogênio até o sensor, que gerou uma corrente elétrica proporcional à quantidade de oxigênio detectada. As quatro amostras foram devidamente acondicionadas em ambiente seco com temperaturas controladas. Para comparação de resultados seguiu-se a Tabela 4 descrita abaixo.

Tabela 4 -Classificação da barreira de oxigênio

Valor Obtido ($\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$)	Classificação
1 até 10	Alta barreira
10 até 200	Média barreira
Maior de 200	Baixa barreira

Fonte: POLI INSTRUMENTOS, 2025.

3.3.6 Análise de envelhecimento acelerado por radiação UV

A degradação dos filmes foi conduzida por meio de um processo de envelhecimento acelerado em câmara de radiação UVB (marca Comexim Matérias Primas Ind. Com. Ltda.), instalada no Laboratório de Materiais (LAMAT) da Universidade de Caxias do Sul (UCS). O equipamento opera em ciclos alternados de exposição à radiação UVB a 60 °C e condensação a 40 °C, com duração de 4 horas cada etapa, totalizando um ciclo completo de 8 horas. As amostras foram expostas na câmara por 48 horas consecutivas. Para as análises espectroscópicas, foram preparadas quatro amostras de 150 mm × 75 mm, analisadas antes e após o processo de envelhecimento. As medições de Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas em um espectrofotômetro ThermoScientific Nicolet™ IS™10, no modo Refletância Total Atenuada (ATR). Cada amostra foi submetida a 32 varreduras, com resolução de 4 cm^{-1} , cobrindo o intervalo espectral de 4000 a 400 cm^{-1} .

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados foi realizada com o objetivo de verificar se as diferenças observadas entre as amostras apresentavam significância estatística. Os dados experimentais foram organizados e tratados no software Microsoft Excel, sendo calculadas as médias e os desvios-padrão para cada condição avaliada.

Para comparar os resultados obtidos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) de um fator, considerando um nível de significância de 5%. Quando identificadas diferenças significativas entre os grupos, procedeu-se à aplicação do teste de comparações múltiplas de Tukey, a fim de determinar quais amostras diferiram estatisticamente entre si. As análises estatísticas foram aplicadas às variáveis de espessura, propriedades mecânicas (tração, alongamento e módulo), opacidade e brilho das amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos por meio da pesquisa realizada, com ênfase nas principais análises decorrentes da coleta de dados. Tais resultados fornecem uma visão abrangente do estudo, contribuindo significativamente para o cumprimento dos objetivos estabelecidos neste trabalho.

4.1 ANÁLISE DE ESPESSURA DAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR

Os resultados das médias e dos desvios-padrão, obtidos a partir de dez medições de espessura que foram realizadas em cada uma das quatro amostras, conforme os critérios estabelecidos pela norma ISO 4593, estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Análise de Espessura

Amostra	140 SA	140 CA	170 SA	170 CA
Média (μm)	0,142 ^a	0,139 ^a	0,166 ^b	0,165 ^b
Desvio Padrão (μm)	0,001	0,001	0,002	0,002

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$). Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Observa-se que as amostras de 140 μm apresentaram médias de 0,142 μm (sem aditivo) e 0,139 μm (com aditivo), enquanto as amostras de 170 μm apresentaram valores médios de 0,166 μm (sem aditivo) e 0,165 μm (com aditivo). Nota-se que os valores médios das espessuras se encontram próximos dos seus valores nominais, indicando uniformidade no processo de produção. Além disso, os desvios padrões foram baixos em todas as amostras variando entre 0,001 μm e 0,002 μm , o que evidencia consistência nas medições e dispersão de dados reduzida. A inserção do aditivo não apresentou influência significativa na variação da espessura dos filmes avaliados.

No processo de extrusão de filmes, a espessura do filme é influenciada por diversos fatores, incluindo a geometria do molde, a taxa de extrusão, a temperatura do polímero fundido, a velocidade do ar de resfriamento e a taxa de expansão do balão. Alterações em qualquer um desses parâmetros pode resultar em flutuações na

espessura do filme, comprometendo suas propriedades mecânicas, ópticas e funcionais (KRAUS et al., 2021).

Adicionalmente, o design do sistema de orientação de ar desempenha papel fundamental na uniformidade do filme, pois modificações no anel de ar podem provocar variações significativas no padrão de fluxo e nas taxas de resfriamento localizadas, afetando diretamente a espessura final. Kraus et al. (2021) demonstrou que a estabilidade do balão é crucial para manter a uniformidade da espessura, dessa forma, o controle preciso desses parâmetros como temperatura, pressão e velocidade de extrusão é essencial para garantir a qualidade do produto final.

4.2 ANÁLISE DE BRILHO DAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR

Os resultados das médias e dos desvios-padrão, obtidos a partir de dez medições de brilho realizadas em cada uma das quatro amostras, conforme os critérios estabelecidos pela norma ISO 2813, estão apresentados na Tabela 6. Observa-se que os valores médios de brilho permitem avaliar a uniformidade superficial das amostras e possíveis efeitos da presença de aditivos, fornecendo informações importantes sobre a qualidade óptica dos filmes.

Tabela 6 - Análise de Brilho

Amostra	140 SA	140 CA	170 SA	170 CA
Média (GU)*	120 ^a	121 ^a	120 ^a	99 ^b
Desvio Padrão (GU)	4,19	3,26	6,29	3,67

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$). Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

*GU = Gloss Unit

Fonte: O autor, 2025

Observa-se que as amostras de 140 μm apresentaram valores próximos entre si, 120 GU para 140 SA e 121 GU para 140 CA, ambos superiores ao valor padrão de 93,7 GU, indicando que a presença do aditivo não exerceu influência significativa nessa espessura. Para as amostras de 170 μm , a condição sem aditivo (170 SA)

apresentou média de 120 GU, também acima do valor de referência, de 93,7 GU enquanto a condição com aditivo (170 CA) resultou em 99 GU, valor mais próximo do padrão estabelecido. Esse resultado sugere que, em filmes mais espessos, a incorporação do aditivo contribuiu para a redução do brilho, aproximando-o do valor padrão.

Além disso, os desvios-padrão variaram entre 3,26 e 6,29, o que evidencia consistência das medições. A maior dispersão foi observada na amostra 170 SA, que possivelmente pode estar relacionada a instabilidades do processo ou à maior sensibilidade do brilho em filmes mais espessos sem aditivo.

Um estudo de Zhang et al. (2023) investigou os efeitos da espessura do filme e da concentração de foto iniciador, utilizado como aditivo fotoprotetor, sobre as propriedades de revestimentos poliméricos curados por UV. Os autores verificaram que, à medida que a espessura do filme aumenta, ocorre uma redução do brilho superficial (*gloss*), aproximando-o de valores de referência, enquanto filmes mais finos apresentam maior brilho. Além disso, a presença do aditivo fotoprotetor mostrou-se importante para a preservação das características da superfície, evitando degradação óptica causada pela radiação UV. Os resultados também indicaram que a espessura do filme e a concentração do aditivo influenciam propriedades como rugosidade e coeficiente de atrito, que impactam a aparência e a funcionalidade do material.

