

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA

HIGOR DINIZ RIBEIRO

Produção de filmes flexíveis à base de polietileno para embalagens de alta barreira, para aplicação em linha de limpeza, focados em sustentabilidade

Lorena
2024

HIGOR DINIZ RIBEIRO

Produção de filmes flexíveis à base de polietileno para embalagens de alta barreira, para aplicação em linha de limpeza, focados em sustentabilidade

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na área de concentração de Desenvolvimento de Produtos e Processos.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Gonçalves de Aguiar

Versão corrigida

Lorena
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Automatizado
da Escola de Engenharia de Lorena,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Ribeiro, Higor Diniz

Produção de filmes flexíveis à base de polietileno para embalagens de alta barreira, para aplicação em linha de limpeza, focados em sustentabilidade / Higor Diniz Ribeiro; orientador Leandro Gonçalves de Aguiar - Versão Corrigida. - Lorena, 2024.
80 p.

Dissertação (Mestrado em Ciências - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química na Área de Desenvolvimento de Produtos e Processos) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo.
2024

1. Evoh. 2. Alta barreira . 3. Polietileno . 4. Embalagens . 5. Reciclagem. I. Título. II. de Aguiar , Leandro Gonçalves , orient.

À minha mãe, com gratidão, amor e carinho, por toda sua incansável dedicação em me apoiar nessa conquista.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar mais essa conquista.

Ao Prof. Dr. Leandro Gonçalves de Aguiar, pela oportunidade em me orientar, paciência e dedicação.

À Prof. Dr. Patrícia Caroline Molgero da Rós, pela excelente supervisão durante o estágio PAE e por todo o incentivo.

À Ana Beatriz, por sempre estar disposta a ajudar e por toda sua motivação.

A todos os demais funcionários da EEL que me apoiaram durante esse ciclo.

À minha família, por sempre me motivarem e apoiarem a estudar e alcançar meus objetivos.

A todos meus amigos e colegas de trabalho que me ajudaram com ideias, conhecimentos, análises etc.

À empresa Dow Chemical Company e seus colaboradores, Gianna e Wellick, que me auxiliaram durante a preparação deste estudo.

RESUMO

RIBEIRO, H. D. Produção de filmes flexíveis à base de polietileno para embalagens de alta barreira, para aplicação em linha de limpeza, focados em sustentabilidade. 2024. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2024.

Este estudo consistiu na produção de um filme à base de polietileno, com alta barreira a gases, para embalagens de produtos de limpeza com alto teor de aroma, com o intuito de substituir a estrutura da embalagem atual que é composta por poliéster e polietileno. O objetivo da substituição é facilitar a reciclagem, já que a estrutura atual não é considerada reciclável por ser composta por polímeros diferentes. Para isso foi extrusado o filme em multicamadas com a utilização de poli(etileno-co-álcool vinílico) (EVOH) para promover alta barreira e utilizá-lo em baixo percentual para que o filme esteja dentro das premissas de reciclabilidade de organizações regulamentadoras. Para atender os requisitos da aplicação e desenvolver a estrutura do filme em estudo, foi realizada a caracterização do filme padrão em DSC e FTIR, sendo evidenciado a presença de polietileno, aditivos e PET. Também foi realizado análises de espessura com micrômetro e gramatura com balança analítica. A média da espessura encontrada foi de 170,27 μm e da gramatura 168,13 g/m^2 . Com base nos dados encontrados e no objetivo do estudo, foram selecionados os tipos de polietilenos necessários para atingir boa performance mecânica e de selagem. Em parceria com uma empresa de conversão, o filme em estudo foi coextrudado em 9 camadas, com redução de espessura para obter as embalagens com menos massa de material. Além disso, foi realizado a impressão da arte e aplicação de verniz para proporcionar resistência térmica, resistência à abrasão e brilho. Após a produção, o filme também foi caracterizado em DSC e FTIR, encontrando-se a presença de polietileno, aditivos, EVOH, adesivo de coextrusão e verniz. Posteriormente realizou-se análises de espessura e gramatura, obtendo-se respectivamente a média dos valores de 158,08 μm e 157,41 g/m^2 . Avaliou-se o coeficiente de fricção final do filme em estudo em um equipamento de COF para atingir a especificação solicitada para a aplicação. A análise da face externa (lado impresso) do filme encontrou valor de 0,27 e da face interna (lado de selagem) 0,18. Em continuação das análises e para fins comparativos, foi avaliado em ambos os filmes *hot tack* e *heat seal* em uma seladora, resistência à propagação do rasgo em um pêndulo com método Elmendorf, ensaios de tração (módulo de Young, resistência à tração e alongamento) e resistência a perfuração no equipamento universal de ensaios e taxa de permeabilidade ao oxigênio no equipamento OX-TRAN. As curvas de selagem mostraram melhor performance e força de selo do filme em estudo. As análises de propriedades mecânicas evidenciaram que o filme em estudo apresenta maior rigidez, resistência à propagação do rasgo e alongamento. Resistência à tração e à perfuração, são valores um pouco abaixo do filme padrão. Evidenciou-se também uma melhora significativa da barreira do filme com a utilização do EVOH. Diante da avaliação dos resultados obtidos e considerados satisfatórios, o filme foi testado na linha de envase de um cliente e aprovado com boa performance.

Palavras-chave: EVOH. Alta barreira. Polietileno. Embalagens. Reciclagem.

ABSTRACT

RIBEIRO, H. D. Production of flexible polyethylene-based films for high barrier packaging, for application in cleaning lines, focused on sustainability. 2024. 80 p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2024.

This study consisted of the production of a polyethylene-based film with a high gas barrier for packaging cleaning products with a high aroma content, with the aim of replacing the current packaging structure, which is made up of polyester and polyethylene. The aim of the replacement is to facilitate recycling, as the current structure is not considered recyclable because it is made up of different polymers. To this end, the multilayer film was extruded using poly(ethylene-co-vinyl alcohol) (EVOH) to promote a high barrier and to use it in a low percentage so that the film meets the recyclability requirements of regulatory organizations. In order to meet the application requirements and develop the structure of the film under study, the standard film was characterized using DSC and FTIR, showing the presence of polyethylene, additives and PET. Thickness was also analyzed with a micrometer and weight with an analytical scale. The average thickness found was 170.27 μm and the weight 168.13 g/m^2 . Based on the data found and the aim of the study, the types of polyethylene needed to achieve good mechanical and sealing performance were selected. In partnership with a converting company, the film under study was coextruded in 9 layers, with a reduction in thickness to obtain packaging with less material mass. In addition, the artwork was printed, and a varnish applied to provide thermal resistance, abrasion resistance and gloss. After production, the film was also characterized in DSC and FTIR, finding the presence of polyethylene, additives, EVOH, coextrusion adhesive and varnish. Thickness and grammage analyses were then carried out, obtaining average values of 158.08 μm and 157.41 g/m^2 respectively. The final coefficient of friction of the film under study was evaluated in a COF machine in order to achieve the specification required for the application. The analysis of the outer face (printed side) of the film found a value of 0.27 and the inner face (sealing side) 0.18. In continuation of the analysis and for comparative purposes, both hot tack and heat seal films were evaluated in a sealer, resistance to tear propagation in a pendulum with the Elmendorf method, tensile tests (Young's modulus, tensile strength and elongation) and resistance to perforation in universal testing equipment and oxygen permeability rate in OX-TRAN equipment. The sealing curves showed better performance and seal strength of the film under study. The analysis of mechanical properties showed that the film under study has greater rigidity, resistance to tear propagation and elongation. Tensile strength and puncture resistance were slightly lower than the standard film. There was also a significant improvement in the film's barrier with the use of EVOH. After evaluating the results, which were considered satisfactory, the film was tested on a client's filling line and approved with good performance.

Keywords: EVOH. High barrier. Polyethylene. Packaging. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da macromolécula do PEBD, PELBD e PEAD	26
Figura 2 – Estrutura química do poliéster	26
Figura 3 – Representação esquemática da arquitetura molecular do POP	27
Figura 4 – Estrutura química do EVOH.....	28
Figura 5 – Permeabilidade do oxigênio em alguns polímeros a 23°C e 0% de UR.	29
Figura 6 – Permeabilidade do oxigênio e espessura normalizada da taxa de permeabilidade ao vapor d'água (TPVA) em função do conteúdo de etileno no EVOH.....	29
Figura 7 – Ilustração de uma estrutura multicamadas com EVOH.....	30
Figura 8 – Exemplo de embalagem SUP	34
Figura 9 – Estrutura de embalagem padrão para aplicação de produtos de limpeza	35
Figura 10 – Identificação e simbologia de resinas – ABNT NBR 13.230/2008	38
Figura 11 – Fluxograma das etapas de produção da embalagem	39
Figura 12 – Fluxograma das etapas do processo de extrusão	42
Figura 13 – Zonas funcionais de um extrusor	43
Figura 14 – Representação da matriz de uma extrusora multicamadas	43
Figura 15 – Sistemas de resfriamento do balão.....	44
Figura 16 – Conjunto de rolos para estabilização do balão	44
Figura 17 – Sistema de controle de espessura.....	45
Figura 18 – Mecanismo de colapsagem	45
Figura 19 – Tratamento do filme	46
Figura 20 – Processo de extrusão	47
Figura 21 – Micrômetro	48

Figura 22 – Balança analítica	48
Figura 23 – Equipamento de medição de COF.....	49
Figura 24 – Calorímetro exploratório diferencial	51
Figura 25 – Equipamento de análise de <i>hot tack</i> e <i>heat seal</i>	53
Figura 26 – Testador Elmendorf	54
Figura 27 – Gabarito tipo raio constante para teste Elmendorf.....	55
Figura 28 – Máquina de ensaio universal - Instron	56
Figura 29 – Resultados comparativos de espessura do filme em estudo e padrão	61
Figura 30 – Resultados comparativos de gramatura do filme em estudo e padrão	62
Figura 31 – Curva de DSC do filme padrão	64
Figura 32 – Curva de DSC do filme em estudo	64
Figura 33 – FTIR da face interna do filme padrão	65
Figura 34 – FTIR da face externa do filme padrão	65
Figura 35 – FTIR da face interna do filme em estudo	66
Figura 36 – FTIR da face externa do filme em estudo	67
Figura 37 – Curvas comparativas de selagem <i>Hot Tack</i>	68
Figura 38 – Curvas comparativas de selagem <i>Heat Seal</i>	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aditivos mais utilizados.....	30
Tabela 2 – Propriedades avaliadas em embalagens poliméricas flexíveis	35
Tabela 3 – Estrutura global dos filmes.....	41
Tabela 4 – Condições de análise de COF	49
Tabela 5 – Condições de análise DSC	50
Tabela 6 – Condições de análise FTIR.....	52
Tabela 7 – Condições de análise de <i>hot tack</i> e <i>heat seal</i>	53
Tabela 8 – Condições de análise do módulo de Young.....	56
Tabela 9 – Condições de análise da resistência à tração e alongamento	57
Tabela 10 – Condições de análise da resistência à perfuração.....	58
Tabela 11 – Condições de análise da taxa de permeabilidade ao oxigênio	59
Tabela 12 – Resultados de COF ao decorrer do tempo e processos	63
Tabela 13 – Média dos resultados da resistência à propagação do rasgo	69
Tabela 14 – Média dos resultados de ensaios de tração mecânica	70
Tabela 15 – Média dos resultados de resistência à perfuração	71
Tabela 16 – Resultados da taxa de permeabilidade ao oxigênio.....	72

LISTA DE SIGLAS

ABIPLAST	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRE	Associação Brasileira de Embalagem
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATR	Refletância total atenuada
BOPP	Polipropileno biorientado
COF	Coeficiente de fricção
DM	Direção máquina
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
DT	Direção transversal
EVAL	<i>Ethylene and vinyl alcohol</i>
EVOH	Poli(etileno-co-álcool vinílico)
FTIR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
IBC	<i>Internal bubble cooling</i>
NBR	Norma Brasileira
OTR	<i>Oxygen transmission rate</i>
PA	Poliamida
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
PET	Poli(tereftalato de etileno)
PEUBD	Polietileno de ultrabaixa densidade
POL	Polegadas
POP	Plastômero de poliolefina
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Poli(cloreto de vinila)
PVDC	Poli(cloreto de vinilideno)
SUP	<i>Stand up pouch</i>
TPO ₂	Taxa de permeabilidade ao oxigênio
TPVA	Taxa de permeabilidade ao vapor d'água
UR	Umidade relativa
WVTR	<i>Water vapor transmission rate</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

O ₂	oxigênio
CO ₂	gás carbônico
cc	centímetros cúbicos
atm	atmosfera
mil	milésimo de polegada
μ	micro
μm	micrometros
mm	milímetros
g	gramos
s	segundos
min	minutos
m ²	metros quadrados
cm	centímetros
°C	graus Celsius
mg	miligramas
μg	microgramas
psi	libra por polegada quadrada
gf	gramos força
kg	quilograma
N	Newton
J	Joules
cm ²	centímetro quadrado
US\$	dólares americanos
Ppm	partes por milhão
TiO ₂	dióxido de titânio
MPa	mega Pascoal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	OBJETIVOS	24
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3	REVISÃO DA LITERATURA	25
3.1	POLÍMEROS	25
3.1.1	Polietileno (PE)	25
3.1.2	Poli(tereftalato de etileno) (PET)	26
3.1.3	Plastômeros (POP)	27
3.1.4	Poli(etileno-co-álcool-vinílico) (EVOH)	28
3.1.5	Aditivos	30
3.1.6	Adesivos	31
3.1.7	Vernizes	32
3.1.8	Tintas	32
3.2	EMBALAGENS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS	32
3.2.1	Embalagens em formato SUP para produtos de limpeza	34
3.3	PROPRIEDADES DE EMBALAGENS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS	35
3.4	RECICLAGEM	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	PLANEJAMENTO DO ESTUDO	39
4.2	MATERIAIS	39
4.3	MÉTODOS	40
4.3.1	Extrusão	40
4.3.2	Espessura e gramatura	47
4.3.3	Coeficiente de fricção	48
4.3.4	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	50
4.3.5	Identificação por espectroscopia no infravermelho	51

4.3.6 Análises térmicas de termosselagem	52
4.3.7 Resistência à propagação do rasgo	54
4.3.8 Ensaio de tração	55
4.3.8.1 Módulo de Young	56
4.3.8.2 Resistência à tração e alongamento	57
4.3.9 Ensaio de resistência à perfuração	57
4.3.10 Taxa de permeabilidade ao oxigênio (TPO ₂).....	58
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
5.1 ESPESSURA E GRAMATURA.....	61
5.2 COEFICIENTE DE FRICÇÃO	62
5.3 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL	63
5.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO	65
5.5 TERMOSELAGEM	67
5.6 RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DO RASGO	69
5.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	70
5.8 RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO	71
5.9 TAXA DE PERMEABILIDADE AO OXIGÊNIO	72
5.10 ANÁLISE DE CUSTOS	73
6 CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

As embalagens apresentam um papel essencial na indústria alimentícia, de cosméticos, higiene, limpeza, entre muitos outros, pois elas são responsáveis por manter o produto protegido das ações de fatores do ambiente externo, como luz, oxigênio, microrganismos e umidade. Além disso, as embalagens facilitam o transporte e aumentam a vida útil do produto embalado.

Dentre os vários tipos de embalagens, as que mais se destacam devido seu custo-benefício, são as embalagens poliméricas. Segundo a ABRE (Associação Brasileira de Embalagem) (2023) a percentagem de produção de embalagens poliméricas representou, em 2022, 33,6% do total de embalagens produzidas, sendo o restante distribuídos a embalagens de papel, papelão, vidro, madeira, metal e têxtil. Das embalagens poliméricas, as flexíveis oferecem vantagens em comparação às rígidas, pois consomem menos recursos e energia, oferecem maior eficiência no transporte e, por consequência, redução no custo do produto final (BAJPAI, 2019; CAMILO *et al.*, 2019). Além disso, por serem mais leves, o consumo de combustível durante o transporte é menor, reduzindo assim a emissão de gases poluentes no ambiente.

As embalagens poliméricas podem ser processadas de diversas formas: por extrusão, laminação, injeção, sopro e termoformagem. Sendo o processo de extrusão um dos mais utilizados para produção de embalagens flexíveis (CAMILO *et al.*, 2019; SELKE; HERNANDEZ, 2016). A indústria faz uso de três processos de extrusão: extrusão com matriz plana e calandragem, extrusão com matriz plana de filme “casting” e a extrusão tubular (FERREIRA, 2012). Dados da Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST, 2023) demonstram que em 2020 o processo de extrusão representou 60% do total de processos de transformação de polímeros e deste valor, 45% foram transformados por extrusão de filmes.

A extrusão tubular (balão) é um dos processos usados para produção em larga escala e o método de obtenção do filme depende da resina utilizada, sendo vertical ascendente quando se trabalha com resinas de polietileno (PE), vertical descendente para polipropileno (PP) e horizontal para poli(cloreto de vinilideno) (PVDC) (CAMILO *et al.*, 2019; WAGNER; MOUNT; GILES, 2014). Dentre estes, o vertical ascendente é o mais empregado na indústria e possibilita a produção de

filmes monocamada e multicamadas (coextrusão) (FERREIRA; SANTANA, 2015).

