



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

KEILA ANDRIONI

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES
DE POLIETILENO EXTRUSADOS E COEXTRUSADOS**

FLORIANÓPOLIS
2023

KEILA ANDRIONI

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES
DE POLIETILENO EXTRUSADOS E COEXTRUSADOS**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Barra

FLORIANÓPOLIS

2023

Andrioni, Keila

ESTUDOCOMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES DE
POLIETILENO EXTRUSADOSECO-EXTRUSADOS / Keila Andrioni ;
orientador, Guilherme M. O. Barra, 2023.

55 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em
Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Filmes flexíveis. 3. Filmes de
polietileno . 4. extrusão. 5. coextrusão. I. M. O. Barra,
Guilherme . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação
em Engenharia de Materiais. III. Título.

KEILA ANDRIONI

**ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE FILMES
DE POLIETILENO EXTRUSADOS E COEXTRUSADOS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira de Materiais” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Materiais

Florianópolis, 24 de Julho de 2023.

Prof. Cristiano Binder, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.(a) Guilherme Barra, Dr.(a)
Orientador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Daiane Mazzon
Avaliador(a)
Unibave

Dra. Mayara Cristina Bertilini
Avaliador(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Graduação em Engenharia de Materiais, pelo suporte concedido para realização do trabalho, pelas oportunidades e experiências que me proporcionou durante toda a minha graduação.

Ao Prof. Dr. Guilherme Mariz de Oliveira Barra pela, orientação, paciência, disponibilidade e acompanhamento não só na elaboração deste trabalho de conclusão de curso, como em outras etapas importantes da graduação.

À empresa parceira fabricante de embalagens flexíveis pela disponibilização dos materiais de estudo e do laboratório onde foram desenvolvidos todos os ensaios.

Aos membros da banca avaliadora, pela disponibilidade.

À Morgana Bon, gestora de engenharia do produto, pelo auxílio na escolha do tema deste trabalho e pelo compartilhamento de experiência que possui nesta área.

Ao Joel Vaz, coordenador de extrusão, e aos demais integrantes desse setor, por tirarem minhas dúvidas sobre o processo e por compartilharem seu conhecimento prático sempre que solicitados.

À Maraglay Heidemann Schlickmann, coordenadora do controle de qualidade, setor o qual faço parte, pela compreensão e disponibilização do meu tempo à dedicação deste trabalho.

À equipe do laboratório de controle da qualidade, minhas colegas, em especial à Luciana Soethe, Nadiane Bruna Bloe, Raquel Fidêncio e Alice de Souza pela paciência e por me ensinarem a realizar os ensaios mecânicos, desde a preparação dos corpos de prova até a extração dos resultados.

À Karine Luciano, pelo compartilhamento de experiência, pelas conversas que me tranquilizaram em relação ao TCC e pela disponibilização de bibliografias utilizadas neste estudo.

À minha amiga Thaísy Coral de Borba, pelo companheirismo durante os longos seis anos de graduação, por ser minha família enquanto estive longe da minha, por compartilhar os melhores e os piores momentos.

Ao meu namorado Marcus Vinícios Cruz de Souza, pelo incentivo em relação à finalização desta etapa e pela motivação em melhorar cada dia.

Aos meus pais, minha vó e meus irmãos, por serem base e me apoiarem quando eu precisei, mas principalmente por sempre me darem autonomia nas minhas escolhas.

À todos os amigos, colegas e familiares que me apoiam de alguma forma ao longo dos seis anos de graduação.