4.3 ANÁLISE DE OPACIDADE DAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR

Os resultados das médias e dos desvios-padrão, obtidos a partir de dez medições de opacidade realizadas em cada uma das quatro amostras, conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D1003 estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de Opacidade

Amostra	140 SA	140 CA	170 SA	170 CA
Média (%)	4,70% ^a	4,00% ^a	3,85% ^b	4,50% ^b
Desvio Padrão	0,15	0,23	0,22	0,31

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$).

Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025.

Os resultados das medições de opacidade indicam que tanto a espessura do filme quanto a presença do aditivo influenciam as propriedades ópticas das amostras. Para os filmes de 140 μm , a adição do aditivo resultou em uma redução da opacidade, passando de 4,7 (140 SA) para 4,0 (140 CA), enquanto nos filmes de 170 μm , a presença do aditivo provocou aumento da opacidade, de 3,85 (170 SA) para 4,5 (170 CA). Esses dados sugerem que o efeito do aditivo sobre a opacidade é dependente da espessura do filme, refletindo uma interação complexa entre o aditivo e a matriz polimérica.

Adicionalmente, os desvios-padrão observados variaram de 0,15 a 0,31, evidenciando consistência das medições. O maior desvio foi registrado na amostra 170 CA, possivelmente decorrente de pequenas variações na distribuição do aditivo ou irregularidades na formação do filme mais espesso.

De forma consistente com esses resultados, Delgado et al. (2011) analisaram filmes de LDPE com diferentes aditivos e observaram que a adição de componentes químicos específicos reduz a transmissão de luz tanto na faixa visível quanto na ultravioleta. O estudo destacou que os aditivos podem atuar de forma difusiva ou absorvente, modulando a opacidade do filme e protegendo o conteúdo ou o ambiente interno. Além disso, os autores evidenciaram que a interação entre o aditivo e a matriz polimérica é complexa e dependente da natureza química do aditivo, da concentração utilizada e da espessura do filme, corroborando o efeito dependente de espessura observado nas amostras deste trabalho.

O estudo de Delgado et al. (2011) também ressalta que a distribuição homogênea do aditivo é essencial para garantir propriedades ópticas consistentes, o que explica a maior variabilidade observada em filmes mais espessos, como a amostra 170 CA.

4.4 ANÁLISE DE TRANSMISSÃO DE OXIGÊNIO NAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR

Os resultados da transmissão de oxigênio obtidos a partir de uma medição em cada uma das quatro amostras, conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D3985-02 estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Análise da transmissão de oxigênio

Amostra	140 SA	140 CA	170 SA	170 CA
Transmissão (cc/(m ² · dia))	1,533	24,141	1,494	0,924
Definição	Alta Barreira	Média Barreira	Alta Barreira	Alta Barreira

Fonte: O autor, 2025

Quanto à transmissão de oxigênio, observa-se um comportamento também dependente da espessura: nos filmes finos (140 µm), a presença do aditivo aumentou a permeabilidade ao oxigênio, passando de 1,535 cc/(m²·dia) em (140 SA) para 24,141cc/(m²·dia) (140 CA), o que reduziu a classificação de alta barreira para média barreira conforme definido na Tabela 4. Em contraste, nos filmes mais espessos (170 µm), o aditivo contribuiu para uma melhora da barreira, com transmissão de 0,924 cc/(m²·dia) (170 CA) em comparação com 1,494 cc/(m²·dia) (170 SA).

Estudos recentes corroboram com os achados deste trabalho, evidenciando que tanto a espessura do filme quanto a presença de aditivos influenciam diretamente as propriedades de barreira ao oxigênio em filmes de LDPE. Safandowska et al. (2024) investigaram o impacto de aditivos de baixa massa molar, como tetracosano e cera de parafina, na matriz de LDPE. Os resultados indicaram que a incorporação desses aditivos reduziu a permeabilidade ao oxigênio, enquanto o óleo de parafina apresentou efeito contrário, aumentando a permeabilidade. Além disso, os autores destacaram que a espessura do filme desempenha papel crucial, sendo que filmes mais espessos apresentaram melhor desempenho de barreira.

De forma complementar, Ornelas-Paz et al. (2012) estudaram a permeação de oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água em filmes reciclados de LDPE de diferentes espessuras. Os resultados mostraram que a espessura do filme afeta diretamente as propriedades de barreira, com filmes mais espessos apresentando

menor permeabilidade, reforçando a importância da espessura do filme na modulação da barreira a gases.

4.5 ANÁLISES MECÂNICAS NAS AMOSTRAS COM E SEM O ADITIVO FOTOPROTETOR

Os resultados das análises mecânicas, obtidos a partir de medições realizadas em cada uma das quatro amostras, nas direções Direção Máquina (DM) e Direção Transversal (DT) ao processo de extrusão, conforme os critérios estabelecidos pela norma ASTM D-882/95, estão apresentados nos subitens a seguir.

4.5.1 Resistência a tração na força máxima

A média das medições de resistência a tração nas direções Direção Máquina (DM) e Direção Transversal (DT) para os filmes de 140 μm e 170 μm estão apresentadas na Tabela 9 e na Tabela 10. Cada medição foi realizada em cinco pontos diferentes da amostra, garantindo maior representatividade e confiabilidade dos resultados.

Tabela 9 – Resistência a tração na força máxima da Amostra de 140 μm

Amostra	140 SA (DT)	140 CA(DT)	140 SA(DM)	140 CA(DM)
Média (MPa)	35,15 ^a	37,70 ^a	37,00 ^a	39,69 ^a
Desvio Padrão	0,68	1,29	0,47	1,07

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$).

Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Tabela 10 - Resistência a tração na força máxima da Amostra de 170 μm

Amostra	170 SA (DT)	170 CA(DT)	170 SA(DM)	170 CA(DM)
Média (MPa)	36,20 ^a	43,22 ^a	42,17 ^a	37,93 ^a
Desvio Padrão	1,52	2,56	2,02	3,69

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$).

Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

A análise das médias de resistência à tração mostra que tanto a direção do filme quanto a presença do aditivo influenciam significativamente o desempenho mecânico. Observa-se anisotropia, já que a resistência a tração é maior na direção da máquina (DM) do que na direção transversal (DT). O aditivo aumentou a resistência a tração na força máxima em ambas as direções, sendo seu maior efeito na amostra de 140 CA (DM). A presença do aditivo de proteção UV levou a um aumento da resistência à tração da força máxima provavelmente porque promoveu uma maior preservação da estrutura polimérica, reduzindo a ocorrência de rompimentos de cadeia. Conseqüentemente, a matriz polimérica manteve melhor a integridade mecânica, resultando em valores mais elevados de carga de ruptura.” Além disso, o aditivo pode ter melhorado a estabilidade microestrutural da amostra, reduzindo defeitos e microfissuras iniciais, o que contribuiu para o desempenho mecânico superior observado.