Os polímeros mais usados atualmente são homopolímeros, copolímeros e blends poliméricas. Para a produção de embalagens flexíveis os materiais são selecionados baseados em uma variedade de fatores, incluindo propriedades de barreira, performance mecânica, propriedades de selagem, aspecto físico, desempenho de impressão, entre outros. Dentre os diversos tipos de polímeros utilizados na indústria de embalagens poliméricas, os mais comuns são: poliolefinas, incluindo os vários tipos de polietileno e polipropileno, poli(tereftalato de etileno) (PET) e poli(cloreto de vinila) (PVC) (NIAOUNAKIS, 2019).

O uso massivo de embalagens poliméricas gera uma grande quantidade de resíduos, que muitas das vezes não são descartados da maneira correta e acabam impactando negativamente o meio ambiente e a sociedade. Isso porque esse tipo de material necessita de centenas de anos para se degradar em condições ambientais normais. Perante essa situação, a reciclagem surge como uma melhor opção para destinar os resíduos poliméricos, colaborando com a redução de impactos ambientais negativos, aumentando a taxa de emprego e evitando a destinação desses materiais para fins como aterros sanitários, por exemplo. A reciclagem consiste em reprocessar os materiais poliméricos e transformá-los em novas matérias-primas para outros processos e produtos (GONÇALVES, 2022).

Porém, a reciclagem de embalagens poliméricas enfrenta um grande desafio devido à diversidade de materiais utilizados para sua produção. As indústrias necessitam mesclar diferentes tipos de polímeros para criarem embalagens adequadas para cada aplicação, dificultando a reciclagem devido a necessidade de separação dos materiais. Um bom exemplo disso é a necessidade de utilizar, junto com filmes de polietileno, materiais metalizados (alumínio, BOPP e PET metalizados) para produzirem embalagens com alta barreira, pois as embalagens flexíveis de polietileno apresentam permeabilidade a gases, vapor de água, gorduras e moléculas penetrantes. Desta forma, elas não são eficazes no armazenamento de produtos que necessitam de barreira a estes fatores, como por exemplo barreira ao oxigênio (O₂), dióxido de carbono (CO₂), odores e aromas. O nível de barreira de cada embalagem é estabelecido de acordo com a exigência dos produtos embalados, ou seja, se não pode sofrer ação de gases externos para

prolongar sua vida útil, se não pode perder o aroma, crocância etc.

Algumas indústrias vêm usando, como alternativa a esses materiais de barreira, o poli(etileno-co-álcool-vinílico) (EVOH) na produção de embalagens poliméricas flexíveis. Esse polímero é usado devido a sua capacidade de proporcionar alta barreira a aromas e gases, principalmente ao oxigênio e ao dióxido de carbono. Também, devido a sua versatilidade de aplicação, podendo ser usado para alimentos, produtos higiênicos, cosméticos, produtos para limpeza, produtos químicos, entre outros. Entretanto, seu uso é limitado nas estruturas das embalagens para que ele não afete de maneira negativa a reciclagem. A ideia deste tipo de projeto é produzir estruturas com alta percentagem de um único tipo de material para que torne viável sua reciclagem.

Existem organizações que realizam pesquisas científicas sobre a reciclagem dos polímeros, projetam embalagens recicláveis, analisam a reciclabilidade de uma estrutura e apontam diretrizes para reciclagem. Uma delas é a *RecyClass*, uma associação internacional sem fins lucrativos com sede na Bélgica. Seu foco principal é melhorar a reciclagem dos polímeros e combater a poluição. De acordo com suas diretrizes de *design* para reciclabilidade, uma embalagem com mais de 90% de polietileno em sua composição é considerada totalmente reciclável. Quando em sua estrutura é mesclado polietileno com EVOH, o uso deste último é limitado em no máximo 5% na estrutura total, pois desta forma ainda é possível compatibilizar os dois polímeros durante a reciclagem (RECYCLASS, 2023).

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo foi produzir um filme com estrutura à base de polietileno para embalagem de alta barreira da linha de limpeza, com o intuito de substituir a embalagem atual que é obtida através da laminação de filmes de polietileno com PET, para facilitar a reciclagem.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir estrutura do filme para que ele atinja uma performance semelhante da embalagem atual;
- Utilizar EVOH na estrutura para proporcionar barreira a gases/aromas e em quantidade limitada de acordo com as premissas da *Recyclass*, para garantir a reciclabilidade do material;
- Extrudar o filme em condições adequadas;
- Reduzir a espessura do filme para reduzir a massa de material por embalagem;
- Realizar a caracterização, análises mecânicas e análises de barreira, da embalagem atual e de estudo, para fins comparativos;
- Calcular o custo de produção de cada estrutura para comparação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 POLÍMEROS

Entende-se por polímeros os compostos químicos orgânicos ou inorgânicos formados pela repetição de dezenas de milhares de pequenas unidades de repetição (meros) por ligação covalente para a formação de uma macromolécula. Os polímeros se originam através das ligações intramoleculares dos monômeros, que são constituídos por um mero. Os tipos e quantidades destes monômeros classificam o polímero em termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Quando o polímero tem apenas um tipo de mero, ele é chamado de homopolímero e quando tem mais de um tipo é usado o termo geral copolímero. Mais especificamente, quando tem três ou mais meros, utilizam-se os termos terpolímero e tetrapolímero, respectivamente (MANO; MENDES, 2004; CANEVAROLO JR, 2006).

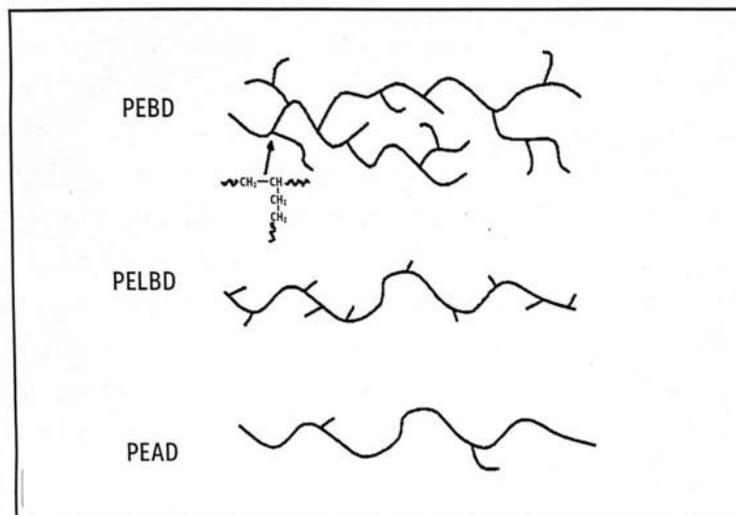
3.1.1 Polietileno (PE)

Devido à enorme gama de aplicação, com utilização na indústria alimentícia, eletrônica, construção civil, mecânica, farmacêutica, entre outras, o polietileno é o polímero mais fabricado no mundo em termos de volume e a tendência é que a demanda aumente. Existem três tipos principais de polietileno, polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD) e polietileno linear de baixa densidade (PELBD), sendo assim nomeados por uma de suas características, a densidade. Esta característica é associada a cristalização do PE, pois quanto maior a fase cristalina (maior empacotamento das moléculas) maior a densidade e quanto maior a fase amorfa (pouco empacotamento das moléculas) menor a densidade. Como pode ser notado na Figura 1, o PEBD e o PELBD são diferentes devido a quantidade de ramificações, sendo elas responsáveis por aumentar a fase amorfa do polímero, e o que o PEAD quase não apresenta ramificações, aumentando o empacotamento. Como consequência, o grau de cristalinidade do PEBD é menor que do PEAD, o que os diferem em relação a densidade (FERREIRA; FECHINE, 2021).

O polietileno de baixa densidade é um polímero termoplástico de alta flexibilidade, boa processabilidade, boas propriedades óticas e baixa tendência a fratura. O polietileno linear de baixa densidade apresenta ótimas propriedades mecânicas, ótima selagem e baixo grau de encolhimento. Já o polietileno de alta

densidade, devido a sua alta massa molar, é um termoplástico mais resistente e apresenta boas propriedades mecânicas. Além disso, possui melhor barreira ao vapor d'água quando comparado ao PEBD (SANTANA, 2019).

Figura 1 – Ilustração da macromolécula do PEBD, PELBD e PEAD.

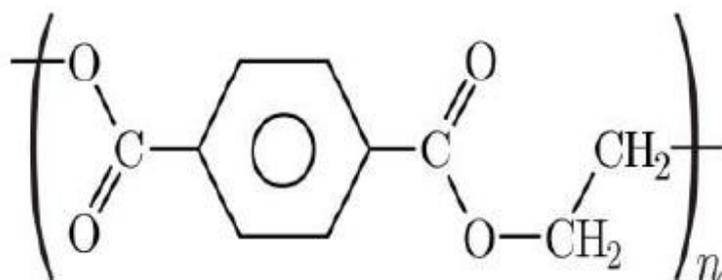


Fonte: Ferreira e Fachine (2021).

3.1.2 Poli(tereftalato de etileno) (PET)

O poli(tereftalato de etileno), conhecido como PET, é um termoplástico formado por macromoléculas que contém em suas cadeias éster e ácido tereftálico. Sua estrutura química é apresentada na Figura 2. O PET é sintetizado pela reação de esterificação do ácido tereftálico e do etileno glicol, originando como subproduto a água, ou por transesterificação de etileno glicol e dimetil tereftalato, que apresenta como subproduto o metanol. Esta polimerização acontece por policondensação obtendo-se um poliéster linear de alta massa molar (CAMILO *et al.*, 2019).

Figura 2 - Estrutura química do poliéster.



Fonte: Pinto (2019).

Dependendo do seu processo, o PET pode ser amorfo ou semicristalino apresentando uma gama variada de propriedades e por isso apresenta também

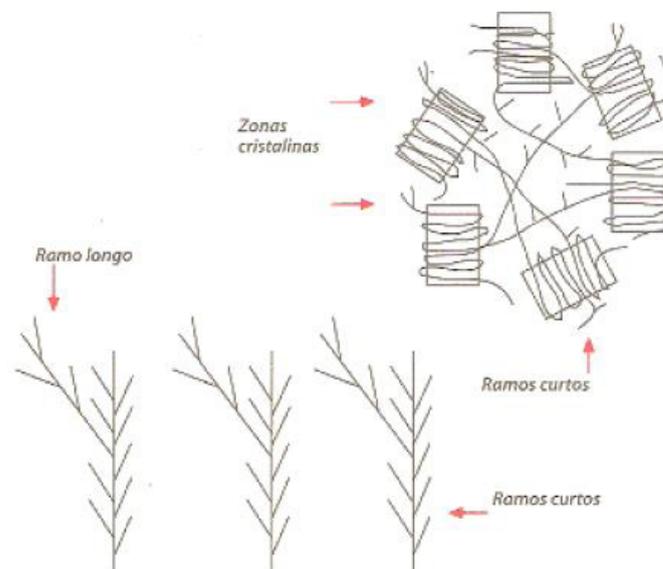
diversos tipos de aplicações, como por exemplo: rótulos termoencolhíveis, filmes para embalagens flexíveis, pré-formas para produção de garrafas e frascos e termoformados para alimentos. No que tange as propriedades, o poliéster apresenta boa resistência mecânica, rigidez, baixa permeabilidade aos gases, resistência térmica e à luz, condutividade térmica moderada, entre outros (CAMILO *et al.*, 2019; PINTO, 2019).

3.1.3 Plastômeros (POP)

Os plastômeros de poliolefinas (POP) são produzidos por meio da polimerização de polietilenos de ultrabaixa densidade (PEUBD) via catalisador metallocênico e apresentam uma distribuição uniforme dos comonômeros. Este tipo de polímero apresenta densidade baixa, em torno de 0,86-0,91 g/cm³, e comportamento plástico e elastomérico. A Figura 3 demonstra a estrutura molecular do POP com ramos longos e curtos e a grande quantidade de ligações Inter lamelares entre as fases cristalinas (ELIAS, 2011).

Os plastômeros oferecem propriedades de selagem superiores aos dos polietilenos comuns, permitindo a selagem com contaminantes, aumentando a resistência da selagem a quente, baixando a temperatura de iniciação de selagem e promovendo rápido envase. Além disso, ele possui uma série de outras vantagens como: boas propriedades óticas, hermeticidade, boa processabilidade e aditivção (DOW, 2015).

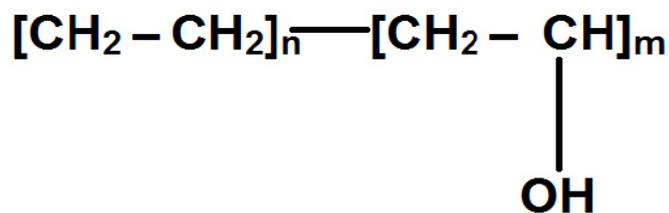
Figura 3 – Representação esquemática da arquitetura molecular do POP.



3.1.4 Poli(etileno-co-álcool-vinílico) (EVOH)

EVOH, poli(etileno-co-álcool-vinílico), é um polímero semicristalino composto por um copolímero de etileno e vinil álcool e sua estrutura química é representada pela Figura 4. É um material que possui ótimas propriedades de barreira a gases, solventes e aromas, boa resistência à permeação de gorduras e óleos, boa resistência mecânica e à abrasão, por isso é muito utilizado na indústria de embalagens para alimentos, perfumaria, produtos de higiene, limpeza, entre outros (SANTANA, 2019).

Figura 4 – Estrutura química do EVOH.



Fonte: Santana (2019).

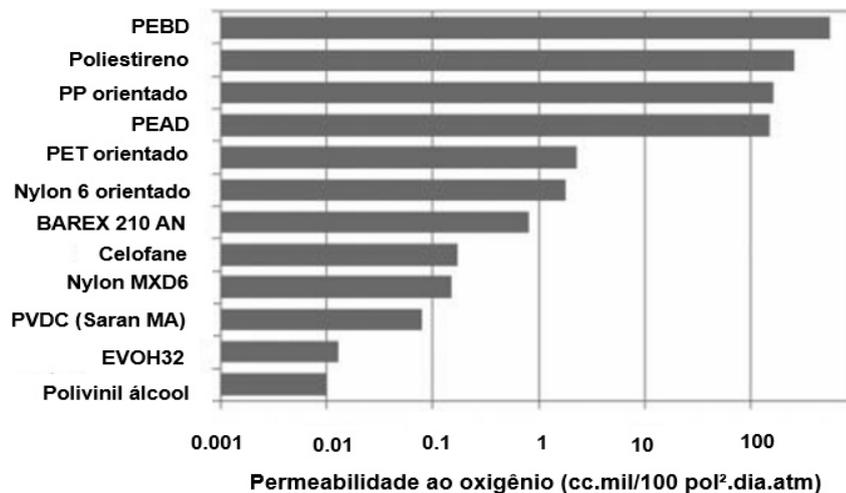
O EVOH é classificado segundo sua fração molar de etileno e isto determina suas propriedades de barreira, pois quanto menor a quantidade de etileno na sua estrutura, maior será a barreira proporcionada. A maior fabricante de EVOH do mundo, a Kuraray Co., Ltd, fundada em 1926 no Japão, comercializa seus diferentes tipos de EVOH sob o nome EVAL™ (do inglês *Ethylene and Vinyl Alcohol*), e oferece 7 grades (tipos) que vão de 24% a 48% mols de etileno.

A Figura 5 faz a comparação de permeabilidade ao oxigênio entre alguns materiais poliméricos onde se nota a baixa permeabilidade do EVOH, ou seja, sua alta barreira a este gás. Segundo a Kuraray (2023) 1 mm de espessura de EVOH EVAL™ corresponde a mesma barreira de gás que uma parede de 10 m de polietileno de baixa densidade. Esta boa propriedade de barreira do EVOH é atribuída ao seu alto grau de cristalinidade e a cristalização do polímero depende da termodinâmica do processo, da microestrutura química e de sua estrutura geométrica.

Por ser um material higroscópico, a barreira deste polímero é comprometida pela umidade relativa (UR), portanto suas propriedades de barreira variam com a umidade presente no meio. O EVOH que contém menos etileno tende a absorver

mais água, pois os hidrogênios da molécula de água ligam preferencialmente com o grupo de álcool vinílico, ou seja, os aumentos de grupos de álcool vinílico levam ao aumento do número de moléculas de água absorvidas ao polímero (MOKWENA; TANG, 2012; MAES, 2018). Na Figura 6, pode-se observar que com o aumento da fração molar de etileno, a permeabilidade ao vapor de água reduz e a permeabilidade ao oxigênio aumenta. Isso ocorre porque existem menos grupos álcool vinílico.

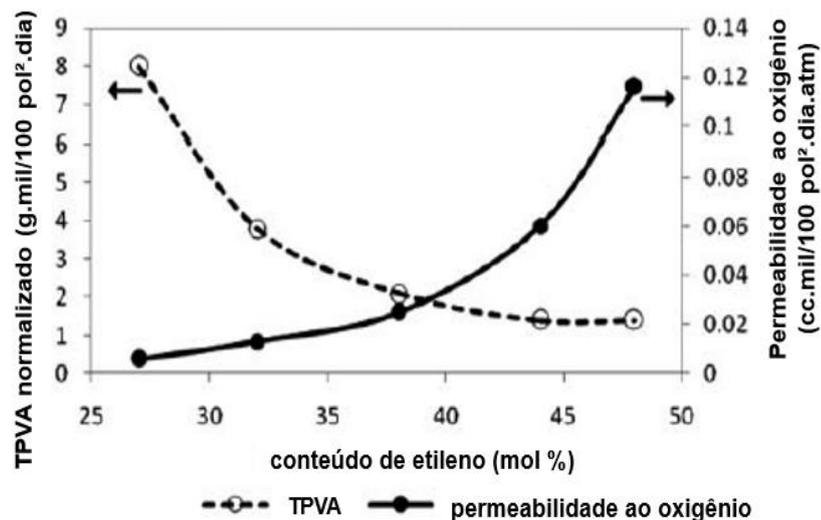
Figura 5 - Permeabilidade do oxigênio em alguns polímeros a 23°C e 0% de UR.