RESUMO

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo sobre as propriedades mecânicas de filmes flexíveis de polietileno (PE) obtidos por extrusão monocamada e por coextrusão. A indústria de embalagens flexíveis evolui com o passar dos anos, juntamente com suas tecnologias. Nesse contexto, uma empresa de embalagens flexíveis de Santa Catarina trabalha atualmente com processo de extrusão monocamada e multicamada, sendo que as últimas aquisições de equipamentos formam máquinas do tipo coextrusora, visto que estas prometem maior flexibilidade na distribuição de matéria-prima entre as camadas e menor custo de produção. É muito importante que o produto final ofereça resistência mecânica (resistência à tração, resistência ao rasgo, deformação, resistência à perfuração), que são propriedades necessárias para que a embalagem cumpra sua função. Com a migração de parte da produção de extrusão para coextrusão, é fundamental que, sobretudo, os filmes mantenham ou melhorem suas propriedades. Com base neste contexto, este trabalho teve como objetivo entender e comparar as propriedades mecânicas oferecidas pelos diferentes modelos de extrusão. Este entendimento pode comprovar a qualidade dos produtos obtidos pelo novo modelo de máquina, auxiliar na escolha de programação de produção, diminuir a quantidade de testes e até direcionar aquisições futuras. Verificou-se através de ensaios mecânicos que os filmes coextrusados multicamadas ofereceram propriedades mecânicas equiparadas e/ou melhores que os extrusados, com a vantagem da redução de custo e a facilidade de dimensionamentos de matérias-primas, catalisadores e aditivos.

Palavras-chave: Extrusão, Coextrusão, Embalagens flexíveis, Propriedades mecânicas, Polietileno.

ABSTRACT

In this work, a comparative study was carried out on the mechanical properties of flexible polyethylene (PE) films obtained by monolayer extrusion and by co-extrusion. The flexible packaging industry evolves over the years, along with its technologies. In this context, a flexible packaging company in Santa Catarina currently works with monolayer and multilayer extrusion process, and the latest equipment acquisitions form coextruder type machines, as these promise greater flexibility in the distribution of raw material between layers and lower production cost. It is very important that the final product offers mechanical strength (tensile strength, tear strength, elongation, puncture resistance), which are necessary properties for the packaging to fulfill its function. With the migration of part of the production from extrusion to coextrusion, it is essential that, above all, the films maintain or improve their properties. Based on this context, this work aimed to understand and compare the mechanical properties offered by different extrusion models. This understanding can prove the quality of the products obtained by the new machine model, assist in the choice of production schedule, reduce the amount of tests and even direct future acquisitions. It was verified through mechanical tests that the multilayer coextruded films offered mechanical properties equivalent and/or better than the extruded ones, with the advantage of cost reduction and ease of sizing of raw materials, catalysts and additives.