Em estudos com filmes de polietileno modificados com CaCO_3 e aditivos antioxidantes, observou-se que a resistência à tração aumentou em ambas as direções (longitudinal e transversal), embora o ganho tenha sido maior na direção longitudinal, especialmente em determinadas composições de carga e tipo de aditivo (Fedotova et al., 2025). Este comportamento espelha o que se observou nas amostras de 140 CA (DM) do presente estudo, onde o aditivo teve efeito mais pronunciado nesta direção.

Além disso, filmes de LDPE com diferentes espessuras apresentaram diferenças estatísticas significativas entre DM e DT em resistência à tração, confirmando a anisotropia inerente à orientação e processamento do filme (LDPE building films; 2021).

4.5.2 Alongamento das amostras em direção DM e DT

As médias das medições de alongamento nas direções Máquina (DM) e Transversal (DT) dos filmes com espessuras de 140 μm e 170 μm estão apresentadas nas Tabelas 11 e 12, respectivamente. Cada ensaio foi realizado em cinco pontos distintos de cada amostra, assegurando maior representatividade e confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 11- Alongamento das Amostras de 140 μm

Amostra	140 SA (DT)	140 CA(DT)	140 SA(DM)	140 CA(DM)
Média (%)	527,4 ^b	537,2 ^a	504 ^b	535 ^a
Desvio Padrão	4,72	7,44	8,4	4,4

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$). Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Tabela 12 – Alongamento das Amostras de 170 μm

Amostra	170 SA (DT)	170 CA(DT)	170 SA(DM)	170 CA(DM)
Média (%)	512,8 ^a	560,4 ^a	517,2 ^a	529,8 ^a
Desvio Padrão	14,16	11,92	11,76	26,56

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$). Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Para os filmes de 140 μm , observou-se aumento significativo do alongamento nas amostras com aditivo em ambas as direções, indicando que o aditivo favoreceu a maior mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em maior ductilidade. De acordo com estudos sobre aditivos de processamento de polímeros, tais substâncias podem melhorar a fluidez do polímero durante a extrusão, facilitando a orientação das cadeias e, conseqüentemente, aumentando a ductilidade do filme (TAPPI, 2004).

Nas amostras de 170 μm , o efeito do aditivo foi mais evidente na direção transversal (DT), embora sem diferença estatística significativa em relação à amostra sem aditivo. Verificou-se também que a direção da máquina (DM) apresentou menores valores de alongamento, confirmando a anisotropia típica de filmes extrudados, nos quais as cadeias são mais orientadas no sentido do fluxo. Esse comportamento sugere que o aditivo favorece maior mobilidade das cadeias poliméricas, resultando em aumento da ductilidade do material.

De forma geral, os resultados demonstram que o aditivo contribui para melhorar o alongamento, especialmente em filmes mais finos, enquanto a maior espessura reduz o efeito do aditivo e intensifica a diferença entre as direções DM e DT. Além disso, pesquisas indicam que a espessura do filme influencia diretamente suas propriedades mecânicas, sendo que filmes mais espessos tendem a apresentar maior

resistência, porém menor ductilidade, devido à menor orientação das cadeias poliméricas (ZLACHETKA et al., 2021).

4.5.3 Módulo de elasticidade das amostras em direção DM e DT

Os valores médios dos módulos nas direções Máquina (DM) e Transversal (DT) referentes aos filmes de 140 μm e 170 μm encontram-se apresentados nas Tabelas 13 e 14, respectivamente. As medições foram realizadas em cinco regiões distintas de cada amostra, a fim de assegurar maior precisão e representatividade dos resultados.

Tabela 13 - Módulo de elasticidade das amostras de 140 μm

Amostra	140 SA (DT)	140 CA(DT)	140 SA(DM)	140 CA(DM)
Módulo (MPa)	400,3 ^b	423,4 ^a	392,6 ^b	422,4 ^a
Desvio Padrão	7,47	3,8	10,0	7,7

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$).

Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Tabela 14 - Módulo de elasticidade das amostras de 170 μm

Amostra	170 SA (DT)	170 CA(DT)	170 SA(DM)	170 CA(DM)
Módulo (MPa)	326,4 ^b	378,4 ^a	325,44 ^b	368,6 ^a
Desvio Padrão	12	6,9	14,5	4,8

Obs: Letras iguais indicam que não houve diferença estatística significativa entre as médias ($p > 0,05$).

Letras diferentes indicam diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$).

Fonte: O autor, 2025

Observa-se que as amostras contendo o aditivo UV (CA) apresentaram valores de módulo de elasticidade significativamente superiores às amostras sem aditivo (SA), tanto na direção transversal (DT) quanto na direção máquina (DM), para os filmes de 140 μm e 170 μm . Esse resultado indica que, nas condições analisadas, a presença do aditivo contribuiu para o aumento da rigidez do material, possivelmente em decorrência de uma maior interação intermolecular entre as cadeias poliméricas, que restringe a mobilidade segmentar e confere maior resistência à deformação. No entanto, é importante ressaltar que determinados tipos ou concentrações de aditivos

podem exercer efeito oposto, promovendo aumento da ductilidade e do alongamento, comportamento associado à ação plastificante em algumas formulações poliméricas. Além disso, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as direções de ensaio, o que sugere um comportamento mecânico homogêneo nas diferentes orientações do filme, independentemente da espessura analisada.

Em contraste, Yousef (2023) observou que a adição de aditivos oxo-degradáveis reduziu as propriedades mecânicas dos filmes, indicando degradação acelerada. Isso sugere que diferentes tipos de aditivos podem ter efeitos distintos nas propriedades mecânicas dos filmes poliméricos.

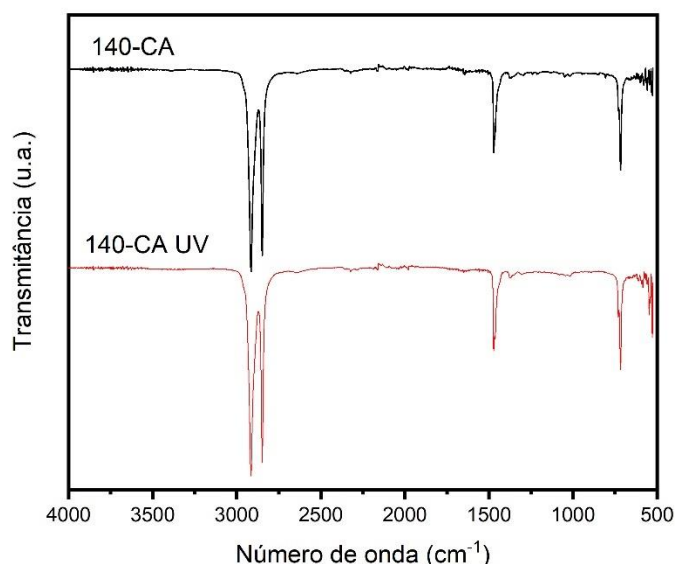
Delgado et al. (2017) corrobora esses achados, destacando que a incorporação de aditivos, como absorvedores de luz UV, pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas dos filmes de LLDPE. Os resultados indicaram que a variação na concentração de um aditivo na mistura não gerou mudanças significativas nas propriedades físico-mecânicas dos filmes. No entanto, a incorporação de um absorvedor de luz UV e aditivos fotoprotetores nas formulações favoreceu suas propriedades mecânicas. Comparado com o filme referência, determinou-se um aumento superior a 200% no módulo de elasticidade e na tensão de escoamento dos filmes. Esse aumento pode estar relacionado à maior rigidez conferida pela interação intermolecular entre as cadeias poliméricas e as moléculas do aditivo, que apresentam estruturas aromáticas capazes de restringir a mobilidade segmentar do polímero. Além disso, os aditivos podem atuar como agentes nucleantes, promovendo um aumento na cristalinidade da matriz e reduzindo defeitos estruturais, o que contribui para maior resistência mecânica.