Fonte: Mokwena e Tang (2012).

Nota: O EVOH32 apresenta 32% de etileno.

Figura 6 - Permeabilidade ao oxigênio e espessura normalizada da taxa de permeabilidade ao vapor d'água (TPVA) em função do conteúdo de etileno no EVOH.

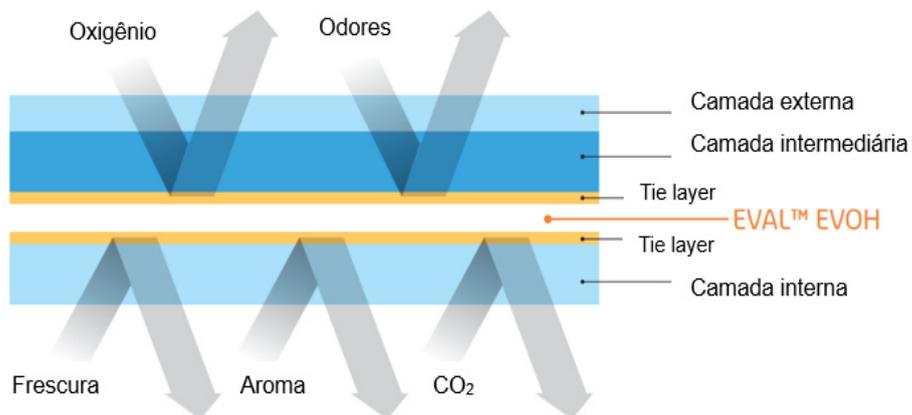


Fonte: Mokwena e Tang (2012).

Devido à sensibilidade do EVOH a umidade, ele é utilizado em estruturas de multicamadas produzidas por coextrusão para que possa ser utilizado outros

polímeros resistentes a água para protegê-lo. Mas para isso, deve-se utilizar adesivos especiais (geralmente anidrido maleico) que unirão os dois polímeros devido a diferença de polaridade do EVOH (polar) com o outro polímero (apolar) (GAVARA *et al.*, 2013). Por exemplo: EVOH/PE, EVOH/PP, entre outros. Essa camada de adesivo é comumente chamada de *tie layer* e pode ser notada de acordo com a Figura 7, assim como a barreira que é criada para ambos os lados dos filmes.

Figura 7 - Ilustração de uma estrutura multicamadas com EVOH.



Fonte: Kuraray (2023).

3.1.5 Aditivos

Os aditivos são adicionados, quando necessário, aos polímeros para conferir propriedades específicas para o processamento e aplicação final do produto. Podem ser orgânicos, inorgânicos, líquidos ou sólidos e são utilizados em pequenas quantidades, quanto menor a necessidade de aplicação, melhor é o aditivo. Eles devem ter boa dispersão, pois na maioria das vezes são utilizados de forma concentrada (cerca de 50% de aditivo disperso no polímero veículo). Os tipos de aditivos mais utilizados estão especificados na Tabela 1 (RABELLO, 2000).

Tabela 1 – Aditivos mais utilizados

Aditivo	Função
Antibloqueante	Evita a adesão das superfícies dos polímeros entre si e nos componentes da máquina

(continua)

(conclusão)

Aditivo	Função
Colorantes	Conferem cor ao material
Antioxidante	Inibi a oxidação do polímero que leva a degradação molecular
Antiestático	Designado para dissipar a carga eletrostática na superfície dos materiais
Estabilizadores	Térmicos protegem o polímero durante o processamento e ultravioletas protegem o polímero da radiação solar
Cargas	Reforçantes ou para preenchimento a fim de reduzir custos
Nucleantes	Acelera a cristalização e altera a estrutura cristalina do polímero
Deslizantes	Auxiliam no deslizamento da superfície do material

Fonte: Autor.

3.1.6 Adesivos

Os adesivos são substâncias utilizadas para unir as superfícies de dois materiais sólidos (aderentes) e podem ser aplicados por mecanismo mecânico ou químico. No mecanismo mecânico, o adesivo penetra nos poros e cavidades superficiais do aderente, já no químico, a adesão envolve forças intermoleculares de van der Waals e/ou covalentes. Estes polímeros podem colar uma ampla variedade de materiais, como cerâmicas, polímeros, metais, papeis etc. O tipo de adesivo a ser utilizado depende dos materiais a serem unidos e de suas porosidades, condições de processamento, temperaturas de exposição, entre outros. A maioria dos adesivos são aplicados na forma líquida com baixa viscosidade a fim de cobrir toda a superfície a ser aderida. A efetividade dessa união acontece após um período em que o adesivo passa do estado líquido para sólido, no chamado tempo de cura (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016). Geralmente, este tempo de cura é de 24 a 48 horas, sendo as 12 primeiras horas suficientes para passar o filme laminado para o próximo processo.

3.1.7 Vernizes

Os vernizes são utilizados para revestimento de embalagens, nos mais diversos tipos de substratos, como uma película protetora para a impressão da arte e para o material, para promover brilho e resistência térmica ou até mesmo como revestimento decorativo, podendo ser transparente (incolor ou dourado) ou opaco. Pode-se enfatizar como principais características a fácil aplicação, fácil secagem, boa adesão, resistência química, resistência à abrasão, flexibilidade e a capacidade de não transmitir sabor ou odor ao produto envasado. De forma geral, os vernizes são uma dispersão coloidal ou solução de resinas sintéticas/naturais em óleos dissolvidos em solventes e entre os tipos mais utilizados estão o fenólico, epoxifenólico, poliéster, vinílico, acrílico, entre outros (BARÃO, 2011).

3.1.8 Tintas

As tintas são materiais utilizados para impressão da arte (*marketing*), informações sobre o produto embalado, âmbitos legais etc. e são misturas de polímeros, plastificantes, corantes, solventes, deslizantes, entre outros aditivos. A composição da tinta varia de acordo com o substrato em que será aplicado e o tipo de processo de impressão que será realizado. Os substratos podem ser qualquer tipo de material como: plásticos, metal, papel, vidro, cartão, têxtil, entre outros. Os tipos de processos de impressão mais comuns são: flexografia, feita através de uma fôrma flexível (clichê de borracha) em alto relevo, aplicada diretamente no substrato; e rotogravura onde a fôrma cilíndrica é de metal e em baixo-relevo, também aplicada diretamente no substrato (LEMOS, 2016).

3.2 EMBALAGENS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS

Com a Revolução Industrial no final do século XVIII as indústrias cresceram de maneira massiva e como consequência houve um aumento da população nas cidades, sendo necessário ampliar a produção de bens de consumo. Com o passar dos anos, as indústrias foram se desenvolvendo cada vez mais, criando outros tipos de produtos. Desta maneira, houve a necessidade de desenvolver e aprimorar as embalagens, sendo estas capazes de armazenar e proteger os produtos para serem comercializados e chegarem com segurança até o consumidor final. Diante desse contexto, começou-se a perceber que a embalagem era parte essencial e que agregava valor ao produto final. Foi nessa época que os polímeros começaram

a ganhar destaque por ser um material versátil e com peso reduzido. Desde então, o consumo de embalagens poliméricas aumentou de forma exponencial (CANAIS, 2022).

Esse tipo de embalagem se destaca pela sua alta capacidade de adequação à forma física do produto embalado, combinando pouca utilização de recursos (baixas espessuras), boa performance mecânica e custo de produção reduzido, em relação a produção de outros tipos de embalagem.

Para atender às necessidades dos produtos armazenados, tais como ambiental, econômica e conservação, muitas das vezes é necessário combinar diferentes tipos de materiais (PE, PET, BOPP, alumínio, papel etc.). Assim, amplia-se sua funcionalidade e ao mesmo tempo utiliza-se uma quantidade mínima, mas o suficiente, destes materiais para reduzir o impacto no ciclo de vida dos produtos (ABIEF, 2023).

Alguns fatores devem ser levados em consideração para a seleção dos materiais que irão constituir uma embalagem para um determinado produto, tais como propriedades óticas, necessidade de barreira a água, gordura, oxigênio, luz, temperatura de armazenamento, processamento e outros.

A produção de embalagens flexíveis começa por meio da extrusão, que transforma os grânulos dos polímeros, conhecidos industrialmente como *pellets*, em finas películas. As extrusoras para este tipo de produção podem ser de dois tipos básicos, a extrusão plana e extrusão balão. Com esse processo é possível obter filmes de polietileno, poliéster, polipropileno etc. No passado, estes filmes eram produzidos em monocamada (monoextrusão) e devido ao desenvolvimento tecnológico de equipamentos e recursos, atualmente podem ser produzidas em multicamadas (coextrusão). Por isso, a indústria tem maiores possibilidades de combinação de diferentes polímeros, com diferentes funções, em um mesmo filme, como por exemplo o PE, PP (polipropileno), PS (poliestireno), EVOH, poli(cloreto de vinila) (PVC), PA (poliamida), entre outros. Desta forma, é possível manter a segurança e qualidade dos produtos, além de aumentar o *shelf life* (vida de prateleira).

Depois da extrusão, se for necessário, é possível imprimir sobre estes filmes e uni-los com um segundo, terceiro, quarto filme ou outro material. Esse processo

é chamado de laminação e é feito com a utilização de adesivos, para atingir as características necessárias para uma determinada aplicação.

3.2.1 Embalagens em formato SUP para produtos de limpeza

Stand up pouch (SUP), em tradução livre bolsa de pé, são modelos de embalagens que ficam de pé nas prateleiras dos supermercados, facilitando a exposição e visualização do consumidor. Segundo Rosa e Campos (2021) esse tipo de embalagem atende aos requisitos de redução de massa das embalagens e utiliza cerca de 70% a 90% menos material quando comparado com uma embalagem rígida. Isso também influencia na redução de custo do produto para o usuário. Pode-se ainda adaptar alguns acessórios a SUP como bicos, válvulas, zíperes e outros acessórios que possam facilitar o acondicionamento de diversos tipos de produtos. O mercado de produtos de limpeza é uma das linhas que atualmente muito se utiliza SUP, como exemplos de produtos envasados têm-se: amaciantes para roupas, detergente líquido, limpadores multiuso etc. Na Figura 8 é possível observar um exemplo de embalagem SUP.

Figura 8 – Exemplo de embalagem SUP.



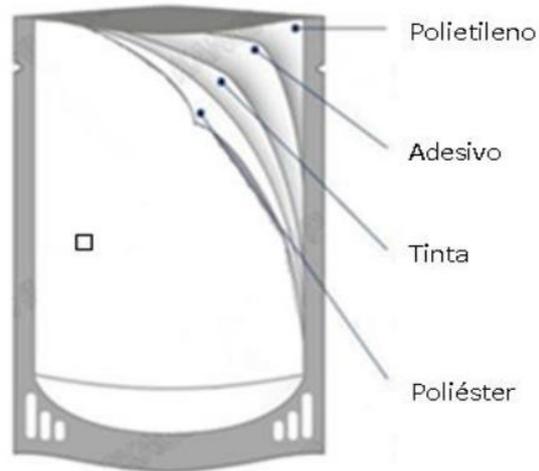
Fonte: Autor.

Apesar dos benefícios citados, as embalagens SUP apresentam alguns desafios de reciclagem, pois em muitos casos são produzidas através da laminação de materiais distintos, para cumprir os requisitos da aplicação, como mencionado anteriormente (RAMOS; RIBEIRO, 2023).

Atualmente as embalagens para produtos de limpeza são comumente feitas pela combinação de polietileno com poliéster (PET) devido as propriedades de

barreira ao aroma e alto brilho, deste segundo material. A Figura 9 representa o detalhamento da embalagem multicamadas para essa aplicação.

Figura 9 - Estrutura da embalagem padrão para aplicação de produtos de limpeza.



Fonte: Da Rosa e Campos (2021).

Esse tipo de embalagem passa pelos processos de extrusão do polietileno e poliéster, impressão da arte do produto no poliéster e laminação do poliéster impresso com o polietileno. Após esses processos, o material laminado é processado em máquinas que irão formar o SUP de acordo com cada formato, envasar o produto e realizar a selagem final para fechamento.

3.3 PROPRIEDADES DE EMBALAGENS POLIMÉRICAS FLEXÍVEIS

Se tratando de embalagens, existe uma complexidade para sua elaboração em relação a sua integridade, devido seu papel fundamental de manter os produtos armazenados em condições adequadas para consumo. Diante disso, faz-se necessário o entendimento das características físicas e químicas dos polímeros que serão selecionados para cada aplicação. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades consideradas para desenvolvimento e avaliação de uma embalagem polimérica flexível.

Tabela 2 – Propriedades avaliadas em embalagens poliméricas flexíveis.

Propriedade	Método ASTM	Importância
Densidade	D792	Custo e controle de camadas do coextrudado

(continua)

(conclusão)

Propriedade	Método ASTM	Importância
Índice de fluidez	D1238	Fluidez do polímero em processo de extrusão
Módulo secante	D882	Determinação de rigidez do filme polimérico
Resistência à tração	D882	Aferição de tensionamento da embalagem ou filme
Alongamento na ruptura	D882	Aferição da resistência e alongamento da embalagem ou filme
Resistência ao rasgo	D1922 (Elmendorf) D1004 (Graves)	Aferição de propagação de fratura da embalagem ou filme
Temperatura de derretimento	D3418	Relaciona-se à temperatura de início de selagem e temperatura de extrusão
Temperatura de transição vítrea	E1356 (DSC) E160 (DMA)	Necessário para determinar temperatura de processamento
Resistência ao impacto	D3420 (Spencer) D1709 (Dart Drop)	Aferição de resistência ao impacto
Resistência à perfuração	F1306 D2582	Resistência à perfuração lenta
Clareza, opacidade e brilho	D1746 (clarity) D1003 (haze) D2547 (gloss)	Relacionado a propriedades e necessidades óticas
Taxa de permeabilidade de oxigênio (OTR)	F1927 D3985 F2622	Barreira ao oxigênio
Taxa de permeabilidade de vapor de água (WVTR)	F1249 E96	Barreira à umidade

Fonte: Adaptado de Saito (2021).

3.4 RECICLAGEM

Com o crescimento da produção e a velocidade de consumo de embalagens houve conseqüentemente aumento na geração de resíduos, representando um dos maiores problemas relacionados à sociedade e ao meio ambiente. Tais problemas estão relacionados com a grande dificuldade de reciclagem destes resíduos que muitas vezes vão parar no meio ambiente e em aterros sanitários. Segundo a ABIPLAST (2023) em 2021 foram gerados 4,3 milhões de toneladas de resíduo plástico e somente 1,2 milhões de toneladas foram consumidos pela indústria de reciclagem.

As embalagens poliméricas são produzidas de polímeros e esses materiais são termoplásticos, ou seja, podem ser moldados de diversas maneiras e de forma repetida, com a ação de temperatura e pressão. Isso permite fundi-los e reprocessá-los por várias vezes, o que os tornam recicláveis. Um fator que está além do problema de descarte dos resíduos é o fato de muitas embalagens serem constituídas por tipos de materiais diferentes, o que dificulta a reciclagem devido a necessidade de separá-los (GARBIN; DITOMASO; BEUTER JUNIOR, 2020). Um exemplo disso é a embalagem padrão para produtos de limpeza apresentada no tópico 3.2.1 produzida pela laminação entre polietileno e poliéster.

Para facilitar a reciclagem das embalagens, podendo visualizar a composição e facilitar sua separação, existe uma simbologia para identificação. No Brasil, a norma que estabelece essa especificação é a Norma Brasileira (NBR) 13.230/2008 – Embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis – da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). A Figura 10 apresenta essa simbologia.

A reciclagem mais utilizada atualmente é mecânica, ou seja, os materiais plásticos são processados por meios físicos como: recolhimento e separação, corte, trituração, lavagem e secagem. Com esses processos, o polímero é separado de possíveis contaminantes e reprocessado em *pellets* (grânulos) para ser usado como matéria-prima de um outro processo, voltando assim para a cadeia produtiva (MACIEL; BUENO; MORAES, 2023).

Figura 10 – Identificação e simbologia de resinas – ABNT NBR 13.230/2008.



Fonte: Autor.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PLANEJAMENTO DO ESTUDO

Neste tópico foram descritas as etapas de produção, análises e testes realizados para aprovação do filme em estudo. Além da produção e análise do filme proposto à base de polietileno, foi analisada também a embalagem padrão de mercado, composta por PET/PE, para fins comparativos. Utilizou-se a estrutura, materiais e laboratório de uma indústria convertidora e produtora de embalagens e o laboratório da empresa Dow Chemical. O teste e confecção da embalagem SUP foram realizados na linha de envase de um cliente. A Figura 11 mostra o fluxograma das etapas realizadas.

Figura 11 – Fluxograma das etapas de produção da embalagem



Fonte: Autor.

4.2 MATERIAIS

Para a produção da embalagem SUP de alta barreira foram utilizados os

materiais a seguir. Todos foram utilizados como recebidos, baseando-se no asseguramento de qualidade dos laudos providos pelos fornecedores.