Keywords: Extrusion, Coextrusion, Flexible packaging, Mechanical properties, Polyethylene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes básicos de uma extrusora convencional	20
Figura 2 - Esquema do processo de extrusão tubular de filmes	21
Figura 3 - Esquema de matriz de filme soprado de cinco camadas	24
Figura 4 - Fotografia de máquina coextrusora de cinco roscas	24
Figura 5 - Esquema de balão de extrusão	25
Figura 6 - Balões de extrusão com diferentes RIs	26
Figura 7 - Esquema da reação de polimerização do etileno	27
Figura 8 - Diferentes tipos de cadeia de polietilenos	29
Figura 9 - a) Distribuição de comonômero nas cadeias de PELBD e b) Distribuição de peso molecular	34
Figura 10 - Ensaio de resistência à tração	39
Figura 11 - Ensaio de resistência à perfuração	40
Figura 12 - Esquema do corpo de prova para ensaio resistência à propagação do rasgo	41
Figura 13 - EMIC em ensaio de rasgamento	42
Figura 14 - Curva tensão versus deformação de um material polimérico e o alinhamento das cadeias poliméricas durante a aplicação de tensão de tração	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resistência à tração	44
Gráfico 2 - Força versus deformação MONO 1019 (RI 1.9) em sentido DM	46
Gráfico 3 - Força versus deformação MONO 1019 (RI 1.9) em sentido DT	46
Gráfico 4 - Deformação na ruptura	47
Gráfico 5 - Módulo 1%	48
Gráfico 6 - Módulo 10%	49
Gráfico 7 - Resistência à propagação do rasgo	50
Gráfico 8 - Resistência à perfuração	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Mercado de embalagens por material (2016).....	18
Tabela 2 - Comparação entre as principais propriedades do PEAD, PEBD e PELBD.....	29
Tabela 3 - Distribuição de componentes no filme	36
Tabela 4 - Parâmetros de processo.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ASTM - American Society for Testing and Materials
atm - Atmosferas
C - Carbono
°C - Graus Celsius
cm - centímetros
COF - Coeficiente de Fricção (ou de Atrito)
COEX - Coextrusado/ Coextrusão
D - Diâmetro do balão de extrusão
d - Diâmetro da matriz de extrusão
DM - Direção máquina (direção longitudinal)
DT - DT (Direção transversal)
EMIC - Equipamento Universal de Ensaios Mecânicos
EVOH - Polietileno-co-álcool vinílico
FFs - Form, Fill & seal-Film
H - Hidrogênio
h - Horas
kg - Quilograma
kgf- Quilograma-força
L - Largura do filme extrusado
mm - Milímetro
MONO - Uma camada
MPa - Megapascal
mPE - Polietileno Linear de Baixa Densidade obtido por catalisador Metaloceno
N - Newton
PE - Polietileno
PEAD - Polietileno de Alta Densidade
PEBD - Polietileno de Baixa Densidade
PEDBL - Polietileno de Baixa Densidade Linear
PA - Poliamida
PET - Politereftalato de etileno

PVDC - Policloreto de vinilideno

RI - Razão de Insuflamento

Rf - Raio final do filme soprado

Ro - Raio inicial do filme

OP - Ordem de Produção

Tf - Temperatura de fusão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.2 OBJETIVO GERAL	14
1.2.1 Objetivos específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 EMBALAGENS FLEXÍVEIS	16
2.2 PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE FILMES FLEXÍVEIS	19
2.2.1 Extrusão	19
2.2.2 Coextrusão	21
2.2.3 Parâmetro de processamento: Razão de Insuflamento	25
2.3 POLIETILENO (PE)	27
2.3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)	29
2.3.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)	31
2.3.3 Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD)	32
2.3.3.1 Polietileno Linear de Baixa Densidade obtido por catalisador Metaloceno (mPE)	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 MATERIAIS DE ESTUDO	35
3.2 ENSAIOS	37
3.2.1 Propriedades de Tração	37
3.2.1.1 Resistência Máxima à Tração e Alongamento na Ruptura	38
3.2.1.2 Módulo Secante	39
3.2.2 Resistência à Perfuração	40
3.2.3 Resistência à Propagação do Rasgo	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

As principais matérias-primas utilizadas para a indústria de embalagem são polímeros, metais, papel e vidro. As embalagens podem ser classificadas como rígidas, semirrígidas e flexíveis. Dentre as categorias de embalagens citadas anteriormente, as flexíveis se destacam e vêm crescendo em produção na última década. De acordo com publicação da Datamark, a grande parte das embalagens flexíveis são destinadas à indústria alimentícia, responsável pela utilização de mais de 80% do total de embalagens produzidas dessa classe (DATAMARK, 2017).

Tanto a indústria como também os centros de pesquisa estão constantemente realizando estudos para a melhoria das propriedades dos materiais flexíveis, seja na otimização de suas formulações de materiais ou de seus processos de transformação (SARANTOPOLOS, 2017). A base para a produção das embalagens flexíveis são os filmes de materiais poliméricos. Diante das opções, atualmente os processos mais utilizados para a obtenção dos filmes poliméricos são a extrusão e a coextrusão. Ambos os processos são realizados em máquina extrusora com matriz tubular, mas o que os diferencia, principalmente, é que no processo de coextrusão, cada material é plastificado numa extrusora específica, ou seja, possui mais que uma extrusora para a mesma matriz.