4.6 ANÁLISE DO FTIR APÓS ENVELHECIMENTO ACELERADO POR UV

Nesse tópico, são apresentadas as análises de FTIR realizadas para as quatro amostras antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado em câmara de UVB. Por meio dessa avaliação, busca-se verificar a estabilidade estrutural do polímero e a eficácia do aditivo de proteção UV, observando possíveis alterações químicas decorrentes da exposição à radiação ultravioleta.

A Figura 15 apresenta os espectros de infravermelho obtidos para a amostra 140-CA, correspondente ao material com aditivo UV, antes e depois da radiação ultravioleta.

Figura 15 - Análise FTIR da amostra 140CA



Fonte: O autor, 2025

Observa-se que ambos os espectros apresentam comportamentos semelhantes, indicando que a estrutura química principal do polímero foi preservada mesmo após o ensaio de envelhecimento acelerado. As bandas características observadas em aproximadamente 2915 e 2848 cm^{-1} estão associadas aos estiramentos de ligação C–H de grupos metila e metileno, típicos de cadeias alifáticas presentes em polímeros como o polietileno. As bandas em torno de 1470 e 720 cm^{-1} correspondem às deformações angulares de ligações C–H e às vibrações de empacotamento cristalino do material, respectivamente. A presença dessas bandas

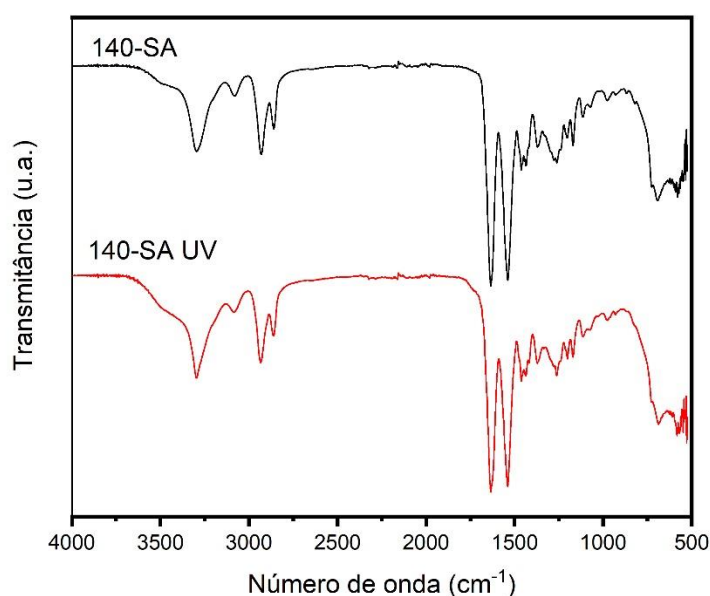
em ambas as amostras confirma a manutenção das estruturas químicas principais após a exposição.

Ao comparar os espectros, nota-se que a amostra 140-CA UV apresenta pequenas variações na intensidade de algumas bandas, especialmente na região próxima de 1700 cm^{-1} , a qual pode estar relacionada à formação de grupos carbonila (C=O). Esse comportamento é comumente associado à oxidação superficial decorrente da degradação fotoinduzida.

Entretanto, a baixa intensidade desse sinal é um resultado positivo dentro do objetivo do presente estudo, uma vez que demonstra que o processo de oxidação ocorreu de forma limitada, no entanto, a baixa intensidade desse sinal indica que o processo de oxidação foi limitado, sugerindo que o aditivo UV atuou de forma eficaz, reduzindo a formação de produtos de degradação e preservando as ligações principais do polímero. (SILVA et al., 2023)

A Figura 16 apresenta os espectros de infravermelho obtidos para as amostras, 140-SA correspondente ao material sem o aditivo UV, antes e depois da radiação ultravioleta.

Figura 16 - Análise FTIR da amostra 140SA

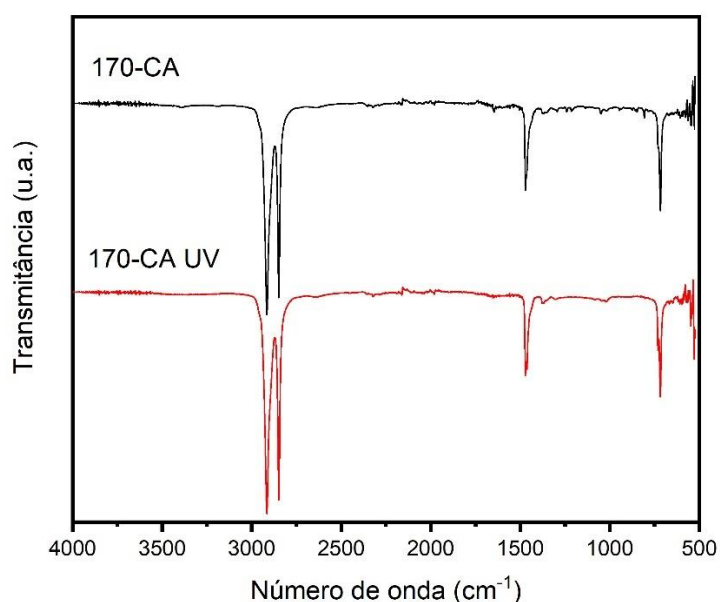


Fonte: O autor, 2025

As bandas características em aproximadamente 2915 e 2848 cm^{-1} , referentes aos estiramentos C–H de grupos metila e metileno, permanecem presentes, indicando que a estrutura básica do polímero foi mantida. Entretanto, nota-se um aumento de intensidade e alargamento da banda próxima a 1700 cm^{-1} , atribuída à formação de grupos carbonila (C=O), e de uma banda em torno de 3300 cm^{-1} , associada à formação de grupos hidroxila (O–H). Essas novas absorções são típicas de processos de oxidação e degradação fotoquímica, resultantes da quebra das cadeias poliméricas e da formação de produtos oxigenados. (SILVA; OLIVEIRA; GONZÁLEZ, 2023; GHALIA; BOUAZIZ, 2019). A presença dessas alterações confirma que o material sem aditivo sofreu degradação após a exposição UV, o que compromete sua estabilidade química e estrutural. (MONTAGNA; BERTIN; BRÜCKNER, 2020).

A Figura 17 apresenta os espectros de infravermelho obtidos para as amostras, 170-CA correspondente ao material com o aditivo UV, antes e depois da radiação ultravioleta.