- Poli(etileno-co-álcool-vinílico) (EVOH): EVAL™ 27% de etileno;
- Polietileno de baixa densidade (PEBD): densidade 0,921 g/cm³ - Dow Chemical;
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD): densidade 0,928 g/cm³ - Dow Chemical;
- Polietileno de alta densidade (PEAD): densidade 0,969 g/cm³ - Dow Chemical;
- Colorante branco: Cromex S/A;
- Adesivo para coextrusão: Dow Chemical;
- Plastômero: Dow Chemical;
- Deslizante: Cromex S/A;
- Antibloqueante: Cromex S/A;
- Plastificante: Cromex S/A;
- Tintas: Sun Chemical;
- Verniz: Opulux™ HGT, Dow Chemical.

4.3 MÉTODOS

4.3.1 Extrusão

As matérias-primas utilizadas foram rigorosamente selecionadas com a finalidade de atender as necessidades da aplicação do filme em estudo (embalagem *stand up pouch* para produtos de limpeza) e criar uma estrutura à base de polietileno que atenda a mesma performance e requisitos de barreira que a embalagem padrão (PET/PE) como mostrado no tópico 3.2.1. A formulação do filme foi elaborada para uma coextrusora balão multicamadas, desenhada para produção de filmes de alta barreira com a utilização de EVOH. A estrutura global do filme em estudo e do filme de polietileno da embalagem padrão estão apresentadas na

Tabela 3.

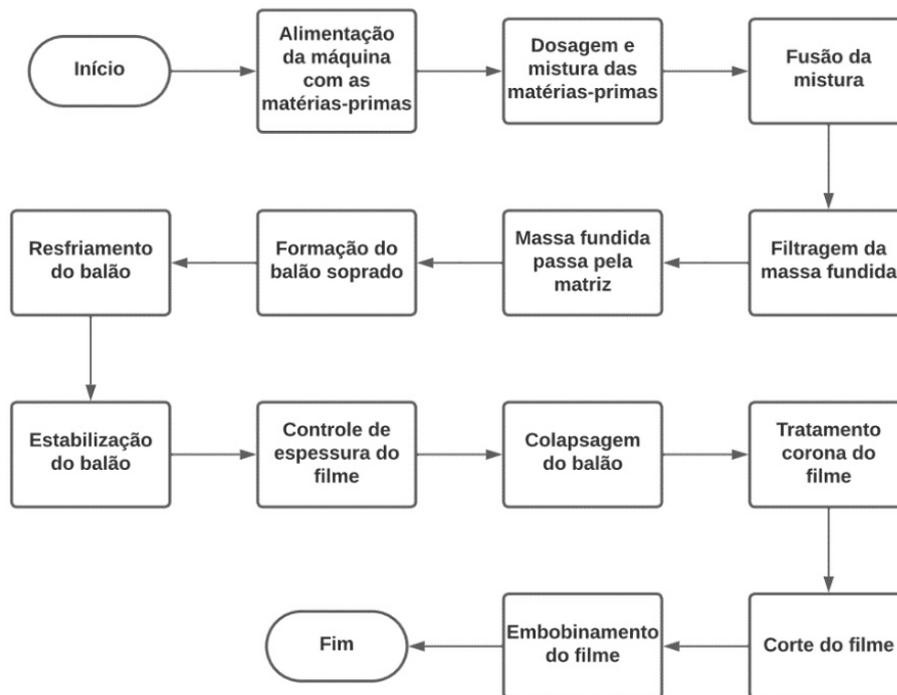
Tabela 3 – Estrutura global dos filmes.

Filme em estudo		Filme padrão	
Materiais	Percentual (%)	Materiais	Percentual (%)
PELBD	45	PELBD	71,8
PEAD	32	PEBD	24
POP	9	PIGMENTO	3
PEBD	4	DESLIZANTE	0,7
PIGMENTO	3	PLASTIFICANTE	0,5
EVOH	3	TOTAL	100
ADESIVO	2,5		
DESLIZANTE	0,75		
ANTIBLOQUEANTE	0,65		
PLASTIFICANTE	0,1		
Total	100		

Fonte: Autor.

Os critérios adotados para a seleção das matérias-primas foram: PELBD com boa combinação entre densidade e propriedades mecânicas para promover resistência a embalagem; o PEAD para promover rigidez suficiente a fim de auxiliar na sustentação do SUP, além de promover barreira ao vapor de água, óleos e gorduras; POP para baixar a temperatura de início de selagem, evitando a degradação do filme, aumentar a velocidade de linha de envase e por proporcionar hermeticidade a embalagem; PEBD para auxiliar o processamento dos materiais durante a extrusão devido sua boa fluidez; colorante branco para promover opacidade ao filme; EVOH para barreira a gases e aromas; adesivo de coextrusão para aderir o EVOH ao polietileno; e aditivos para auxiliar o processo de produção e envase no cliente. O filme em estudo foi produzido em uma coextrusora de 9 camadas, enquanto o filme padrão é produzido em uma coextrusora de 3 camadas. A Figura 12 mostra o fluxograma das principais etapas do processo de extrusão.

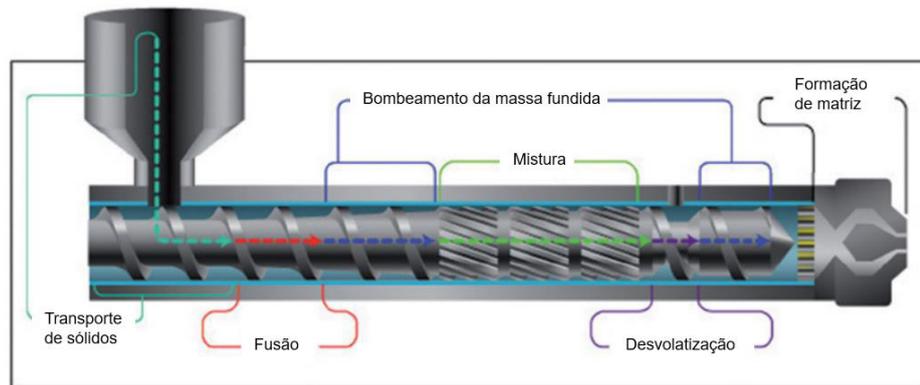
Figura 12 – Fluxograma das etapas do processo de extrusão.



Fonte: Autor.

O processo de extrusão se inicia com os materiais selecionados sendo succionados por bombas até o dosador gravimétrico de cada camada. Nestes equipamentos as resinas são dosadas nas quantidades corretas de acordo com a formulação programada no painel da máquina e misturadas para então serem direcionadas ao extrusor. Este componente é composto por seis zonas, no qual está incluso o canhão (cilindro) que contém uma rosca giratória ranhurada que auxilia a movimentação da massa fundida. As seis zonas são: de transporte de sólidos, responsável por direcionar os *pellets* da mistura até o início da rosca; de fusão dos materiais; de bombeamento da massa fundida, o objetivo desta função é transportar a massa fundida em direção à extremidade da extrusora e gerar pressão para ultrapassar a resistência ao fluxo da matriz; de mistura, que realiza a mistura de dois ou mais materiais; de desvolatilização, remove possíveis gases provenientes da fusão do polímero através de um orifício no cilindro; e de formação de matriz, por onde o material extrudado começa a tomar forma similar a forma final (CANTOR, 2019). Essas zonas são mostradas na Figura 13.

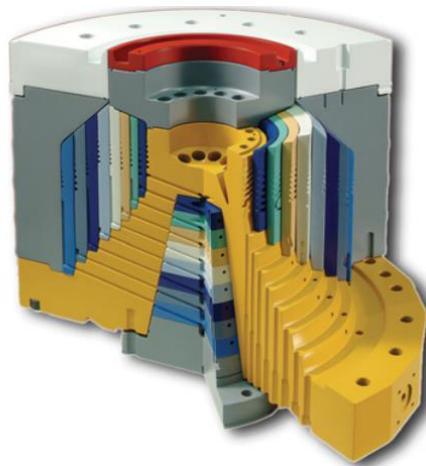
Figura 13 – Zonas funcionais de um extrusor.



Fonte: Cantor (2019).

Na saída do cilindro, a massa passa por um conjunto de telas de metal com aberturas milimétricas para filtrar o material e garantir assim a qualidade dos elementos usados no processo. Dessa forma, a massa segue para a matriz da máquina, onde os materiais de cada camada se encontram e se aderem sem se misturarem. Na Figura 14 a representação de uma matriz multicamadas.

Figura 14 – Representação da matriz de uma extrusora multicamadas.

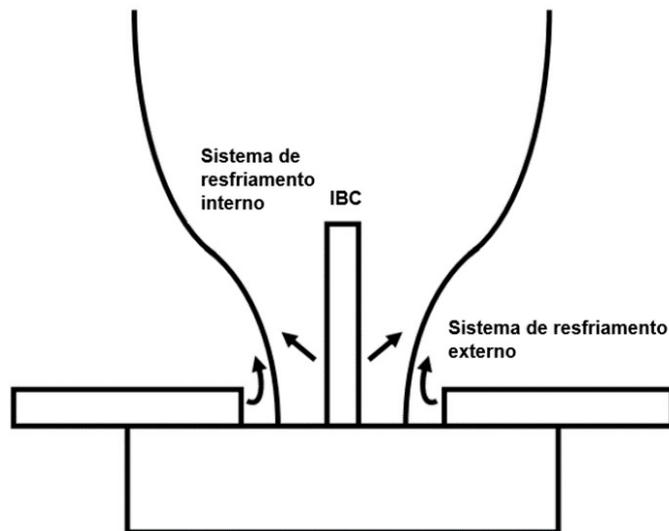


Fonte: Cantor (2019).

Após o encontro das camadas, o material viscoso sai pela abertura da matriz e inicia a formação do balão através de dois sistemas de fluxo de ar que o sustenta. Estes fluxos de ar também são responsáveis pelo resfriamento da massa polimérica para que o filme não cole nos rolos de passagem e nem durante o fechamento do balão na área de colapsagem. Existe o sistema de resfriamento interno, do inglês *internal bubble cooling* (IBC), um sistema bastante eficiente que injeta ar frio e retira o ar quente de dentro do balão, e o sistema de resfriamento externo. A Figura 15

exemplifica esses sistemas.

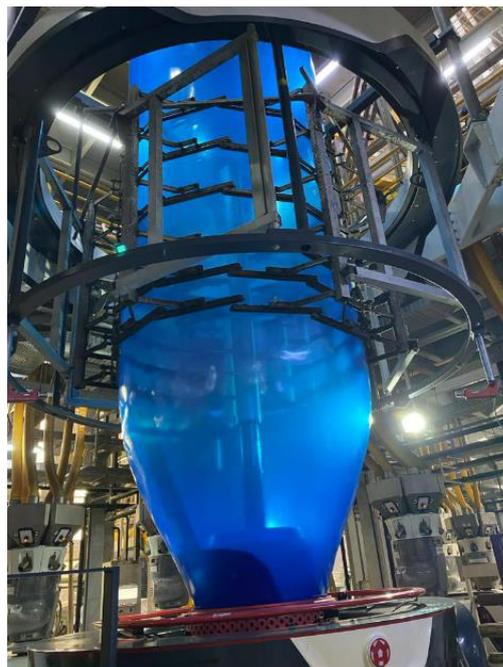
Figura 15 – Sistemas de resfriamento do balão.



Fonte: Adaptado de Cantor (2019).

No processo de extrusão é extremamente importante que o balão seja o mais estável possível para assegurar melhor controle de espessura e evitar qualquer tipo de defeitos no filme, como riscos e marcas. Para ajudar na estabilização existe um conjunto de rolos, chamado na indústria de “gaiola”, mostrado na Figura 16.

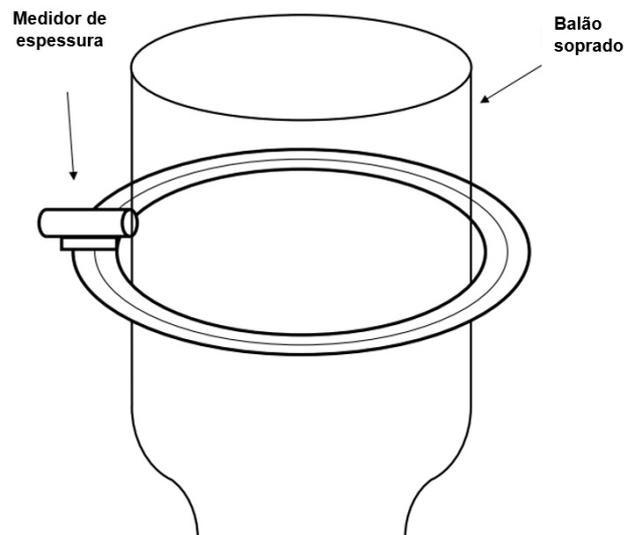
Figura 16 – Conjunto de rolos para estabilização do balão.



Fonte: Autor.

O balão é puxado por dois rolos, chamados de rolos puxadores, na torre da máquina, que são os mesmos que determinarão a espessura final do filme. A espessura é controlada por um equipamento que faz a varredura de todo o perímetro do balão e realiza o ajuste automaticamente de acordo com a espessura programada no painel de controle. Quanto mais estável for o processo menor será a variação de espessura. O filme foi produzido com 155 μm com variação de $\pm 8 \mu\text{m}$. A Figura 17 exemplifica o sistema de controle de espessura.

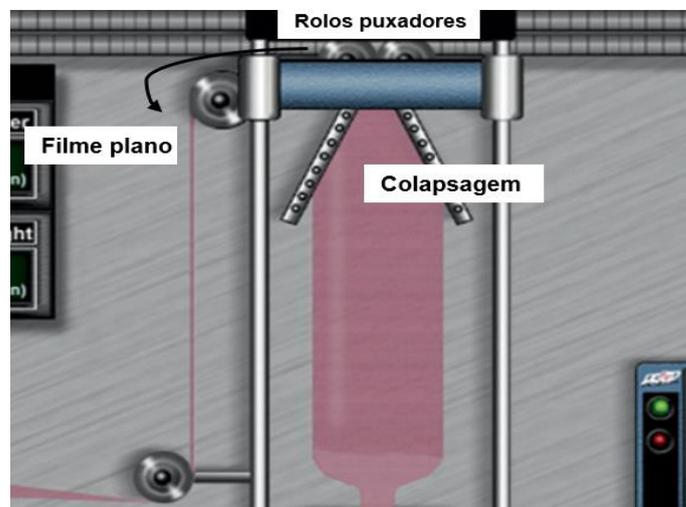
Figura 17 – Sistema de controle de espessura.



Fonte: Adaptado de Cantor (2019).

Já próximo aos rolos puxadores da torre o balão é fechado pelo mecanismo de colapsagem, composto por diversos rolos como mostrado na Figura 18.

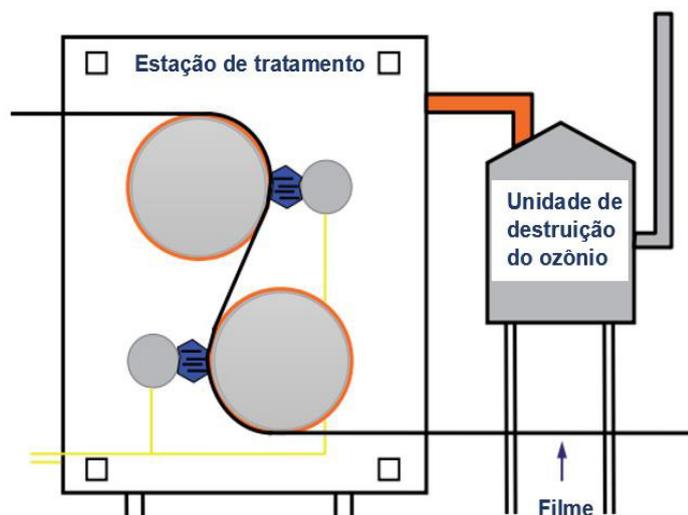
Figura 18 – Mecanismo de colapsagem.



Fonte: Adaptado de Cantor (2019).

Posteriormente à passagem pela torre, o filme desce conduzido por um sistema de cilindros metálicos com circulação interna de água gelada para ajudar no resfriamento, sendo direcionado para a estação de tratamento. Segundo Cantor (2019), materiais poliméricos como o polietileno e polipropileno são apolares, dificultando assim a adesão de outros materiais polares como por exemplo tintas e adesivos. Diante disso é necessário o tratamento do filme através de uma descarga de alta voltagem, sendo o mais comum o Tratamento Corona. Nesse tipo de tratamento a alta voltagem ioniza o ar em uma região pequena do filme, causando sua oxidação e criando uma superfície polar com átomos de oxigênio. Esse processo de ionização gera ozônio que é destruído por um sistema acoplado a estação de tratamento. Na Figura 19 é possível ver o sistema de tratamento.