Segundo pesquisas, a coextrusão é uma alternativa para obtenção de um produto formado por multicamadas com menor custo de produção em termos de matéria-prima. Pelo fato de ser capaz de produzir filmes multicamadas, cada matéria-prima pode ser distribuída na camada de acordo com as propriedades exigidas pela aplicação. A técnica permite otimizar as propriedades dos polímeros de maior custo, reduzindo a quantidade necessária para conferir propriedades específicas, em comparação com um filme monocamada em que os componentes estão misturados. (CRIPPA, 2006 apud MARTÍNEZ e ARROYO, 1998).

Diante do exposto, o presente trabalho surgiu com o intuito de realizar uma análise comparativa das propriedades mecânicas de filmes de polietileno extrusados e coextrusados. O estudo foi desenvolvido com o apoio de uma empresa fabricante de embalagens flexíveis para *petfood*, localizada no Estado de Santa Catarina. A empresa em questão possui máquinas extrusoras tanto do tipo monocamada como

multicamadas, sendo que as coextrusoras de cinco camadas são aquisições mais recentes. A verificação das propriedades mecânicas dos filmes produzidos em ambos os processos é relevante para avaliar a manutenção da qualidade dos filmes produzidos, podendo o estudo ser utilizado para possíveis tomadas de decisões, tratando-se de investimentos futuros em maquinário de conversão.

Um dos principais polímeros utilizados como matéria-prima de embalagens flexíveis é o polietileno. Isso se deve às suas propriedades mecânicas, capacidade de soldagem a quente e sua função de barreira. Essas são algumas das propriedades que aliadas com seu baixo custo (inclusive um dos menores entre as resinas para embalagem), fazem com que o PE seja um dos materiais mais populares para este segmento (TWEDE; GODDARD, 2009).

Com base nesse contexto, esta pesquisa utilizou o polietileno, como matéria-prima para a produção de filmes de camada única (monocamada) e multicamadas obtidos pela extrusão e coextrusão, respectivamente. As propriedades mecânicas dos filmes, como por exemplo, deformação na ruptura, módulo de elasticidade, resistência à propagação do rasgo e resistência à perfuração são muito importantes para simular esforços durante o processo de fabricação do produto (impressão, laminação, corte e solda). O conhecimento dessas propriedades são importantes para reproduzir situações as quais a embalagem (produto final) poderá ser exposta em seu manuseio. Assim, a pesquisa foi conduzida de maneira a avaliar as propriedades mecânicas dos filmes produzidos na empresa.

Adiante serão abordados tópicos relacionados às embalagens flexíveis, com ênfase nos principais polietilenos utilizados como matéria-prima. Além disso, o estudo trará informações relativas aos processos de extrusão e coextrusão, considerando os equipamentos, características e peculiaridades. Ademais, também serão expostas e contextualizadas as metodologias de ensaios mecânicos utilizados para a verificação das propriedades mecânicas dos filmes.

1.2 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa das propriedades mecânicas de filmes de polietileno extrusados e coextrusados em uma indústria de embalagens flexíveis.

1.2.1 Objetivos específicos

- Avaliar as propriedades do polietileno como matéria prima para filmes flexíveis;
- Comparar, utilizando ensaios mecânicos, as propriedades dos filmes flexíveis de polietileno.
- Identificar os fatores que podem contribuir para as propriedades mecânicas dos filmes de polietileno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EMBALAGENS FLEXÍVEIS

Devido à necessidade da humanidade de acondicionar, transportar e conservar alimentos, surgiram as primeiras embalagens. Diferente de como essas são atualmente, elas eram fabricadas totalmente com matérias-primas oriundas da natureza, como troncos de árvore, palha e vasos de cerâmica. (SANTOS; YOSHIDA, 2011).