Figura 17 - Análise FTIR da amostra 170CA

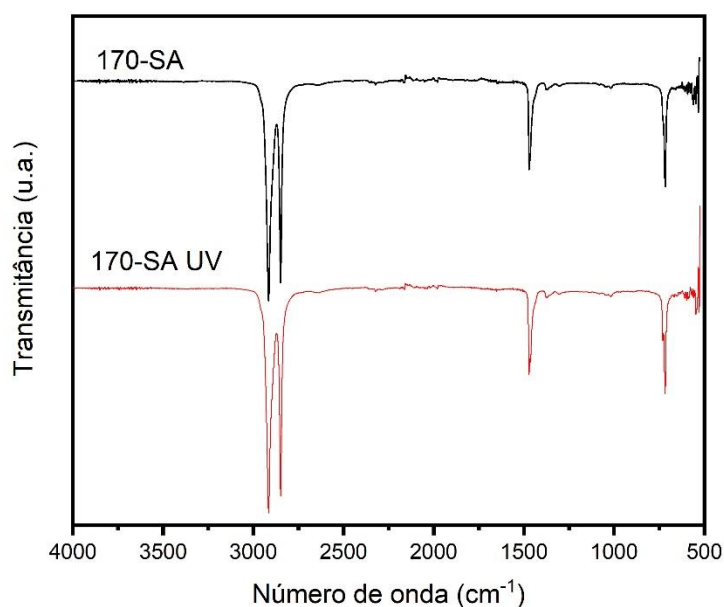


Fonte: O autor, 2025

As principais bandas observadas em 2915 e 2848 cm^{-1} correspondem aos estiramentos de ligação C–H de grupos metila e metileno, enquanto as bandas em 1470 e 720 cm^{-1} estão associadas às deformações angulares C–H e ao empacotamento cristalino do polímero. A ausência de novas bandas ou de aumento expressivo na região de 1700 cm^{-1} (relacionada a grupos carbonila, C=O) sugere baixa formação de produtos de oxidação, evidenciando a eficiência do aditivo UV na proteção da matriz polimérica. Comparativamente, a amostra 170-CA apresentou maior estabilidade estrutural do que as amostras de menor espessura, o que pode estar relacionado à redução da penetração da radiação UV em filmes mais espessos. (SILVA; OLIVEIRA; SANTOS, 2023).

A Figura 18 apresenta os espectros de infravermelho obtidos para as amostras, 170-SA correspondente ao material sem o aditivo UV, antes e depois da radiação ultravioleta.

Figura 18 - Análise FTIR da amostra 170SA



Fonte: O autor, 2025

Observa-se que ambos os espectros exibem as mesmas bandas principais, localizadas em 2915 e 2848 cm^{-1} , associadas aos estiramentos C–H de grupos metila

e metileno, e em 1470 e 720 cm^{-1} , correspondentes às deformações angulares e vibrações cristalinas do polímero. Apesar da similaridade geral entre os espectros, nota-se que a amostra 170-SA UV apresenta uma banda de pequena intensidade na região de 1700 cm^{-1} , indicando a possível formação de grupos carbonila (C=O), além de um leve aumento de absorção na faixa de 3300 cm^{-1} , que pode estar associada à formação de grupos hidroxila (O–H). Essas modificações são indicativas de oxidação superficial e início de fotodegradação, fenômeno comum em polímeros expostos à radiação ultravioleta na ausência de aditivos protetores. Observa-se ainda a presença de leve ruído de fundo, principalmente nas regiões próximas a 3300 cm^{-1} e abaixo de 1000 cm^{-1} , possivelmente associado a flutuações instrumentais. No entanto, as principais bandas características permanecem bem definidas, permitindo a identificação confiável das alterações estruturais observadas. (Petroody et al., 2023; Sandt et al., 2021; Campanale et al., 2023).

Campanale et al. (2023) investigaram o grau de degradação e envelhecimento de microplásticos (MPs) expostos a diferentes condições ambientais e laboratoriais, empregando a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (ATR-FTIR) como ferramenta analítica. O trabalho teve como objetivo principal comparar partículas poliméricas virgens, envelhecidas artificialmente e microplásticos coletados em ambiente natural, a fim de compreender as transformações estruturais associadas à oxidação e à quebra das cadeias poliméricas. Os autores analisaram polímeros amplamente utilizados na indústria de embalagens, como o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e o poliestireno (PS). Para simular o envelhecimento artificial, as amostras foram submetidas à radiação UVA (340 nm) durante cerca de 20 dias, seguida de incubação térmica a 45 °C por 25 dias. As alterações químicas resultantes foram avaliadas por meio de espectros de FTIR na faixa de 4000 a 500 cm^{-1} , possibilitando identificar a formação de novos grupos funcionais e o avanço da degradação oxidativa.

Os espectros obtidos evidenciaram o surgimento de novas bandas nas regiões próximas de 3300 cm^{-1} , associadas aos grupos hidroxila (O–H), de 1700 cm^{-1} , atribuídas aos grupos carbonila (C=O), e entre 900 e 1200 cm^{-1} , referentes às vibrações de ligação C–O. Tais alterações são indicativas da oxidação fotoquímica e da subsequente quebra de cadeias, fenômenos típicos de polímeros expostos à radiação ultravioleta.

5 CONCLUSÃO

Dessa forma, conclui-se que tanto a adição do aditivo UV quanto o aumento da espessura dos filmes contribuíram de maneira positiva para a proteção contra a radiação ultravioleta e para a preservação das propriedades ópticas, mecânicas e estruturais dos filmes poliméricos coextrusados. De modo geral, os melhores resultados técnicos foram observados nos filmes com 170 μm contendo aditivo UV, que apresentaram maior estabilidade frente ao envelhecimento acelerado e menor evidência de degradação fotoquímica. Entretanto, os filmes de 140 μm com aditivo UV também demonstraram desempenho satisfatório, configurando-se como uma alternativa tecnicamente viável.

Sob a perspectiva econômica, o aumento da espessura implica maior consumo de matéria-prima e, conseqüentemente, maior custo de produção, enquanto a incorporação do aditivo UV representa um acréscimo relativamente reduzido no custo total da embalagem. Dessa forma, a utilização de filmes mais finos aditivados surge como uma solução equilibrada entre desempenho e custo, especialmente para aplicações que não exigem longos períodos de exposição à radiação UV.

As principais dificuldades observadas estiveram relacionadas à otimização do equilíbrio entre custo e desempenho, à interação do aditivo com a matriz polimérica que pode influenciar propriedades ópticas como brilho e opacidade, e ao controle do processo de coextrusão, visando garantir a homogeneidade da distribuição do aditivo e a uniformidade da espessura dos filmes. Além disso, aspectos como compatibilidade do aditivo, potencial de migração e atendimento às normas para embalagens destinadas ao contato com alimentos representam desafios relevantes para a aplicação industrial.