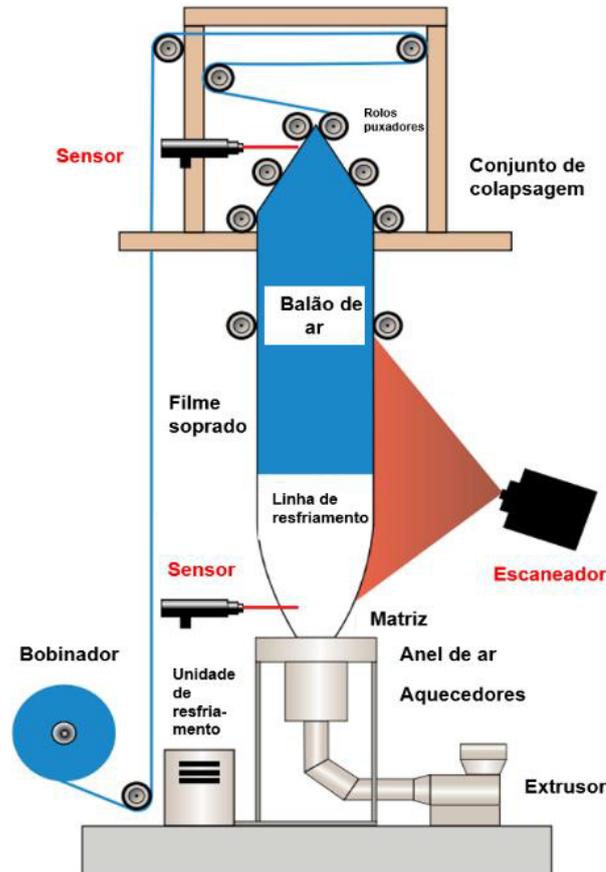
Figura 19 – Tratamento do filme.



Fonte: Adaptado de Cantor (2019).

Em seguida, o filme é direcionado ao conjunto que irá cortar as laterais do filme tubular para separá-lo em duas “folhas” e levá-lo até o embobinador frontal e traseiro para realizar o embobinamento. Também é nesse sistema que o filme é cortado na largura necessária. A Figura 20 esquematiza o processo de extrusão de forma geral com os principais processos.

Figura 20 – Processo de extrusão.



Fonte: Cantor (2019).

4.3.2 Espessura e gramatura

A análise de espessura do filme foi baseada na ASTM D6988 (2013) – Guia padrão para a determinação da espessura de amostras de teste de película plástica. Foi realizado a medição do filme em toda a extensão longitudinal, total de 20 pontos, obtendo-se a média aritmética dos valores encontrados e os valores máximos e mínimos, sendo expressos em μm . O equipamento utilizado foi um micrômetro modelo ABSOLUTE da marca Mitutoyo (Figura 21).

A metodologia para análise de gramatura é a ASTM D646 (2013) - Método de ensaio normalizado para determinação da gramatura do papel e do cartão. Esta análise consiste em realizar uma relação de massa do material em uma área de 1 m^2 e para isso foi obtido amostras da extensão longitudinal do filme, totalizando 10. As amostras foram cortadas utilizando um gabarito de $10 \times 10 \text{ cm}$. Em seguida foram pesadas em uma balança analítica modelo AB204-S da marca Mettler Toledo (Figura 22) com quatro casas decimais, obtendo valores em g (gramas). Estes valores são divididos pela área do corpo de prova, $0,01 \text{ m}^2$, para obter os resultados

em g/m^2 ou simplesmente se multiplica os resultados em g por 100. Também foi calculada a média aritmética dos resultados.

Figura 21 – Micrômetro.



Fonte: Autor.

Figura 22 – Balança analítica.



Fonte: Autor.

4.3.3 Coeficiente de fricção

O método da análise de coeficiente de fricção (COF) e a preparação das amostras foram realizados segundo a ASTM D1894 (2014) - Método de ensaio normalizado para os coeficientes de atrito estático e cinético de películas e folhas

de plástico. A avaliação consiste em analisar o deslizamento entre duas amostras do filme. Uma das amostras é fixada na base móvel do equipamento e a outra na peça que fica estática, presa por um fio de nylon a 150 mm do ponto inicial de medição. Os resultados são adimensionais. As condições de análise estão apresentadas na Tabela 4. O filme deve ser analisado na direção de máquina (DM), ou seja, na direção de produção.

Tabela 4 – Condições de análise de COF.

Parâmetros	Dados
Dimensões da peça estática	65 x 65mm
Peso da peça estática	200g
Tempo de avaliação	60s
Dimensões da amostra da base	250 x 130 mm
Dimensões da amostra da peça estática	75 x 100 mm
Velocidade	150 mm/min

Fonte: Autor.

O equipamento utilizado foi o PARAM MXD – 02 Labthink. As análises foram feitas logo após a produção do filme (0h), depois de 24 h, 48 h e posteriormente a impressão e aplicação de verniz, para acompanhar a migração do aditivo deslizante no filme. O equipamento citado é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Equipamento de medição de COF.



Fonte: Autor.

4.3.4 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A análise de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC, do inglês, *Differential Scanning Calorimetry*) é baseada na ASTM D3418 (2015) - Método de Ensaio Normalizado para Temperaturas de Transição e Entalpias de Fusão e Cristalização de Polímeros por Calorimetria Exploratória Diferencial. Esta técnica, segundo Sarantopoulos e Teixeira (2017), avalia a diferença de fluxo de calor do corpo de prova analisado e de um material de referência baseando-se na temperatura. Em outras palavras, é utilizada para identificar polímeros através de suas transições térmicas quando submetidos a um aquecimento ou resfriamento por meio de uma faixa de temperatura controlada. As amostras são acondicionadas em uma cápsula fechada e submetidas a um ciclo preliminar com a mesma taxa que será utilizada no ensaio, pelo menos 50 °C abaixo e 30 °C acima da temperatura de fusão do material a fim de apagar sua história térmica. Estas temperaturas são mantidas constantes por cerca de 5 minutos para manter o equilíbrio. O aquecimento é repetido de acordo com o ciclo preliminar e o *software* registra os picos de fusão e as entalpias de transição dos materiais encontrados. A Tabela 5 apresenta as condições de análise.

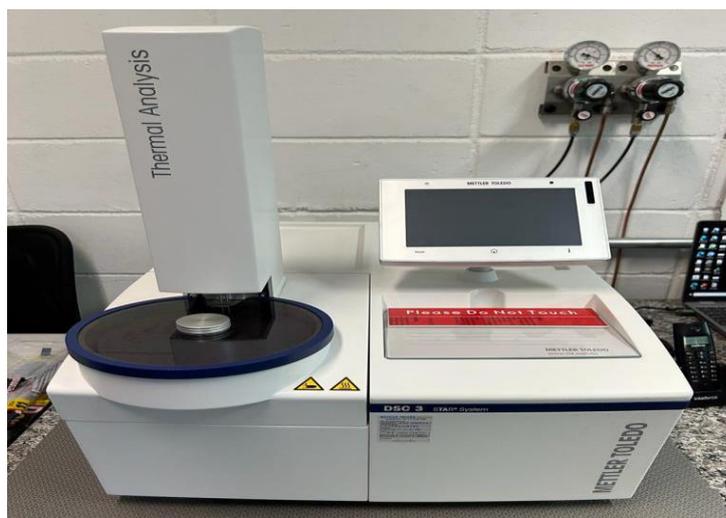
Tabela 5 – Condições de análise DSC.

Parâmetros	Dados
Quantidade de amostra	5 mg ± 10 µg
Material da cápsula	Alumínio
Tipo de cápsula	Não hermética
Taxa de aquecimento	20 °C/min

Fonte: Autor.

O equipamento utilizado foi da marca Mettler Toledo, modelo DSC 3, conforme Figura 24.

Figura 24 – Calorímetro exploratório diferencial.



Fonte: Autor.

4.3.5 Identificação por espectroscopia no infravermelho

As análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foram realizadas seguindo a norma ASTM E1252 (2013) - Prática Normalizada para Técnicas Gerais de Obtenção de Espectros de Infravermelhos para Análise Qualitativa. Esta técnica é uma ferramenta qualitativa utilizada para a identificação de materiais poliméricos na estrutura de uma embalagem flexível. De acordo com Sarantopoulos e Teixeira (2017, p.197):

A identificação de polímeros por espectroscopia no infravermelho baseia-se no fato de que toda molécula orgânica absorve energia eletromagnética em comprimentos de onda específicos, de acordo com a natureza do movimento e das ligações químicas, massa dos átomos, geometria da molécula e ambiente químico/físico. A frequência de absorção da radiação infravermelha é característica para vários tipos de ligações químicas, o que torna possível reconhecer a presença de diferentes grupos estruturais. Na prática, o espectro de absorção da radiação no infravermelho é expresso em um gráfico denominado espectro no infravermelho, constituído por bandas de absorção, cujas posições e intensidades correspondem a ligações e grupamentos químicos específicos presentes no material analisado.

Dessa maneira, a identificação dos polímeros é feita comparando o espectro do material analisado com espectros de referência da literatura, obtidos nas mesmas condições. Para essa análise foi empregada as técnicas de transmissão e refletância total atenuada (ATR). A primeira realiza uma leitura direta do corpo de prova e a segunda baseia-se na reflexão total do feixe de radiação infravermelha que incide a um determinado ângulo, na penetração de alguns micrômetros da

amostra e na propagação da radiação. Para estruturas de um só substrato pode ser necessário reduzir a espessura da amostra por prensagem a quente e para estruturas laminadas é necessário a separação dos substratos com a utilização de solventes, para obter um espectro de qualidade. O espectrômetro utilizado foi de modelo Spectrum GX, marca Perkin Elmer. Na Tabela 6 é mostrado os parâmetros utilizados na análise.

Tabela 6 – Condições de análise FTIR.

Parâmetros	Dados
Região de operação do infravermelho	4.000 cm ⁻¹ a 400 cm ⁻¹
Média de varreduras	16
Resolução das varreduras	4 cm ⁻¹
Espessura do corpo de prova	10 a 50 µm

Fonte: Autor.

4.3.6 Análises térmicas de termosselagem

As análises de termosselagem são realizadas para verificar a resistência da solda, ou seja, a força necessária para separar as duas camadas seladas. Pode ser avaliada a resistência imediatamente após a termosselagem, ainda quente, chamado de *hot tack* (aderência quente) e após o resfriamento, chamado de *heat seal* (selo térmico). A resistência em *hot tack* é inferior ao *heat seal* porque a máxima resistência somente é alcançada com a total solidificação do material (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017). Esse tipo de análise é fundamental para escolher as matérias-primas corretas que irão auxiliar no bom desempenho na aplicação da embalagem, evitando defeitos, promovendo selos herméticos e contribuindo para produtividade da linha de envase.

Foi utilizado para a análise de *hot tack* a ASTM F1921/F1921M-12 (2018) - Métodos de ensaio normalizados para a resistência de selagem a quente (*hot tack*) de polímeros termoplásticos e misturas que constituem as superfícies de selagem de véu flexível e para *heat seal* a ASTM F2029-16 (2021) - Práticas normalizadas para a realização de selagens térmicas em laboratório para a determinação da capacidade de selagem térmica de materiais de barreira flexíveis medida pela

resistência da selagem. Ambas foram realizadas no equipamento modelo Magma 3-station, da marca Enepay (Figura 25). Este equipamento permite realizar a análise de três corpos de prova simultaneamente e gera as curvas de selagem no *software*, da relação entre força e temperatura. A selagem é realizada por dois mordentes que são aquecidos a mesma temperatura e fecham com controle preciso de tempo e pressão. Após realizar a selagem, o equipamento separa as garras de fixação e realiza a medição da força exercida para realizar o rompimento ou abertura da solda.

Figura 25 – Equipamento de análise de *hot tack* e *heat seal* .



Fonte: Autor.

A Tabela 7 mostra as condições das análises.

Tabela 7 – Condições de análise de *hot tack* e *heat seal*.

Parâmetros	Dados
Dimensões do corpo de prova	25.4 x 330 mm
Tempo de contato dos mordentes	0.7 s
Pressão dos mordentes	60 psi
Velocidade de separação das garras	25.4 mm/s
Tempo de resfriamento para <i>heat seal</i>	20 s
Temperatura de início	100 °C
Temperatura de fim	210 °C

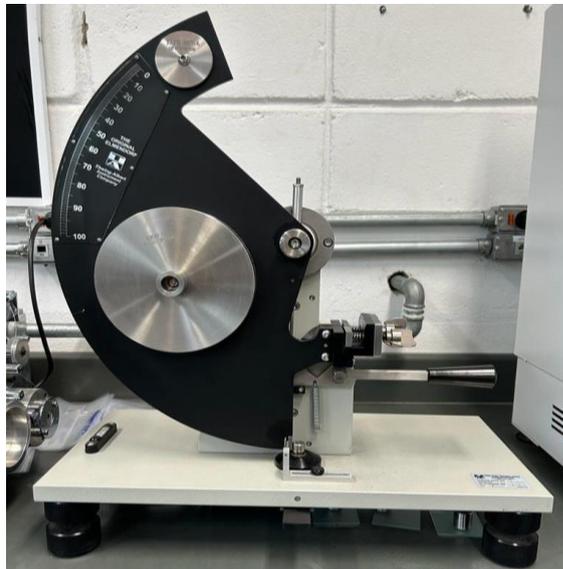
Fonte: Autor.

4.3.7 Resistência à propagação do rasgo

A análise de resistência à propagação do rasgo foi feita baseada na ASTM D1922-15 (2020) - Método de ensaio normalizado para a resistência ao rasgamento por propagação de películas de plástico e folhas finas pelo método do pêndulo. Este método, também conhecido como Elmendorf, compreende em medir a resistência ao rasgamento utilizando um pêndulo. É analisado na DM e na direção transversal (DT) à produção do filme, pois cada direção apresenta uma resistência diferente que está em função à orientação das moléculas dos polímeros durante o processamento do filme. Deve-se realizar o ensaio em 10 determinações de cada direção. Valores altos de resistência são geralmente necessários para uma boa maquinabilidade do filme e bom desempenho mecânico da embalagem.

O equipamento utilizado foi do modelo Elmendorf 60-2021 series, marca Thwing-Albert (Figura 26). Este equipamento consta com uma capacidade de 3.200 gf e com lâmina centralizada para realizar o corte inicial de 20 mm no corpo de prova.

Figura 26 – Testador Elmendorf.



Fonte: Autor.

Os corpos de provas foram cortados de acordo com gabarito tipo raio constante mostrado na Figura 27. Após obter os resultados, a resistência à propagação ao rasgo é calculada de acordo com a equação a seguir:

$$F = 32 \cdot \text{média de leituras} \cdot n^{-1}$$

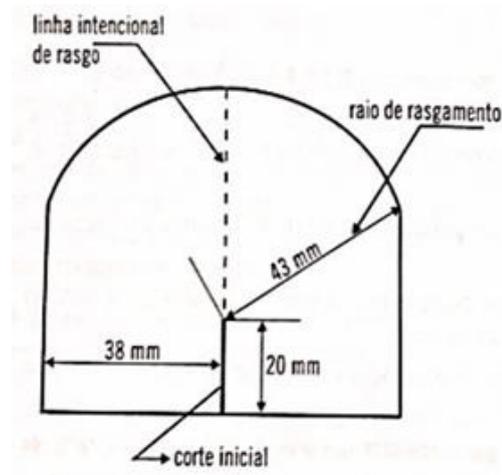
onde:

F = resistência à propagação do rasgo (gf)

n = número de corpos de prova necessário para uma determinação

O número 32 é o fator de correção aplicado para o equipamento com pêndulo de 3200 gf.

Figura 27 – Gabarito tipo raio constante para teste Elmendorf



Fonte: Sarantopoulos e Teixeira (2017).

4.3.8 Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados atendendo a norma ASTM D882-12 (2018) - Método de ensaio normalizado para as propriedades de tração de folhas finas de plástico. São eles: módulo de Young, resistência a tração e alongamento. Foram realizados na máquina de ensaios universais, modelo EMIC 23-2S, marca Instron (Figura 28).

Figura 28 – Máquina de ensaio universal – Instron.



Fonte: Autor.

4.3.8.1 Módulo de Young

O ensaio de módulo de Young determina a rigidez do filme. É a relação entre tensão e deformação, sendo uma constante independente do esforço sempre que não exceda de um valor máximo denominado limite elástico (FERREIRA; FECHINE, 2021). Para realizar o ensaio é aferido a espessura do corpo de prova, no seu sentido longitudinal, com um micrômetro. Foi analisado o filme nos sentidos DM e DT. A Tabela 8 mostra as condições de análise.

Tabela 8 – Condições de análise do módulo de Young.

Parâmetros	Dados
Largura do corpo de prova	25.4 mm
Distância entre as garras	200 mm
Número de corpos de prova	5
Velocidade de ensaio	25 mm/min
Espessura	Varição máxima de 5% no corpo de prova
Medição	2%
Célula de carga	25.51 Kg

Fonte: Autor.

4.3.8.2 Resistência à tração e alongamento

A resistência à tração mede a máxima tensão mecânica em que o filme pode ser exposto, ou seja, a capacidade em suportar uma carga. O filme sofre deformação elástica até exceder a resistência à tração, levando-o ao rompimento. O alongamento descreve a capacidade do filme em esticar antes do rompimento. Um material que tem a propriedade de esticar significativamente antes do ponto de ruptura é chamado de dúctil, ao contrário, de frágil (CANTOR, 2019).

Para ambas as análises é aferido a espessura com um micrômetro no sentido longitudinal do corpo de prova e realizado o ensaio nas direções DM e DT. A Tabela 9 apresenta as condições de análise dos dois ensaios, que são as mesmas.

Tabela 9 – Condições de análise da resistência à tração e alongamento.

Parâmetros	Dados
Largura do corpo de prova	25.4 mm
Distância entre as garras	50.8 mm
Número de corpos de prova	5
Velocidade de ensaio	500 mm/min
Espessura	Varição máxima de 5% no corpo de prova
Sensibilidade do equipamento	90 %
Célula de carga	25.51 Kg

Fonte: Autor.