A evolução das embalagens acontece juntamente com a evolução da humanidade. Alguns momentos importantes da história podem ser considerados início do desenvolvimento de embalagens, com o objetivo de manter os alimentos frescos ou conservados por longos períodos. As navegações marítimas, a luta por conquistar novos territórios, a Revolução Francesa e a Primeira Guerra Mundial são alguns exemplos desses eventos. (SANTOS; YOSHIDA, 2011.)

Em comparação com os dias de hoje, muito se evoluiu em termos de estruturas, formatos, matérias-primas, tecnologias e processos de fabricação das embalagens. Concomitantemente, as exigências e o nível de exigência dos clientes e consumidores finais também aumentaram. Sendo assim, é necessário que o produto atenda uma série de requisitos, como propriedades físicas e químicas, qualidade, usabilidade, estética, preço acessível e sustentabilidade.

O termo embalagem flexível é utilizado para nomear embalagens que normalmente são compostas por filmes flexíveis (com espessura na faixa de 250 μm ou inferior a isso). Elas possuem a característica de serem conformáveis e seu formato depende da forma física do produto que é acondicionado em seu interior. A relação otimizada entre a massa da embalagem e o volume de produto que pode ser envasado, além da versatilidade de dimensionamento de suas propriedades, são pontos pelos quais os materiais flexíveis se destacam. (SARANTOPOULOS et al., 2017).

Essa categoria de embalagens permite diferentes combinações de polímeros, revestimentos e materiais, e ainda pode apresentar variados tamanhos e formatos, de forma que facilita a customização. Dentre os tipos de embalagens flexíveis, estão

os sacos e sacarias com duas ou três soldas, *pouches* de quatro soldas, *pouches* autossustentáveis (*stand up pouches*), fundos termoformáveis que se adequam ao formato do produto, filmes encolhíveis (*shrink*), filmes esticáveis para envolver bandejas ou contenção de carga de paletização, sacos de rafia, entre outros. (SARANTOPOULOS et al., 2017).

As embalagens podem ser classificadas como rígidas, semirrígidas e flexíveis e suas matérias-primas variam de acordo com as propriedades dos produtos a serem contidos e com a viabilidade de utilização e produção. As principais matérias-primas utilizadas para a indústria de embalagem são metais (alumínio, folhas de flandres, aço), papel (caixas de papelão, kraft/papel monolúcido, duplex/triplex), vidro e plásticos. (DATAMARK, 2017). Dentre as categorias de embalagens citadas anteriormente, as flexíveis se destacam e vêm crescendo em produção na última década. Conforme pode-se observar na Tabela 1, a grande parte das embalagens flexíveis são destinadas à indústria alimentícia, responsável pela utilização de mais de 80% do total de embalagens produzidas dessa classe.

Tabela 1 - Mercado de embalagens por material (2016)

ALIMENTÍCIO				NÃO ALIMENTÍCIO		
	ton 10 ³	%	US\$ 10 ⁶	ton 10 ³	%	US\$ 10 ⁶
FLEXÍVEIS	629.43	82.38	8016.75	134.63	17.62	1838.58
METAIS						
Alumínio	435.56	92.79	3599.87	33.87	7.21	279.89
Folha de flandres	370.87	67.13	1032.26	181.60	32.87	505.45
Aço	9.09	3.06	18.65	287.80	96.94	590.37
PAPEL						
Kraft / Papel monolúcido	198.54	45.18	578.47	240.88	54.82	737.50
Duplex / triplex	207.73	35.38	448.27	379.38	64.62	818.67
Caixas de papelão	2264.76	68.51	2951.10	1040.74	31.49	1356.14
PLÁSTICOS						
	1594.43	69.64	7041.66	695.08	30.36	2749.38
VIDRO						
	1361.59	90.55	1264.52	142.09	9.45	131.96
TOTAL	7072.01	69.28	24951.56	3136.05	30.72	9007.93

Fonte: Adaptado de DATAMARK, 2017.