Assim, os resultados reforçam a importância da otimização conjunta da espessura e da aditivação UV no desenvolvimento de embalagens flexíveis mais eficientes, com desempenho adequado e viabilidade econômica, contribuindo para o aumento da vida útil dos produtos embalados. Por fim, este estudo evidencia o potencial da tecnologia de coextrusão aliada ao uso de aditivos fotoprotetores como estratégia promissora para a indústria de embalagens, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 9 e 12, ao promover inovação tecnológica e incentivar práticas de produção mais sustentável.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos e as limitações observadas durante o desenvolvimento deste estudo, propõem-se a seguir algumas sugestões de trabalhos futuros que poderão contribuir para o aprofundamento da pesquisa sobre o uso de aditivos fotoprotetores em embalagens poliméricas.

- a) Avaliação de diferentes tipos de aditivos fotoprotetores;
- b) Estudo da migração de aditivos UV para alimentos simulantes;
- c) Análise da influência da concentração do aditivo;
- d) Estudo de custo-benefício e viabilidade industrial;
- e) Investigação da influência da temperatura e umidade na degradação UV;
- f) Otimização do processo de coextrusão;
- g) Análise do desempenho das embalagens com diferentes produtos;
- h) Integração com políticas de economia circular;
- i) Comparativo entre envelhecimento UVB e UVA.

REFERÊNCIAS

ABIPLAST **Aposta em competitividade e inovação, comemora avanços do setor e vê 2025 promissor.** São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/abiplast-aposta-em-competitividade-e-inovacao-comemora-avancos-do-setor-e-ve-2025-promissor/>. Acesso em 15 de abril de 2025.

ABRAE. **A importância da embalagem de alimentos na conservação e segurança alimentar.** *Associação Brasileira de Embalagens*. 2020. Disponível em: <https://www.abrae.org.br/a-importancia-da-embalagem-de-alimentos-naconservacao-e-seguranca-alimentar> Acesso em 15 de abril de 2025.

ABRE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGENS. **A história das embalagens: Como e porque surgiram.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.abre.org.br/inovacao/embalagem/a-historia-das-embalagens-como-e-porque-surgiram/>. Acesso em 12 de abril de 2025.

ALLEN, Norman S.; EDGE, Mark. **Fundamentos da degradação e estabilização de polímeros.** 2. Ed. Dordrecht: Springer, 2003.

ALLIED MARKET RESEARCH. **Previsão do mercado de embalagens flexíveis até 2032. 2024.** Disponível em: <https://www.alliedmarketresearch.com/flexible-packaging-market>. Acesso em: 16 de abril 2025.

AMANO, Ken-ichi. **Cálculo da transmitância de luz em um filme: considerações sobre a geometria do revestimento, a distribuição do agente e sua distribuição de densidade de probabilidade.** 4 de maio de 2020. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2005.01293>. Acesso em: 30 de maio de 2025.

ANDRADY, Anthony L.; NEAL, Matthew A. **Aplicações e benefícios sociais dos plásticos.** *Europe PMC*, 2009. Disponível em: <https://europepmc.org/abstract/MED/19528050>. Acesso em: 25 de abril de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS – ABIEF. **Panorama do setor de embalagens plásticas flexíveis no Brasil: crescimento e tendências.** São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.abief.org.br> Acesso em 13 de abril de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO – ABIPLAST. **Plástico Brasil 2025: inovação, sustentabilidade e crescimento do setor.** São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.abiplast.org.br/noticias/plastico-brasil-2025-inovacao-sustentabilidade-e-crescimento-do-setor/>. Acesso em 15 de abril de 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM – ABRE. **Dados do setor de embalagens 2023.** São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2023-2/>. Acesso em 13 de abril de 2025.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM D1003 – 13: **Método de Ensaio Padrão para Turvação e Transmitância Luminosa de Plásticos Transparentes.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013. Disponível em: <https://www.astm.org/D1003-13.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. ASTM G155-21, **Prática padrão para operação de aparelho de luz de arco de xenônio para exposição de materiais não metálicos,** 2021.

ASTM INTERNATIONAL. **Método de ensaio padrão para taxa de transmissão de gás oxigênio através de filmes e lâminas plásticas utilizando sensor culométrico.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2002. Disponível em: <https://www.astm.org/d3985-02.html>. Acesso em: 19 jun. 2025.

AURAS, R.; SINGH, S. P.; SINGH, J. J. **Avaliação de polímeros de poli (ácido láctico) orientados em comparação com PET existente e PS orientado para embalagens de alimentos frescos.** Tecnologia e Ciência da Embalagem, v. 18, n. 4, p. 207–216, 2005.

BALBINOT FILHO, Clóvis Antônio; BORGES, Caroline Dellinghausen. **Efeitos da radiação UV-C em alface e maçã minimamente processadas: uma revisão.** *Brazilian Journal of Food Technology*, Campinas, v. 23, e2018321, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjft/a/mrM7c4RYQ6PZb5MRmHg94yQ/com>. Acesso em: 25 de maio 2025.

BALOGH, G. T.; GÁSPÁR, T. **Fotoproteção de polímeros por benzofenonas.** *Polymer Degradation and Stability*, v. 86, n. 2, p. 123-129, 2004.

BAMBACE, C. et al. **Embalagens flexíveis para a indústria alimentícia: materiais, tecnologias e sustentabilidade.** *Food Packaging and Shelf Life*, v. 25, p. 100558, 2020. DOI: 10.1016/j.fpsl.2020.100558. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214289420301009>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

CABRAL, L. M. **Oxidação e degradação de pigmentos em alimentos.:** Requisitos de Conservação de Alimentos em Embalagens Flexíveis. São Paulo: CETEA, 1980. Disponível em: https://ital.agricultura.sp.gov.br/arquivos/cetea/publicacoes/adi_24/files/assets/basic-html/page12.html. Acesso em: 16 de abril de 2025.

CAMPANALE, C.; et al. Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) para avaliar o grau de alteração de microplásticos envelhecidos artificialmente e expostos ao meio ambiente. *Polymers*, v. 15, n. 4, p. 911, 2023.

CAMPANALE, C.; SAVINO, I.; MASSARELLI, C.; URICCHIO, V. F. **Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier para avaliar o grau de alteração de microplásticos envelhecidos artificialmente e expostos ao intemperismo ambiental.** *Polímeros*, v. 15, n. 4, p. 911, 2023.

CAVALCANTI, Pedro; CHAGAS, Carmo. **História da embalagem no Brasil.** São Paulo: ABRE – Associação Brasileira de Embalagem, 2006.

CETEA - CENTRO DE TECNOLOGIA DE EMBALAGENS E ALIMENTOS. **Processos de laminação em embalagens flexíveis.** São Paulo: CETEA, 2020. Disponível em:

<http://www.cetea.com.br/laminacao-embalagens-flexiveis>. Acesso em: 10 de abril de 2025.

COLTRO, L.; BURATIN, A. E. P. **Garrafas de PET para óleo comestível: avaliação da barreira à luz.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 16, n. 4, p. 315-321, 2006.

COLTRO, Leda et al. **Avaliação de um absorvedor de UV adicionado a garrafas de PET para embalagens de óleo comestível.** *Tecnologia e Ciência de Embalagem*, v. 16, n. 1, p. 15–20, 2003. DOI: 10.1002/pts.607. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pts.607>. Acesso em: 20 de abril de 2025.