4.3.9 Ensaio de resistência à perfuração

O ensaio de resistência à perfuração foi baseado na ASTM F1306 (2021) - Método de ensaio normalizado para a resistência à penetração a baixa velocidade de películas e laminados de barreira flexíveis. Este ensaio é realizado para verificar o quanto um filme resiste a uma força biaxial que o perfura através de uma ponteira e o quanto ele deforma antes de romper. Sua resistência está relacionada com os tipos de polímeros presentes na estrutura, espessura, orientação das moléculas e elasticidade. Antes do ensaio, a espessura deve ser aferida em três pontos do corpo de prova. Essa análise também é realizada na máquina universal de ensaios

com célula de carga operando em compressão. É utilizado uma ponteira metálica com ponta esférica que realiza a perfuração do filme. A análise deve ser interrompida assim que o filme sofrer a perfuração. Os resultados obtidos de cada corpo de prova evidenciada o modo de falha, em Newton (N), a energia necessária para perfurar em Joule (J) e a deformação da amostra em milímetro (mm). A Tabela 10 mostra as condições do ensaio.

Tabela 10 – Condições de análise da resistência à perfuração.

Parâmetros	Dados
Dimensão do corpo de prova	76 x 76 mm
Diâmetro da ponta esférica	3.2 mm
Número de avaliações	Mínimo 5 na extensão longitudinal do filme
Velocidade de ensaio	500 mm/min
Espessura	Variação máxima de 5% no corpo de prova
Sensibilidade do equipamento	90 %
Célula de carga	25.51 Kg

Fonte: Autor.

4.3.10 Taxa de permeabilidade ao oxigênio (TPO₂)

O ensaio de permeabilidade ao oxigênio foi realizado de acordo com a ASTM D3985 (2017) - Método de ensaio normalizado para a taxa de transmissão de gás oxigênio através de películas e folhas de plástico utilizando um sensor coulométrico. Segunda esta norma, a taxa de permeabilidade ao oxigênio é definida como a quantidade de oxigênio que passa pelo filme em uma unidade de área. A temperatura e umidade relativa são parâmetros bastante críticos para essa análise e controlá-los é imprescindível. Como apresentado no tópico 3.1.4, o EVOH por ser um material hidrofílico, perde suas propriedades de barreiras porque a água absorvida diminui a energia de ativação para a difusão do oxigênio no polímero.

O corpo de prova é fixado como divisória da célula de difusão, separando duas câmaras, uma com gás de arraste (hidrogênio ou nitrogênio) e na outra o fluxo de oxigênio. Conforme o oxigênio permeia no filme em análise, ele é conduzido

pelo gás de arraste até um detector coulométrico, que calcula a quantidade de oxigênio por unidade de tempo (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

Antes da análise o corpo de prova acondicionado a umidade relativa similar ao do ensaio por dois dias. Para a análise, o corpo de prova foi posicionado de maneira que o lado interno da embalagem fique em contato com o gás permeante, pois para a aplicação de produtos de limpeza é necessário que a barreira impeça a saída dos aromas. Também foi aferido a espessura do corpo de prova com micrômetro. As condições de análise são apresentadas na Tabela 11 e o equipamento utilizado foi de modelo OX-TRAN, marca Mocon.

Tabela 11 – Condições de análise da taxa de permeabilidade ao oxigênio.

Parâmetros	Dados
Área de permeação	50 cm ²
Umidade relativa	0 %
Temperatura de análise	23 °C
Dimensão do corpo de prova	4" x 4"
Espessura	Variação máxima de 5% no corpo de prova
Gás de arraste	Nitrogênio, pureza > 99,5 %
Gás de teste	Oxigênio, pureza > 99,5 %

Fonte: Autor.

4.3.11 Impressão e aplicação de verniz

A impressão e aplicação de verniz foram realizados pelo processo de flexografia, que utiliza uma fôrma (clichê) flexível de borracha ou foto polímero com a imagem gravada em alto relevo. As diferenças de tonalidades da impressão são determinadas pelo tamanho e altura das células gravadas no cilindro. Foi utilizado um conjunto de impressão de até 8 cores, composto por um sistema que após aplicar a tinta no clichê, o filme passa pela máquina que realiza uma pressão transferindo a tinta para o filme. Isso se repete para cada cor até que a imagem seja formada e por último é aplicado o verniz Opulux™ HGT. Posteriormente o filme passa pelo túnel de secagem por circulação de ar quente. A aplicação do verniz, para o quesito resistência térmica, é muito importante, pois como o filme tem uma espessura elevada é necessário a utilização de altas temperaturas nos mordentes

das máquinas de envase para que a temperatura chegue na camada de selagem o mais rápido possível, para selar rapidamente e não perder produtividade. Foi aplicado 1.2 g/m² de tinta e 2.0 g/m² de verniz.

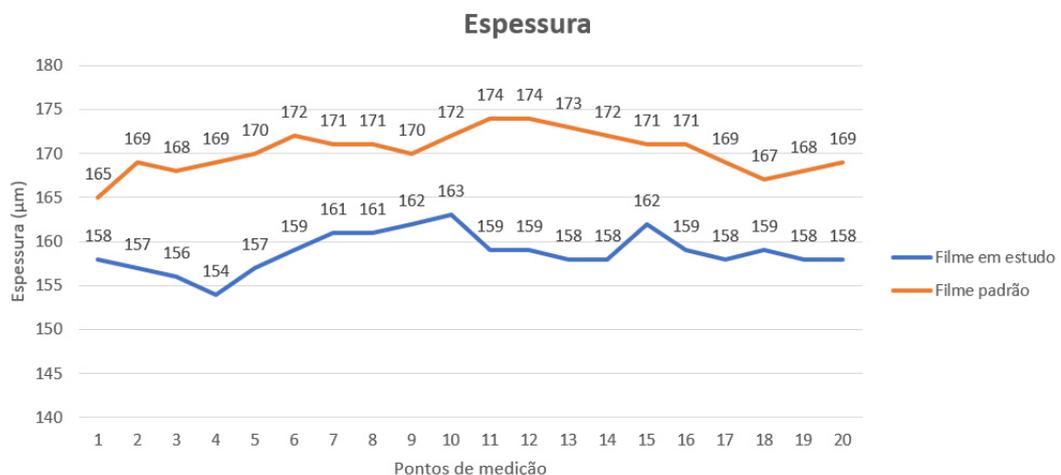
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O filme da embalagem padrão (PET/PE) foi analisado e caracterizado primeiro para verificar as necessidades da embalagem para a aplicação e desenvolver a estrutura do filme em estudo. Após a fabricação do filme em estudo, ele foi analisado e caracterizado para que fosse realizado um estudo comparativo de suas propriedades com a embalagem padrão.

5.1 ESPESSURA E GRAMATURA

O filme em estudo foi extrusado com espessura de 155 μm com variação aceitável de $\pm 8 \mu\text{m}$. Após extrusão, impressão e aplicação de verniz, foi verificada sua espessura e comparado com a espessura da embalagem padrão, tendo como novo objetivo 157 $\mu\text{m} \pm 8 \mu\text{m}$ de variação devido a adição de tinta e verniz. O filme em estudo foi produzido com 10 μm menos que o padrão com o intuito de reduzir a quantidade em massa de material na embalagem final. Os resultados comparativos são apresentados na Figura 29.

Figura 29 – Resultados comparativos de espessura do filme em estudo e padrão.



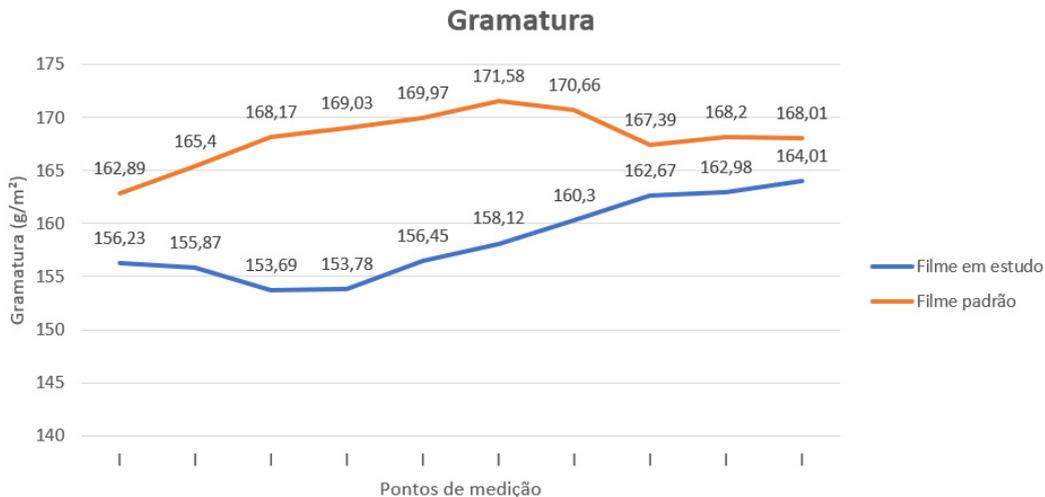
Fonte: Autor.

Os resultados demonstram que a espessura do filme em estudo está dentro da variação aceitável (149 μm a 165 μm), com valor mínimo encontrado de 154 μm e máximo de 163 μm . A média dos resultados foi de 158,8 μm , bem próximo ao objetivo estabelecido, isso se deve ao bom controle dos processos de extrusão e impressão. Já o filme da embalagem padrão apresenta média de 170,27 μm , ou seja, a redução de espessura foi de 6,73%.

A análise de gramatura foi realizada para obter a média dos resultados e

com esse dado calcular posteriormente o rendimento dos filmes em dólares americanos (US\$) por metro quadrado (m^2). A Figura 30 mostra o gráfico comparativo dos resultados encontrados dos dois filmes analisados.

Figura 30 – Resultados comparativos de gramatura do filme em estudo e padrão.



Fonte: Autor.

A média dos resultados encontrados para o filme em estudo foi de 158,41 g/m^2 e do filme padrão de 168,13 g/m^2 . Estes valores serão usados posteriormente para outros cálculos.

5.2 COEFICIENTE DE FRICÇÃO

A análise de COF foi realizada para acompanhar a migração do deslizante ao longo do tempo e dos processos, até sua estabilização, pois é um parâmetro fundamental no envase final do produto. O COF do filme foi analisado face interna com face interna e face externa com face externa. Entende-se como face interna a área de selagem ou área interna da embalagem e face externa a área de impressão, externa da embalagem. Como parâmetros do cliente para essa aplicação os valores de COF dinâmico final (após impressão) devem estar entre 0,15 e 0,25 para avaliação da face interna e entre 0,20 e 0,30 para a face externa. Como é um parâmetro já solicitado pelo cliente, não foi realizado comparação com o filme padrão. Para atingir esse objetivo o filme foi extrudado com 720 partes por milhão (ppm) de aditivo deslizante. A Tabela 12 mostra os resultados encontrados durante o acompanhamento.

Tabela 12 – Resultados de COF ao decorrer do tempo e processos.

Período	0h	24h	48h	Após impressão
Interno	0,28	0,17	0,16	0,18
Externo	0,33	0,24	0,26	0,27

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos demonstram que a aditivação de deslizante do filme foi adequada para atingir os parâmetros estabelecidos, estando concentrada mais próximo a camada de selagem (interna). Como o filme apresenta resinas de alta cristalinidade (EVOH e PEAD), a migração das moléculas de amida, presentes no agente deslizante, fica limitada. Logo após a produção do filme, foram obtidos valores maiores pelo fato do deslizante ainda não ter migrado para a superfície do filme. Com o decorrer da migração, os valores tendem a diminuir, deixando o filme mais liso. É natural que após um período, a migração atinja um nível de estabilização, como evidenciado nos resultados de 24 h e 48 h. É natural também que após passar por outro processo, neste caso de impressão e aplicação de verniz, o filme perca um pouco de deslizante para os componentes da máquina, fazendo com que o COF aumente um pouco (RABELLO, 2000).

5.3 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL

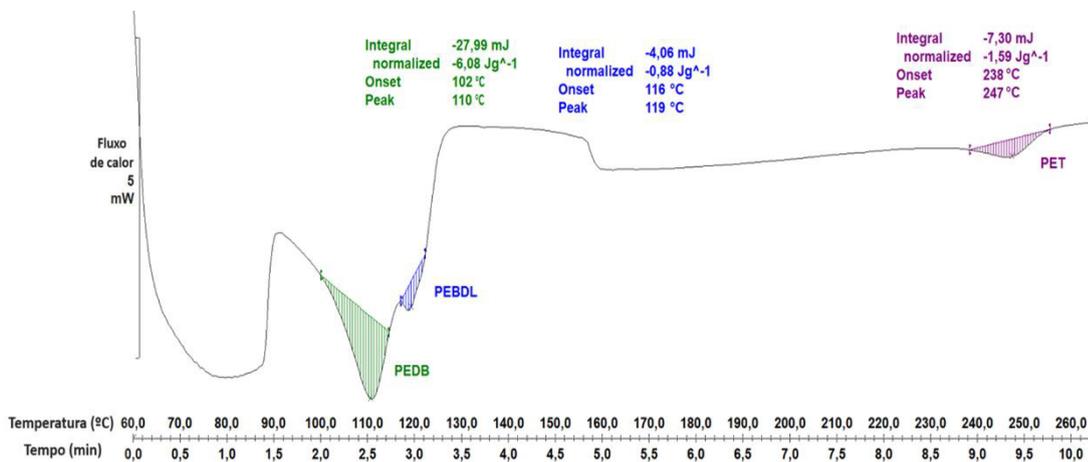
O DSC foi realizado para evidenciar a composição estrutural do filme padrão e do filme em estudo. Após obter as curvas de picos endotérmicos, foram consultados os valores de referência de temperatura de fusão de polímeros, fornecidos pela empresa Dow Chemical, para definição dos materiais de acordo com as temperaturas encontradas.

Na Figura 31 é apresentado os resultados do filme padrão onde é possível identificar a presença de PET com pico de fusão de 247 °C, PEBD com pico de 110 °C e PELBD com 119 °C. Já na Figura 32 é evidenciado picos de POP de 87 °C, PELBD de 125 °C, PEAD de 132 °C e EVOH de 159 °C. Como estes polímeros estão em maior concentração nas estruturas, seus picos são bem definidos pelo ensaio. Os aditivos por serem dispersos, geralmente em PEBD e PELBD, em

baixas concentrações não tem seus picos definidos neste tipo de análise.

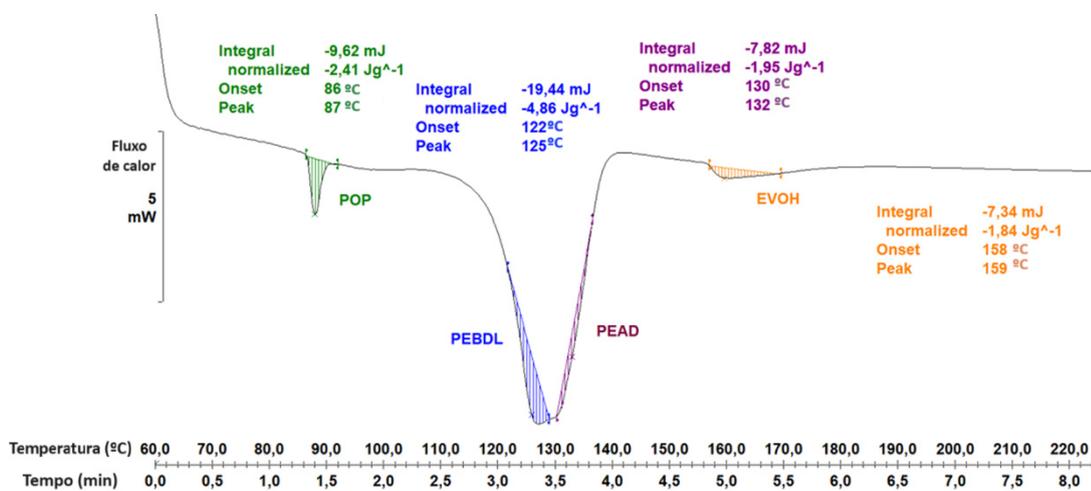
O poliéster é um material com boa estabilidade térmica. Devido sua alta temperatura de fusão, ele promove resistência térmica maior em relação ao polietileno. Enquanto o PE está fundindo e selando, o PET mantém suas propriedades inalteradas, por isso, seu uso é bastante difundido na indústria de embalagem. Já o EVOH, por apresentar alta cristalinidade das lamelas, sua temperatura de fusão é superior ao dos polietilenos. E entre os polietilenos o de alta densidade se sobressai em relação aos de baixa densidade, também devido a maior cristalinidade (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016).

Figura 31 – Curva de DSC do filme padrão.



Fonte: Autor.

Figura 32 – Curva de DSC do filme em estudo.