Para que o alimento mantenha-se em bom estado de conservação e chegue em condições de uso ao consumidor, é imprescindível que a embalagem atenda alguns requisitos, como: propriedades de barreira (capacidade de resistir à absorção ou à evaporação de gases e vapores, resistir à permeação de lipídios e à passagem de luz), resistência química (em função de cada polímero e do contato deste material com o agente químico, esteja ele presente no produto embalado, no processamento ou no ambiente em que o produto é mantido), resistência mecânica (estão associadas ao desempenho mecânico dos materiais nos equipamentos de conversão, nas máquinas de acondicionamento e frente às inúmeras solicitações dos ambientes de estocagem e distribuição) (JORGE, 2013).

A indústria e os centros de pesquisa estão constantemente se esforçando

para melhorar as propriedades dos materiais flexíveis, tanto na otimização de suas fórmulas quanto nos processos de transformação (extrusão, coextrusão e biorientação) e de conversão (impressão, revestimento e laminação). Dadas variadas possibilidades, entende-se que é possível produzir embalagens flexíveis específicas para cada aplicação levando em conta o nível de proteção exigido pelo produto, o desempenho esperado na máquina de acondicionamento e a resistência necessária às solicitações. (SARANTOPOLOS, 2017).

2.2 PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DE FILMES FLEXÍVEIS

Os filmes flexíveis são produzidos a partir do processo de extrusão e coextrusão do tipo tubular.

2.2.1 Extrusão

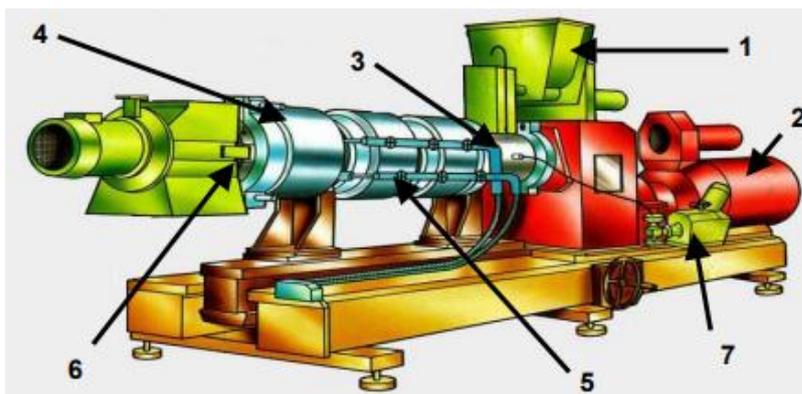
O processo de extrusão pode ser de matriz tubular para obtenção de filmes flexíveis (espessura na ordem de micrometros) e de matriz plana para a obtenção de filmes (com espessura na ordem de milímetros) e chapas para transformação posterior. O polímero é a matéria-prima utilizada e é fornecido em formato de grânulos chamados *pellets*. (JORGE, 2013). Os *pellets* são carregados em um funil de alimentação e direcionados por gravidade em um barril (cilindro) aquecido que possui uma rosca de geometria complexa, cujo formato depende das características do polímero a ser processado. É a rosca que conduz o material pelo barril, onde é aquecido acima do ponto de fusão do polímero, e é ali que os grânulos de plástico são derretidos. (MCKEEN, 2011).

Normalmente, é definido um perfil de aquecimento para o cilindro, que aumenta gradualmente a sua temperatura. Isso permite que os grânulos de plástico se derretam gradualmente à medida que são empurrados pelo barril. O aumento gradual da temperatura também é importante para reduzir superaquecimento que pode causar degradação térmica no polímero. Na saída do barril, o polímero fundido entra na matriz. A matriz confere a forma do produto, sendo projetada para que o

polímero fundido flua uniformemente (MCKEEN, 2011). A Figura 1 ilustra os componentes de uma extrusora convencional.