DELGADO, A. E.; APERADOR, W.; BAUTISTA RUÍZ, J. H. **Propriedades ópticas de filmes de LDPE com diferentes aditivos.** *Ingeniería y Ciencia*, v. 7, n. 14, p. 49–70, 2011.

DELGADO, Emilio; CHAPARRO, William Aperador; CARRILLO LEÓN, Juan. **Efeitos da incorporação de aditivos nas propriedades mecânicas de filmes de polietileno linear de baixa densidade.** *TECCIENCIA*, v. 12, n. 23, p. 57-68, 2017.

DUARTE, Glauce Warmeling; OLIVEIRA, Camila Machado de; SILVA, Luciano da; DAL BÓ, Alexandre Gonçalves; FIORI, Márcio Antônio. **Avaliação do efeito do tratamento corona na performance de estabilizadores de UV em filmes de PEBD.** *Revista Matéria*, v. 24, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0651>. Acesso em 15 de maio de 2025.

EMBRAPA. **Tecnologia de laminação para embalagens flexíveis.** Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tecnologia-laminacao-embalagens-flexiveis>. Acesso em: 10 de abril de 2025.

EUROPEAN COMMISSION. **Plásticos bio baseados, biodegradáveis e compostáveis.**s.d. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/biobased-biodegradable-and-compostable-plastics_en. Acesso em: 16 de abril de 2025.

EUROPLAS. **Polietileno tereftalato: o que é, propriedades, características principais e usos comuns.** Disponível em: <https://europas.com.vn/en-US/blog-1/polyethylene-terephthalate-what-is-it-properties-key-features-and-common-uses>
Acesso em 25 de abril de 2025.

FEDOTOVA, T. S.; BOCHKAREVA, S. A.; ALEKSEENKO, A. A.; et al. **Propriedades de tração e estruturais de filmes de polietileno modificados com antioxidante e CaCO₃.** *Polymers*, Basel, v. 17, n. 16, p. 2182, 2025.

FERRARI, A. M. et al. **Avaliação da oxidação lipídica em alimentos embalados sob diferentes condições de luz.** *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 33, n. 3, p. 545-551, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cta/a/xyz>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

FUTURE MARKET INSIGHTS. **Panorama do Mercado Global de Embalagens Flexíveis para 2024** Disponível em: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/flexible-packaging-market>. Acesso em 16 de abril de 2025.

GHALIA, N. B.; BOUAZIZ, J. Foto-oxidação de filmes de polietileno de baixa densidade: efeito de estabilizantes UV nas propriedades estruturais e mecânicas. *Polymer Degradation and Stability*, v. 165, p. 214–224, 2019.

GUZMÁN, Juan Carlos. **Tecnologia de alimentos. 2019.** Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/124518148/livro-tecnologia-de-alimentos-2019>. Acesso em 15 de abril de 2025.

HAN, Jung H. **Comportamento de permeabilidade de embalagens alimentícias: um relatório.** *International Journal of Polymer Science*, v. 2012, Artigo ID 302029, 11 p., 2012. Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/ijps/2012/302029/>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 4892-3:2016 **Plásticos — Métodos de exposição a fontes de luz em laboratório — Parte 3: Lâmpadas fluorescentes UV**". Geneva: ISO, 2016.

JACOBY, David. **Comércio, commodities e navegação no Mediterrâneo Medieval**. 1. ed. Aldershot: Ashgate, 1997. Acesso: 20 de julho de 2025.

JONES, M.; CLARK, P. **Efeitos das lâmpadas de vapor metálico nos processos de oxidação em ambientes de armazenamento de alimento**. *Food Packaging and Shelf Life*, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100500> Acesso: 20 de julho de 2025.

KIM, H. et al. **UV Proteção de filmes de polietileno multicamadas por meio da incorporação de aditivo UV.**" absorbers during blown film extrusion. *Journal of Applied Polymer Science*, New York, v. 135, n. 12, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.46390>. Acesso 22 de abril de 2025.

KOUTCHMA, T. et al. **Luz ultravioleta na tecnologia de alimentos: princípios e aplicações**. Boca Raton: CRC Press, 2009 Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/259148843_Ultraviolet_Light_in_Food_Technology_Principles_and_Applications. Acesso em: 26 de abril de 2025.

KRAUS, L.; HOPMANN, C.; FACKLAM, M.; GRÜBER, D. **Investigações das variações de espessura em filmes produzidos por extrusão por balão**. *Journal of Plastic Film & Sheeting*, v. 37, n. 1, p. 3-19, 2021.

LUZIN, Rangel M. **Síntese e avaliação de novos candidatos a fotoprotetores absorvedores de radiações UVA e UVB, desenhados a partir de compostos análogos a produtos naturais**. 2018 102 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.

MARSH, K.; BUGUSU, B. **Embalagem de alimentos — funções, materiais e questões ambientais**. *Journal of Food Science*, v. 72, n. 3, p. R39–R55, 2007.

Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2007.00301.x>. Acesso em: 28 de maio de 2025.

MARTINS, L. M.; COSTA, R. M. **Extrusão multicamadas: incorporações de aditivos funcionais em filmes plásticos**. *Revista Brasileira de Engenharia de Materiais*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 45-54, 2019. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBEM/article/view/11609>. Acesso em: 30 de março de 2025.

MONTAGNA, G.; BERTIN, L.; BRÜCKNER, S. Comportamento de fotodegradação de filmes à base de polietileno sob intemperismo acelerado: correlação entre estrutura química e desempenho mecânico. *Journal of Applied Polymer Science*, v. 137, n. 12, p. 48562, 2020

NASA. A ciência das ondas ultravioleta. Disponível em: https://science.nasa.gov/ems/10_ultravioletwaves/. Acesso em: 20 de abril de 2025.

NORMAN. **Refile na Indústria – Sua importância no corte de precisão**. Disponível em: <https://blog.norma.ind.br/refile-na-industria-sua-importancia-no-corte-de-precisao>. Acesso em 10 de abril de 2025.

OLIVEIRA, Gabriella Rocha Queiroz de. **Propriedades e aplicação industrial de blendas poliméricas de polietileno em embalagens flexíveis. 2023**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.

PEREIRA, J. R. **Proteção contra radiação UV em embalagens plásticas: avaliação do efeito de aditivos na extrusão**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

PETROODY, S.; et al. A luz ultravioleta causa alterações estruturais em microplásticos. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 30, n. 15, p. 43678–43692, 2023.

PETROQUÍMICA UNIÃO. História e evolução das embalagens flexíveis. São Paulo, 2024. Disponível em:

www.poliprop.com.br/embalagensflexiveis/historia_e_evolucao_das_embalagens

Acesso: 13 de abril de 2025.

PHILLIPS, Geoffrey; CLARK, Russell; DOUGLAS, John. **Impressão Flexográfica: Princípios e Práticas**. 2. ed. Nova York: Wiley, 2012.