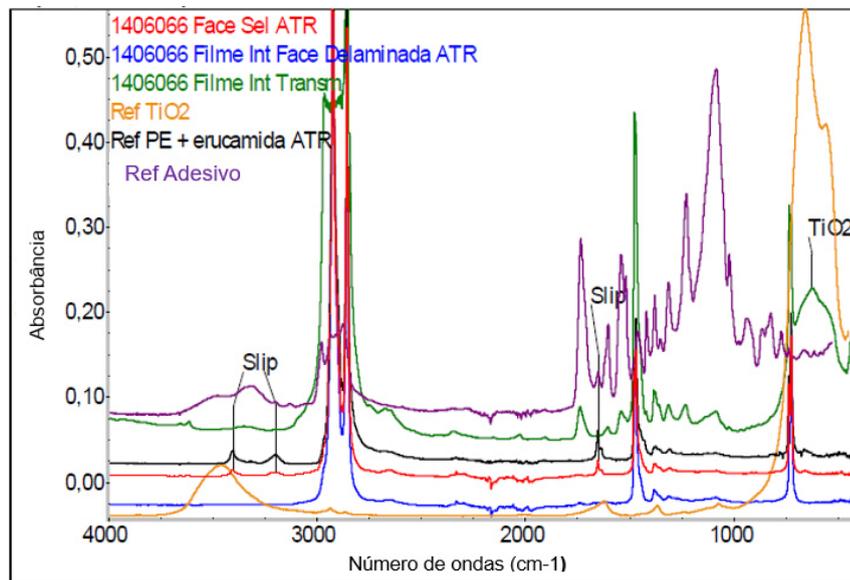
Fonte: Autor.

5.4 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO

A análise de FTIR foi realizada com o intuito de aprofundar a caracterização dos filmes, principalmente do filme padrão, para identificar todos os tipos de materiais existentes na sua composição, já que somente com o ensaio de DSC não é possível. Dessa forma é possível desenvolver o filme em estudo com maior precisão, para atingir o objetivo esperado.

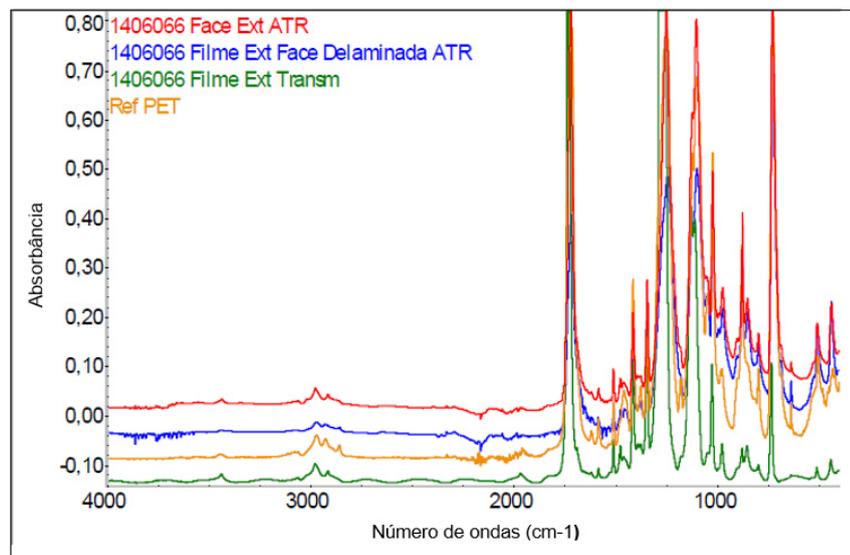
A Figura 33 apresenta os resultados obtidos pela refletância total atenuada e transmissão da face interna do filme padrão e a Figura 34 da face externa.

Figura 33 – FTIR da face interna do filme padrão.



Fonte: Autor.

Figura 34 – FTIR da face externa do filme padrão.

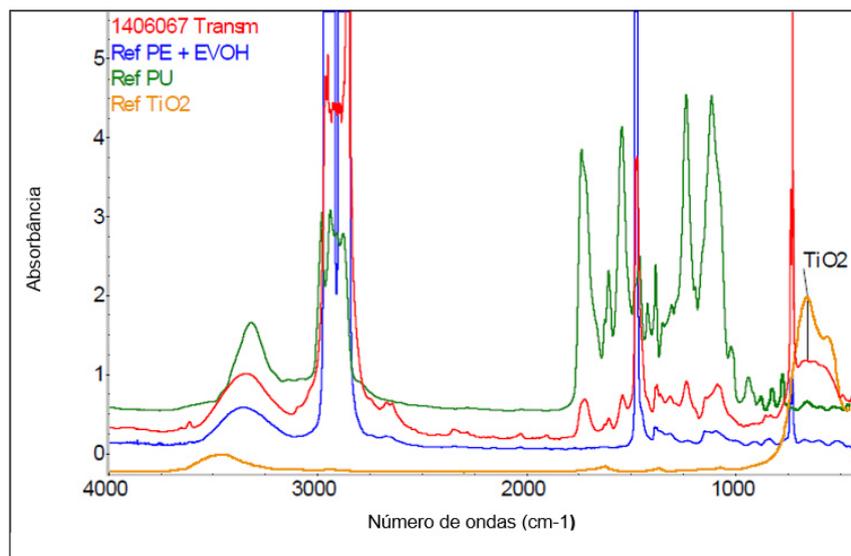


Fonte: Autor.

A amostra foi delaminada, ou seja, foi separado o PET do PE com uso de solvente para realizar o ensaio com maior eficácia nos dois materiais. De acordo com os espectros obtidos e cruzados com as referências da literatura utilizadas pelo laboratório da Dow Chemical, encontrou-se no filme interno dióxido de titânio (TiO_2), presente no colorante branco, polietileno com carga de erucamida (princípio ativo do aditivo deslizante) e o adesivo utilizado na laminação. Já o filme externo foi evidenciado ser um filme de poliéster. O filme em estudo teve sua espessura reduzida para melhor avaliação. A Figura 35 apresenta a refletância total atenuada e transmissão da face interna e a Figura 36 da face externa.

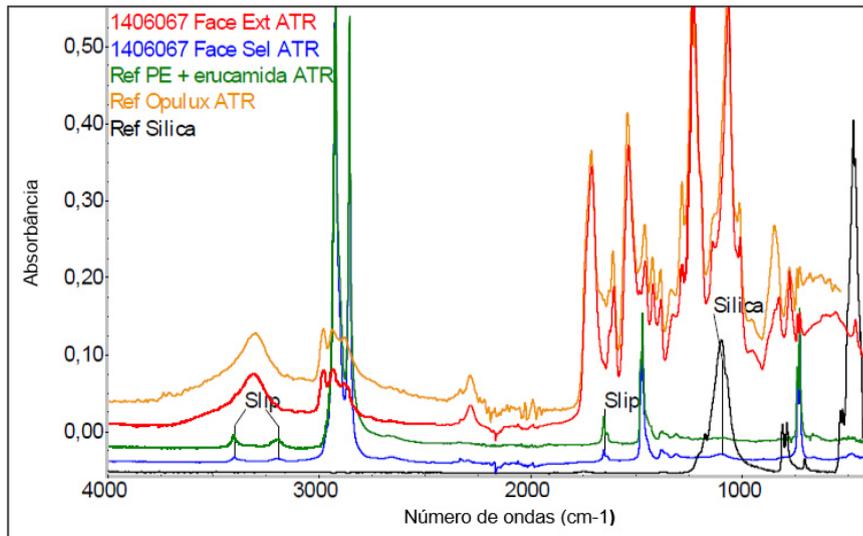
De acordo com os resultados é possível constatar os espectros do EVOH, colorante branco e adesivo de coextrusão na face interna. Na face externa, polietileno com carga de erucamida, sílica que está presente no antibloqueante e o adesivo Opulux™.

Figura 35 – FTIR da face interna do filme em estudo.



Fonte: Autor.

Figura 36 – FTIR da face externa do filme em estudo.



Fonte: Autor.

Com estes resultados constata-se os espectros do EVOH, colorante branco e adesivo de coextrusão na face interna e na face externa polietileno com carga de erucamida, sílica que está presente no antibloqueante e o adesivo Opulux™.

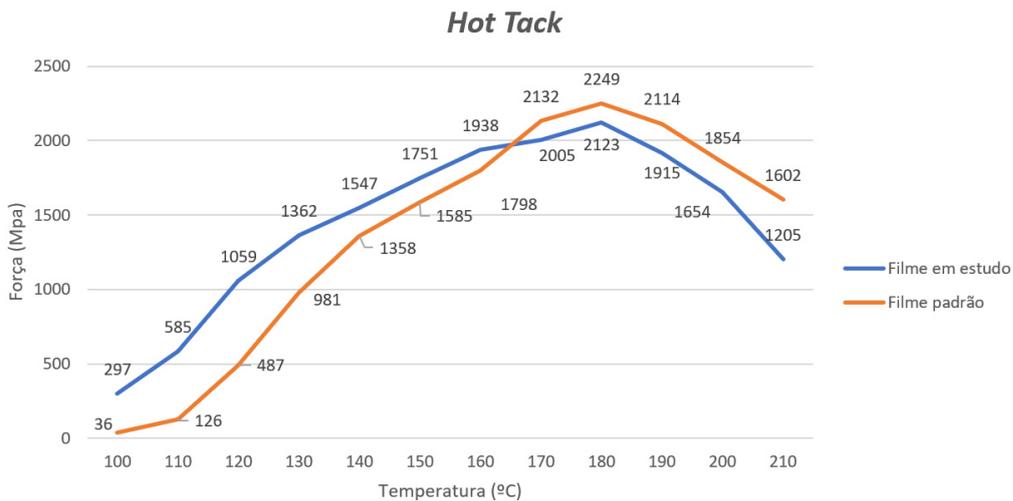
5.5 TERMOSSELAGEM

As análises de termoselagem foram realizadas para comparar a capacidade de selagem dos dois filmes, pois o filme em estudo deve apresentar igual ou melhor desempenho para atender aos requisitos da aplicação e manter boa processabilidade no envase. A Figura 37 apresenta a curva de *hot tack*, ou seja, a resistência da selagem quente, já que quando o produto é envasado, a área de solda ainda não teve tempo suficiente para esfriar.

As curvas obtidas demonstram maior eficiência do filme em estudo, pois inicia a selagem com menor temperatura e mantém as forças superiores até 160 °C, após essa temperatura as forças são menores, mas bastante similares a do filme padrão. O ponto de início de selagem mais baixo está relacionado com o uso de plastômero. Por sua ultrabaixa densidade e por sua estrutura molecular conter muitas ligações intramoleculares na fase cristalina, esse polímero apresenta alta capacidade e alta qualidade da selagem. Isso também permite que o cliente aumente a velocidade de linha durante o envase, reduzindo o tempo de contato dos mordentes. Outro ponto observado nestes resultados é que a força do filme em estudo começa a cair primeiro que o filme padrão. Isso também está relacionado

ao uso de plastômero, porque suas moléculas entram em degradação mais rápido de que um polietileno convencional. O filme padrão não utiliza plastômero devido à alta resistência térmica que o PET promove à embalagem, evitando que ela queime quando utilizado altas temperaturas (ELIAS, 2011).

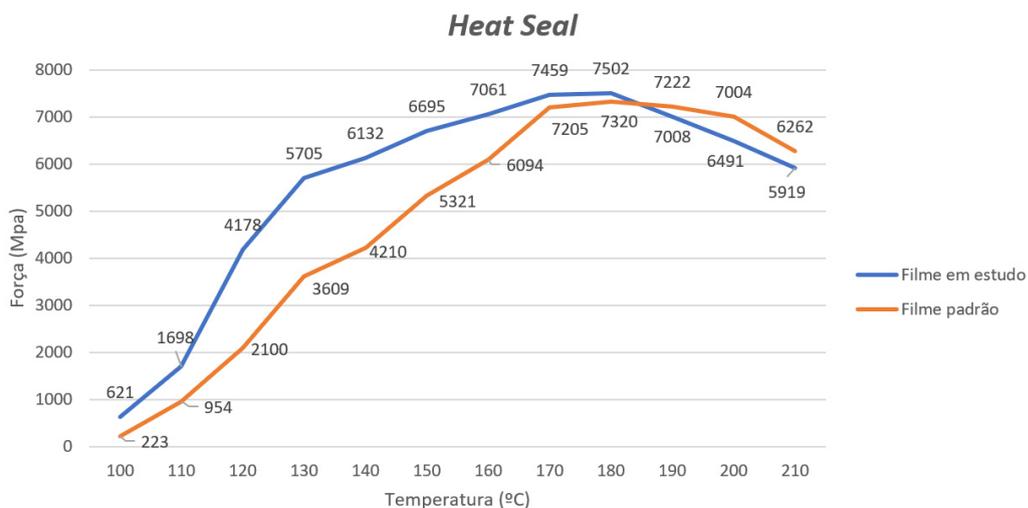
Figura 37 – Curvas comparativas de selagem *Hot Tack*.



Fonte: Autor.

A outra análise de termosselagem realizada foi o *heat seal*, que avalia a força de selo após o resfriamento. Esse tipo de ensaio é uma simulação da resistência que a embalagem apresentará durante sua manipulação do decorrer do processo até seu uso final pelos consumidores. A Figura 38 mostra as curvas comparativas.

Figura 38 – Curvas comparativas de selagem *Heat Seal*.



Fonte: Autor.

Novamente é possível observar a influência do plastômero no ponto de início

da selagem, com forças bastantes superiores e com o início da degradação mais acelerada. Esse tipo de análise apresenta forças muito superiores que a análise de *hot tack* porque os polímeros já estão solidificados, apresentando a máxima resistência. As forças também estão relacionadas com a alta espessura dos filmes que apresentam maior resistência mecânica ao rompimento.

5.6 RESISTÊNCIA À PROPAGAÇÃO DO RASGO

A análise comparativa de resistência à propagação do rasgo foi realizada para assegurar que a embalagem final não rasgue com facilidade, pois para a aplicação de produtos de limpeza é necessário que o filme tenha alta resistência mecânica, principalmente por ser produtos líquidos. Para isso, foi analisado a força de resistência na direção máquina e na direção transversal. A média dos resultados estão expostas na Tabela 13.

Tabela 13 – Média dos resultados da resistência à propagação do rasgo.

Ensaio	Filme em estudo (gf)	Filme padrão (gf)
Rasgo – DM	1234	192
Rasgo – DT	1896	840

Fonte: Autor.

Os resultados mostram que o filme em estudo apresenta resistência a propagação do rasgo muito superior ao filme padrão, mesmo tendo 10 μm menos de espessura. Isso se deve a propriedade de alta resistência mecânica do PELBD, produzido com catalisador metalocênico, que apresenta uma estreita distribuição de massa molar e cadeias lineares de baixo grau de ramificações curtas. Dessa maneira, as lamelas são mais ordenadas e espessas.

O filme padrão apresenta baixa resistência devido à alta rigidez do PET por ser orientado nas duas direções, DM e DT, o que facilita a propagação do rasgo. Outro fator que também pode contribuir é a baixa resistência mecânica do PELBD usado para a produção do filme de polietileno laminado com o filme de poliéster. Em ambos os casos a resistência na direção máquina é inferior ao da direção transversal, justamente pela orientação do filme na DM ser maior, deixando-o fragilizado nessa direção (COUTINHO; MELLO; SANTA MARIA, 2003).

5.7 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Os ensaios de tração mecânica foram realizados para verificar a rigidez do filme, que deve apresentar rigidez elevada para sustentação do SUP nas prateleiras de mercado e verificação da resistência à tração e alongamento, que definem a carga máxima suportada pela embalagem. A Tabela 14 expõe a média dos resultados encontrados.

Tabela 14 – Média dos resultados de ensaios de tração mecânica.

Ensaio	Filme em estudo	Desvio padrão	Filme padrão	Desvio padrão
Módulo de Young (MPa) - DM	619	8	574	6
Módulo de Young (MPa) - DT	695	7	588	7
Resistência à tração (MPa) - DM	20	5	28	4
Resistência à tração (MPa) - DT	26	3	27	2
Alongamento (%) – DM	589	9	67	6
Alongamento (%) – DT	650	9	72	7

Fonte: Autor.

Os resultados de módulo de Young expressam a rigidez do filme e estão relacionados com o uso de PEAD que apresenta alta cristalinidade devido ao alto empacotamento de suas cadeias. Esse empacotamento é causado porque as cadeias desse tipo de polietileno apresentam poucas ou não apresentam ramificações. O módulo representa a resistência à deformação elástica, ou seja, quanto maior o módulo, maior a resistência. De acordo com os resultados encontrados pode-se verificar que a rigidez do filme em estudo apresenta valores ligeiramente acima do filme padrão, demonstrando que o filme em estudo apresenta a rigidez necessária para um SUP. A resistência à tração e o alongamento estão relacionados com o uso de PELBD, por suas ótimas propriedades mecânicas como descrito no tópico 5.6. Esse tipo de polímero apresenta ótima resistência à tração e alta capacidade de alongamento e mesmo com o alto teor de PEAD usado, ele é capaz de manter suas propriedades mecânicas em alto nível. Os resultados obtidos mostram que a resistência à tração do filme em estudo é um pouco inferior ao filme padrão, pois a alta rigidez do PET usado neste último, aumenta consideravelmente

sua resistência. Por outro lado, a alta rigidez do poliéster reduz drasticamente a capacidade de alongamento do filme laminado, apresentando números muito inferiores ao do filme em estudo, que por ser à base de polietileno, apresenta melhor capacidade de alongamento. Essa alta capacidade de alongamento permitirá maior resistência a perfuração, no que diz respeito a deformação (CANTOR, 2019).

5.8 RESISTÊNCIA À PERFURAÇÃO

O ensaio de resistência à perfuração foi realizado porque é fundamental que a embalagem para a aplicação de produtos líquidos, apresente alta resistência e não perfurem com facilidade. Uma embalagem frágil pode apresentar grandes problemas como derramamento do produto, perda de fragrância por escape de aromas, perda de propriedades químicas devido a ação de agentes externos, entre outros. A comparação dos filmes é apresentada pela Tabela 15 de acordo com a média dos resultados encontrados.