Figura 1 - Componentes básicos de uma extrusora convencional

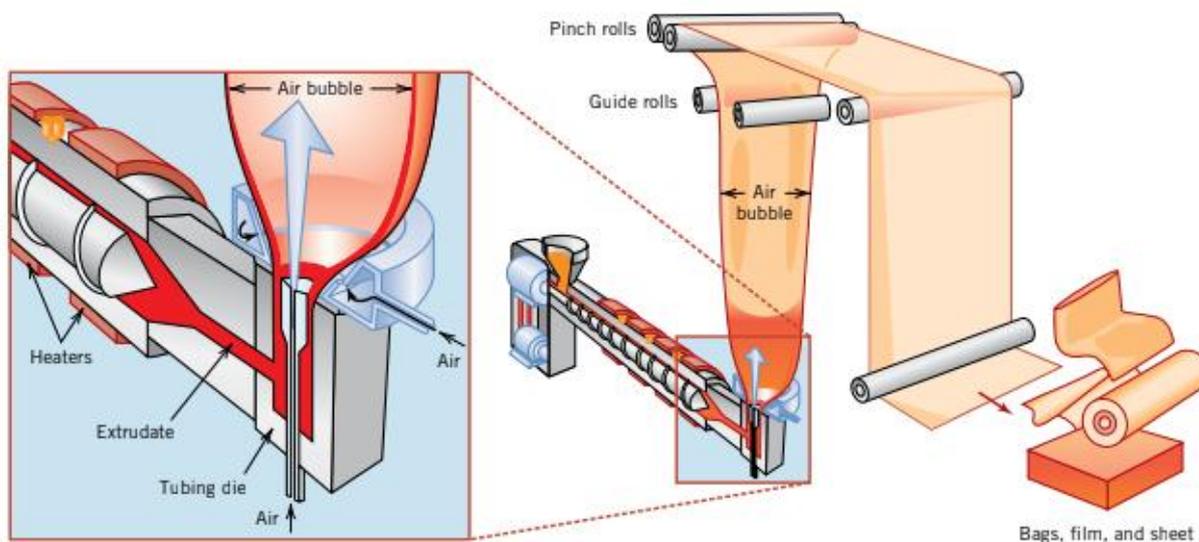
1- Funil de alimentação; 2- Motor de acionamento; 3- Barril da extrusora; 4- elementos de aquecimento do barril; 5- sistema de resfriamento; 6- matriz extrusora; 7-Bomba de água.



Fonte: Vignol, 2005.

Tratando-se do processo de fabricação de filmes flexíveis, a máquina extrusora possui uma matriz em forma circular e no seu centro está instalado um acessório que empurra ar com alta pressão para cima em direção vertical, artifício este usado para expandir ainda mais o filme. O anel de extrusão (matriz circular) e a pressão interna formam o chamado balão. Depois de expandido para as dimensões desejadas, o material passa então por rolos que o prensam formando uma única camada. Essa etapa é crucial pois ela define a espessura e largura do filme de acordo com a pressão de ar emitida no balão. Com a passagem pela sequência de rolos, o filme é resfriado com o objetivo de solidificar o polímero. Depois que o filme esfria, ele pode ser tratado, cortado na largura desejada e enrolado. A espessura do filme extrudado geralmente é mais espessa nas bordas (MCKEEN, 2011; MENDONÇA, 2019). Um esquema do processo de filme soprado é mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Esquema do processo de extrusão tubular de filmes



Fonte: Callister, 2014.

2.2.2 Coextrusão

O processo de coextrusão se assemelha ao de extrusão, entretanto na coextrusão cada material é plastificado numa extrusora específica, ou seja, possui mais que uma extrusora para a mesma matriz. Cada extrusora homogeneiza e plastifica a matéria-prima em condições distintas de trabalho e o introduz em um único cabeçote que receberá também os materiais vindos de todas as outras extrusoras. Depois de passar pelo cabeçote, os materiais saem juntos da matriz em multicamadas, sendo que cada extrusora prepara uma das camadas. Este processo aumenta bastante a capacidade dos filmes plásticos, pois possibilita a combinação das propriedades de vários polímeros em uma mesma estrutura (JORGE, 2013).