PLANT OILS. **Óleos vegetais como barreira UV em filmes de biopolímeros**. *PMC – Óleos Vegetais como Aditivos Funcionais*, s.l., s.d. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11011941/>. Acesso em: 20 de abril 2025.

PLASTICNEWS. **Mercado global de embalagens plásticas: crescimento, tendências e oportunidades até 2034**. Disponível em: <https://plasticnews.org/mercado-global-de-embalagens-plasticas-crescimento-tendencias-e-oportunidades-ate-2034/>. Acesso em 13 de abril de 2025.

PLASTICSEUROPE. **Aplicações e benefícios sociais dos plásticos**. Europe PMC, 2009. Disponível em: <https://europepmc.org/abstract/MED/19528050>. Acesso em: 25 abril de 2025.

POLIPROP. **História e evolução das embalagens flexíveis**. São Paulo, 2024. Disponível em: https://www.poliprop.com.br/embalagensflexiveis/historia_e_evolucao_das_embalagens. Acesso em 12 de abril de 2025.

POLYMERPROCESSING.COM. **Processo de extrusão de filme soprado** Disponível em: <https://www.polymerprocessing.com/operations/fblow/index.html>. Acesso em 30 de abril de 2025.

POVEDA, Patricia Negrini Siqueira. **Estudo do efeito de nanopartículas de carbonato de cálcio, dióxido de titânio e óxido de zinco nas propriedades dos termoplásticos polietileno de baixa densidade linear e copoliéster alifático aromático, submetidos à radiação ultravioleta**. 2015. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Rennert, M. et al. (2013). **Influência da espessura do filme de polietileno de baixa densidade na orientação cristalina e nas propriedades mecânicas.** *Polymer Engineering & Science*, 53(10), 2143–2151.

RICHARDSON, Thomas **Durabilidade e envelhecimento de polímeros: aspectos físicos e químicos.** Nova Iorque: Springer, 2015.

ROBOTICPAINT. **Princípios de cura por UV e orientações de aplicação.** Robotic Paint, [S. l.], 2024. Disponível em: <https://roboticpaint.com/uv-curing-principles-and-application-guidance/>. Acesso em: 3 jul. 2025.

RODRIGUES, Isabela Russo. **Solventes orgânicos e efeito da temperatura em filmes multicamadas.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SANDT, C.; et al. Uso e mau uso da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) no estudo da bio-oxidação de plásticos. *Polymer Degradation and Stability*, v. 188, p. 109631, 2021.

SANTOS, F. A.; OLIVEIRA, M. S. **Uso de aditivos UV em filmes poliméricos para embalagens: processo e desempenho.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos, v. 27, n. 3, p. 275-282, 2017.

SANTOS, Juliana C. dos et al. **Desenvolvimento e caracterização de filmes ativos e inteligentes à base de amido e pigmentos naturais para embalagens alimentícias.** *Polymers*, Basel, v. 14, n. 12, p. 2505, 2022.

SARANTOPOULOS, Carlos M.; TEIXEIRA, Carlos F. **Embalagens plásticas flexíveis.** São Paulo: Editora Blücher, 2010. Embalagens-Plasticas-Flexiveis-Cap11
SARANTÓPOULOS, Claire I. G. L.; TEIXEIRA, Fábio G. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades.** 2. ed. Campinas:

SCRIBD. **Polipropileno (PP) Plástico: Tipos, Propriedades, Usos e Informações sobre Estrutura** Disponível em:

<https://www.scribd.com/document/470344889/Polypropylene-PP>. Acesso em: 20 de abril 2025.

SILVA, João P.; OLIVEIRA, Maria R.; SANTOS, Carlos L. **Compostos à base de triazina como estabilizadores UV em polímeros: absorção nas faixas UVA e UVB e dissipação térmica para prevenção da degradação foto-oxidativa.** *Journal of Polymer Science*.

SILVA, L. C.; OLIVEIRA, J. M.; GONZÁLEZ, D. A. **Efeito do envelhecimento UV em filmes de polietileno: análise por FTIR e influência de aditivos estabilizantes.** *Materials*, v. 16, n. 20, p. 4723, 2023.

SILVA, L. C.; OLIVEIRA, J. M.; GONZÁLEZ, D. A. Efeito do envelhecimento UV em filmes de polietileno: análise por FTIR e influência de aditivos estabilizantes. *Materials*, v. 16, n. 20, p. 4723, 2023.

SILVA, Marcos A.; PEREIRA, Ana L. **Uso de carotenoides como aditivos fotoprotetores em filmes poliméricos para embalagem alimentar.** *Revista Brasileira de Embalagens*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 34-45, 2021.

SIRACUSA, V.; RUSSO, C.; CORRERA, E. **Comportamento de permeabilidade de embalagens de alimentos: A report.** *International Journal of Polymer Science*, 2008.

SIRACUSA, Valentina et al. **Polímeros biodegradáveis para embalagens de alimentos: uma revisão.** *Trends in Food Science & Technology*, v. 19, n. 12, p. 634–643, dez. 2008.

SIRACUSA, Valentina et al. **Polímeros biodegradáveis para embalagens de alimentos: uma revisão.** *Tendências em Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>. Acesso em: 26 de abril de 2025.

Smith, J. et al. **Impacto da iluminação incandescente na qualidade dos alimentos: efeitos térmicos e fotodegradativos**. *Jornal de Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 2020.

Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04418-7>

Acesso em: 20 de abril de 2025.

SMITHERS. **O futuro das embalagens flexíveis globais até 2028**. 2023. Disponível em: <https://www.smithers.com/services/market-reports/packaging/the-future-of-global-flexible-packaging-to-2028>. Acesso em: 16 de abril de 2025.

SZLACHETKA, O.; KOWALSKI, A.; KOT, M.; et al. **Filmes de polietileno de baixa densidade (LDPE) para construção – Propriedades de tração e morfologia da superfície**. *Materials Today Communications*, [S.l.], v. 28, p. 102694, 2021.

TAPPI. **Aditivos de processamento de polímeros para ampliar a janela de processamento**. *TAPPI Journal*, [S.l.], v. 3, n. 8, p. 1-5, 2004.

TERRA. **Como os alimentos eram armazenados antes das geladeiras**. *Terra*, [s.l.], 3 ago. 2021. Disponível em: <https://www.terra.com.br/vida-e-estilo/degusta/como-os-alimentos-eram-armazenados-antes-das-geladeiras,792b3ee5b32e7358ece3a017b20710460pyqti8w.html>. Acesso em 15 de abril de 2025.

UERRERO-BELTRÁN, J. A.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. **Processamento de alimentos por luz ultravioleta**. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1082013204044359>. Acesso em: 25 de abril de 2025.

YOUSEF, Noha Said. **Degradação mecânica de filmes plásticos de polietileno por aditivos oxo-degradáveis**. *ChemEngineering*, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 17, 2023.

ZHANG, H.; LIU, Y.; WANG, X.; et al. **Efeitos da concentração de fotoiniciador e da espessura do filme nas propriedades de revestimentos curados por UV**. *Molecules*, v. 28, n. 6, p. 1189, 2023