Tabela 15 – Média dos resultados de resistência à perfuração.

Ensaio	Filme em estudo	Desvio padrão	Filme padrão	Desvio padrão
Resistência à perfuração (N)	27,03	0,5	31,03	0,6
Resistência à perfuração (J)	0,18	0,01	0,09	0,01
Resistência à perfuração deformação (mm)	11,98	0,9	6,22	0,8

Fonte: Autor.

A resistência à perfuração está relacionada com o uso de PEAD e o PELBD. O alta densidade irá auxiliar na força de resistência, pois devido sua rigidez, ele promove maior resistência à tração. Pelo aspecto de rigidez, nota-se que o filme padrão apresenta um pouco mais de resistência, nesse aspecto, que o filme em estudo, devido à alta cristalinidade do PET. Isso também é promovido pela morfologia do poliéster e sua bi orientação no processo de extrusão, que mesmo apresentando valores mais baixos nas análises de módulo de Young, apresenta maior resistência a perfuração. Já o linear de baixa densidade é o responsável pelo alto alongamento na deformação do filme em estudo, o que não é observado no filme padrão, sendo perfurado com mais facilidade mesmo tendo maior espessura. A resistência em Joules demonstra a energia utilizada para perfurar os filmes e como consequência da alta resistência à deformação do filme em estudo. Nota-se a necessidade de mais energia para sua perfuração em comparação ao filme

padrão (SARANTOPOULOS; TEIXEIRA, 2017).

5.9 TAXA DE PERMEABILIDADE AO OXIGÊNIO

A análise da taxa de permeabilidade ao oxigênio foi realizada para verificar o nível de barreira dos filmes devido a necessidade de manter o aroma do produto envasado. A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 16 – Resultados da taxa de permeabilidade ao oxigênio.

Filme	TPO ₂ (cc/m ² . dia)
Filme em estudo	2,9
Filme padrão	95

Fonte: Autor.

Os resultados demonstram uma grande melhora na barreira a gases e aromas do filme em estudo. Isso permitirá a conservação do produto e seu aroma por tempo mais prolongado. Essa melhora significativa de barreira está relacionada com a utilização do EVOH. Ele apresenta alta barreira a tais substâncias devido aos grupos funcionais de alto grau de cristalinidade dos polímeros de sua estrutura molecular, ao tamanho e distribuição desses cristais. O PET apesar de ter boa cristalinidade não apresenta alta barreira porque seus grupos funcionais não apresentam essa característica (MAES, 2018). O fornecedor do filme de PET informa em seu laudo técnico que a taxa de permeabilidade ao oxigênio deste material é aproximadamente 100 cc/m².dia e de acordo com a análise realizada, após a laminação com o filme de PE, a taxa de permeabilidade caiu somente 5 cc/m².dia. Isso porque o polietileno apresenta permeabilidade elevada a gases, como visto no tópico 3.1.4.

Em seu estudo, Canais (2022) utilizou as mesmas premissas para propor uma embalagem alimentícia com EVOH para aumentar o tempo de armazenamento do produto, substituindo uma estrutura padrão de PET/PE. O intuito também foi utilizar baixo percentual de EVOH para facilitar a reciclagem. Não foi citado o tipo de EVOH, porém em um filme de 65 µm foi encontrado permeabilidade ao oxigênio de 8 cc/m².dia, nas mesmas condições utilizadas neste estudo. Tanto este filme mencionado quanto o filme em estudo dessa pesquisa

apresentam alta barreira a gases, aromas e sabor, o que permite proteger melhor o produto envasado e aumentar sua vida útil.

5.10 ANÁLISE DE CUSTOS

Na avaliação de custos realizada, foi considerado o custo de matéria-prima de cada processo envolvido na produção dos filmes. O custo de produção do filme em estudo foi calculado em US\$ 2,08/ Kg e do filme padrão US\$ 1,76/ Kg.

Como o cliente calcula o rendimento do filme em m², multiplicou-se o custo de produção em US\$/ Kg pela gramatura do filme em Kg/m² para se obter o custo em US\$/ m². Desta maneira o custo do filme em estudo é de US\$ 0,33/ m² e do filme padrão é de US\$ 0,30/ m².

6 CONCLUSÕES

Diante dos estudos realizados para produção de um filme à base de polietileno com o objetivo de substituir o filme padrão de PET/PE, para embalagem flexível de produtos de limpeza com alto teor de aromas e visando facilitar sua reciclagem, conclui-se que o filme proposto atende às exigências da aplicação do produto.

A extrusão do filme foi bastante estável, permitindo baixa variação de espessura dentro dos limites estabelecidos. A produção do filme com redução de espessura em 10 μm permitiu a redução da massa de material na embalagem final, sem afetar as propriedades mecânicas da embalagem. A embalagem padrão apresenta 23,54 g, enquanto a embalagem produzida com o filme em estudo, 22,18 g, uma redução de 1,36 g por embalagem produzida. Essa redução aplicada em larga escala de produção representa uma redução considerável de uso de polímeros e redução na geração, em massa, de resíduos.

O filme foi testado no cliente em uma linha de amaciantes para roupas e apresentou ótima performance de envase e foi aprovado nos testes internos do cliente. Era esperada essa boa performance de acordo com os dados obtidos em todas as análises. O filme apresentou bom deslizamento na máquina de envase comprovando sua adequada aditivação de acordo com os resultados de COF.

Foi verificado o aumento da capacidade de selagem com a utilização de plastômero, sendo possível reduzir a temperatura dos mordentes que realizam a selagem. Também foi constatado ótima qualidade de selagem e alta resistência, promovendo hermeticidade à embalagem.

Em relação as propriedades mecânicas, como visto nas análises efetuadas, a rigidez do filme atendeu ao esperado para a embalagem SUP e envase do produto, apresentando boa sustentação. Nos ensaios de resistência mecânica que o cliente realizou não foi evidenciado problemas, mesmo que em algumas análises realizadas anteriormente tenham apresentados dados um pouco inferiores em relação aos dados do filme da embalagem padrão.

Quanto à barreira aos aromas, promovida pelo EVOH, o filme em estudo apresenta excelentes propriedades em relação ao filme padrão. O filme foi produzido com apenas 3% de EVOH para atender as premissas da organização

Recyclclass que diz que uma embalagem contendo 90% ou mais de polietileno em sua estrutura e com baixo teor de EVOH, é considerada reciclável. Assim a embalagem produzida com o filme em estudo tem grande vantagem em relação a embalagem padrão que não é considerada reciclável por conter dois substratos diferentes, poliéster e polietileno. O filme em estudo apresenta em sua composição exatamente 90 % de polietileno, desconsiderando o EVOH e todos os aditivos, porém todos os aditivos (deslizante, plastificante, colorante, antibloqueante e adesivo de coextrusão) são dispersos em polietileno, o que eleva o percentual de PE na estrutura. Desconsiderando somente o EVOH, a estrutura do filme apresenta 97 % de polietileno. Agora, considerando a aplicação de 1,2 g/m² de tinta e 2,0 g/m² de verniz no filme, que representa 2,02 % dos 158,41 g/m² do filme, a embalagem contém 94,98 % de polietileno.

Outra grande vantagem da embalagem produzida com o filme em estudo é que é possível realizar o destintamento, ou seja, remover toda a camada de verniz e tinta do filme, facilitando ainda mais a reciclagem. Cada vez mais as técnicas de reciclagem estão evoluindo e atualmente algumas empresas já estão utilizando esta técnica.

Mesmo que no Brasil ainda não exista uma organização que defina critérios de reciclagem para embalagens, as empresas já estão buscando inovar suas embalagens a fim de contribuir com a sustentabilidade, tema que cada vez mais está em foco devido as mudanças climáticas que a Terra vem sofrendo nos últimos anos. Também, porque esses critérios vêm ganhando força na Europa e Estados Unidos e possivelmente em breve chegue ao Brasil. Então é importante que empresas adiantem o tema para terem poder de competitividade e porque muitas empresas exportam para países que já regulamentam a reciclagem.

Na avaliação de custos realizada, percebe-se que para cálculos de rendimento, o filme em estudo é US\$ 0,03/ m² mais caro que o filme padrão. Isso porque o custo de produção do filme em estudo é mais caro, pois o EVOH é um polímero que tem custo bastante elevado, assim como seu processamento. As extrusoras que processam o EVOH são específicas e maiores, por isso consomem mais energia elétrica. Esses valores devem ser analisados pelas empresas de acordo com seus objetivos e políticas estabelecidas em relação à sustentabilidade e a viabilidade do negócio.

Para futuros estudos, de acordo com os resultados obtidos nas análises e a performance do filme na aplicação, existe a possibilidade de reduzir a espessura do filme um pouco mais. Assim contribuiria para a redução em massa de material utilizado na produção das embalagens e reduziria o custo de produção em dólares por m², já que este valor está diretamente relacionado com a espessura/gramatura.

Pode-se também realizar o estudo de prolongamento de vida útil do produto envasado já que a barreira ao aroma é alta na estrutura estudada. Também é possível realizar a análise de reciclabilidade do filme estudado junto com a empresa *Recyclclass* a fim de ganhar a certificação para a embalagem e usá-la para *marketing* da empresa. Além disso, é possível realizar um estudo para utilizar a estrutura proposta para outras aplicações, inclusive alimentícias devido à alta barreira.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE EMBALAGENS PLÁSTICAS FLEXÍVEIS. **A escolha perfeita:** soluções flexíveis para uma indústria de embalagens mais sustentável. [s./], c2023. Disponível em: file:///C:/Users/silvi/AppData/Local/Temp/017e4202-3a3f-4aba-b469-25ad807542c0_ThePerfectFit-100dpi.zip.2c0/ThePerfectFit-100dpi.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Perfil 2022:** as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. [s./], 2023. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/09/perfil_2022_pt.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO. **Preview 2022:** as indústrias de transformação e reciclagem de plástico no Brasil. [s./], 2023. Disponível em: https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2023/04/Preview2022_web.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMBALAGEM. **Estudo ABRE macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo.** [s./], 2023. Disponível em: <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2022-2/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- BAJPAI, P. Biobased polymers: properties and applications in packaging. Amsterdam: **Elsevier**, 2019.
- BARÃO, M. Z. **Embalagens para produtos alimentícios.** Paraná: TECPAR, 2011. Disponível em: <http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/NTY0MQ==>. Acesso em: 05 out. 2023.
- CALLISTER JUNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CAMILO, A. N. *et al.* **Embalagens plásticas:** embalagem melhor, mundo melhor. Barueri: Instituto de embalagens, 2019.
- CANAIS, J. M. **Avaliação de um filme plástico à base de poliolefinas com barreira de EVOH como material de embalagem para um produto lácteo.** 2022. Relatório (Mestrado em Biotecnologia e Inovação Alimentar) – Escola Superior de Biotecnologia da Universidade Católica Portuguesa, Porto, Portugal, 2022.
- CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros.** 2 ed. São Paulo: Artliber, 2006.
- CANTOR, K. **Blow film extrusion.** 3th ed. Ohio: Hanser, 2019.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. Rio de Janeiro: **UERJ**, 2003. p. 1 - 13 Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/po/a/vzPmcF9tLYGRPvK67CnWj9S/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 05 jan. 2024.

DA ROSA, P. A.; CAMPOS, D. P. **Desenvolvimento de embalagem pouch monomaterial utilizando politereftalato de etileno – PCR**. [s./], 2021. Centro Universitário UNISATC. Disponível em:

<https://177.54.50.204/bitstream/satc/672/2/Paloma%20Alessandra%20da%20Rosa.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

DOW CHEMICAL COMPANY. **Affinity polyolefin plastomer sealants**. [s./],

2015. Disponível em: <https://www.dow.com/en-us/document-viewer.html?randomVar=4269273352561458497&docPath=/content/dam/dcc/documents/768/768-32621-01-affinity-polyolefin-plastomer-sealants-packaging-solutions-selection-guide.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

ELIAS, M. B. **Desempenho de filmes soprados multicamadas de blendas de polipropileno e copolímero de etileno**. 2011. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011. Disponível em:

<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/697/4608.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 12 out. 2023.

FERREIRA, E. H. C.; FECHINE, G. J. M. **Física dos polietilenos: uma abordagem baseada na microestrutura e nas propriedades mecânicas**. São Paulo: Mackenzie, 2021.

FERREIRA, R. L. R. **Estudo da influência da razão de sopro na estrutura e propriedades de filmes de polietileno produzidos pelo processo de extrusão tubular**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/70923>. Acesso em: 11 out. 2023.

FERREIRA, R. L. R.; SANTANA, R. M. C. Estudo comparativo da influência da razão de sopro nas propriedades de filmes tubulares de PEBD e PEAD. **SciELO**, São Paulo, p. 83 – 93, fev. 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/po/a/Lkqxxs3hMr7q4GYpGJGkNYB/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 11 out. 2023.

GARBIN, F. Q.; DITOMASO, R.; BEUTER JUNIOR, N. Reciclagem do plástico: o caminho para a implementação da economia circular – reeducação do setor produtivo e dos hábitos de consumo. **Cepal**, [s./], p. 3 – 14, 2020. Disponível em:

[https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso16-](https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso16-ReciclagemPlasticoEconomiaCircular.pdf)

[ReciclagemPlasticoEconomiaCircular.pdf](https://archivo.cepal.org/pdfs/bigpushambiental/Caso16-ReciclagemPlasticoEconomiaCircular.pdf). Acesso em: 25 nov. 2023.

GAVARA, R. *et al.* Use of EVOH for food packaging applications. **Digital CSIC**, Madri, 2013. p. 1 - 13. Disponível em: <https://digital.csic.es/bitstream/10261/147357/1/Ref%20Module-EVOH-2017.pdf>. Acesso em: 16 out. 2023.

GONÇALVES, A. P. **Desafios para redução das embalagens plásticas de alimentos pós-consumo nos rejeitos da coleta seletiva: um estudo de caso em uma cooperativa no município de Assis – SP.** 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-20062022-104036/publico/DissertacaoAnaPaulaGoncalvesVersaoCorrigida.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

KURARAY AMERICA. **EVOH barrier resins and film.** Houston, EUA, c2023. Disponível em: <https://eval.kuraray.com/wp-content/uploads/2020/12/EVAL-EVOH-barrier-resins-and-film.pdf>. Acesso em: 11 out. 2023.

LEMOS, A. B. **Estudo de migração da benzofenona utilizada em tintas de impressão curáveis por radiação UV destinadas para embalagens de alimentos.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/966008>. Acesso em: 22 nov. 2023.

MACIEL, J. P.; BUENO, A. B.; MORAES, C. A. M. Análise de resíduos sólidos classificados como rejeitos em quatro unidades de triagem no RS: embalagens poliméricas. **GESTA**. [s./], p. 122 – 136, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/55326/31091>. Acesso em: 27 nov. 2023.

MAES, C. *et al.* Recent updates on the barrier properties of ethylene vinyl alcohol copolymer (EVOH): a review. **Polymer Reviews**, v.58, n.2, p. 209 – 246, 2018. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/15583724.2017.1394323?needAccess=true>. Acesso em: 05 jan. 2024.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros.** 2 ed. São Paulo: Edgard Bluncher, 2004.

MOKWENA, K. K.; TANG, J. Ethylene vinyl alcohol: a review of barrier properties for packaging shelf stable foods. **PubMed**, Washington. p. 640 – 650, July. 2012. Disponível em: <http://microwaveheating.wsu.edu/publications/EVA%20review.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

NIAOUNAKIS, M. **Recycling of flexible plastic packaging.** Amsterdam: Elsevier, 2019.

RABELLO, M. **Aditivação de polímeros.** São Paulo: Artliber, 2000.

RAMOS, A. F. F.; RIBEIRO, F. M. Circularidade das embalagens flexíveis para alimentos: principais desafios e perspectivas. **Sustentabilidade: Diálogos Interdisciplinares**, v.4, 2023. Disponível em: <https://periodicos.puc-campinas.edu.br/sustentabilidade/article/view/7118/8089>. Acesso em: 26 nov. 2023.

RECYCLASS. **Design for recycling guidelines**. Bruxelas, 2023. Disponível em: <https://recyclclass.eu/recyclability/design-for-recycling-guidelines/>. Acesso em: 14 out. 2023.

SAITO, A. Y. **Ensaio e análise comparativa das propriedades mecânicas de materiais poliméricos voltados à indústria de embalagens flexíveis**. 2021. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/27156/1/ensaioanalisecomparativapropriedades.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2023.

SANTANA, J. G. **Processamento e caracterização de filmes flexíveis e nanocompósitos de EVOH/GO tratados por radiação ionizante**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2019. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-29032019-145257/publico/2019SantanaProcessamento.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

SARANTOPOULOS, C. I. G. L.; TEIXEIRA, F. G. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. 2 ed. Campinas: ITAL/CETEA, 2017.

SELKE, S. E. M.; HERNANDEZ, R. J. Reference module in materials Science and materials engineering. Amsterdam: **Elsevier**, 2016. p. 1 - 7

WAGNER, J. R.; MOUNT, E. M.; GILES, H. F. Extrusion: the definitive processing guide and handbook. 2nd ed. Oxford: **Elsevier**, 2014. Disponível em: <https://books.google.com.gt/books?id=noW5lmeBePMC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 11 out. 2023.