A coextrusão pode ser definida como a combinação de duas ou mais camadas de polímeros fundidos, que formam um único filme e atendem às necessidades específicas de desempenho para uma determinada aplicação. Inicialmente, este processo desenvolveu-se em pequenas áreas de mercado, como por exemplo a de filmes com barreira ao oxigênio, utilizando resinas de poliamida,

revestidas com polietileno para se obter características de termoselagem. Assim, com apenas um processamento, foi possível substituir o processo de laminação de filmes de polietileno com folha de alumínio ou com outros materiais de barreira, obtendo um menor custo (CRIPPA, 2006 apud MARTÍNEZ e ARROYO, 1998).

As estruturas multicamadas foram desenvolvidas para combinar as propriedades de diversos materiais, em uma única estrutura, nos casos em que não tenham disponíveis um único material que forneça o desempenho requerido. Na mesma linha de raciocínio citada acima, segue mais um exemplo e justificativa de utilização de coextrusão: O PE (Polietileno) possui baixo custo e oferece barreira à umidade, no entanto é permeável ao oxigênio e pode sofrer elevadas deformações sob tensões elevadas. Já o poli(tereftalato de etileno) (PET) é mais rígido e oferece maior barreira ao oxigênio, em contrapartida, seu custo é maior e apresenta dificuldade de soldagem. Se unidos por laminação ou coextrusão, pode-se obter filmes multicamadas com propriedades que atendam a aplicação requerida a um baixo custo (TWEDE; GODDARD, 2009).

De forma geral, as camadas podem ser classificadas em:

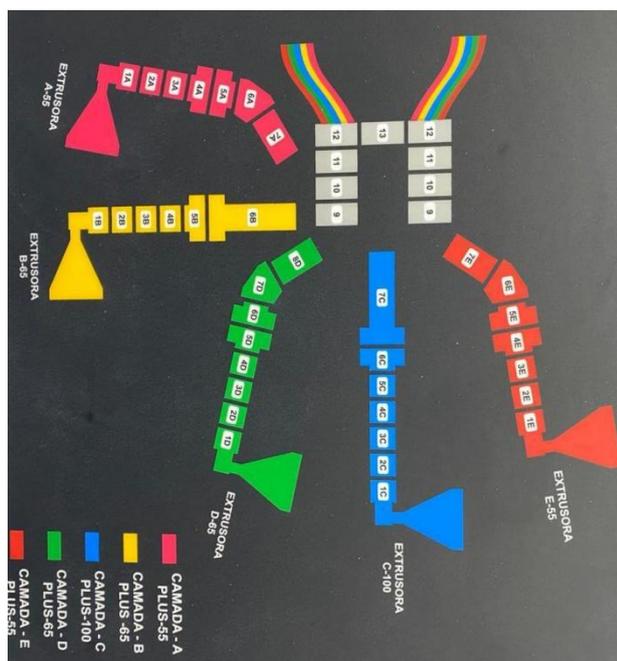
- **Camadas de acabamento:** geralmente se localizam na extremidade do filme e devem proporcionar características como capacidade de impressão, capacidade de soldagem ou de aderência de adesivo, além de brilho ou transparência, por exemplo;
- **Camadas de estrutura:** estas são responsáveis pelas propriedades mecânicas do produto, como resistência ao impacto, resistência à tração, além de características particulares, como, por exemplo, capacidade de encolhimento, no caso de filmes encolhíveis que se moldam no formato do produto;
- **Camadas de barreira:** nestas camadas são utilizados materiais que minimizam a permeabilidade à umidade e gases, principalmente ao oxigênio e gás carbônico ou até à gordura. Os principais materiais empregados para essa função são o EVOH [poli(etileno-co-álcool vinílico)], PA [poliamida], PET [poli(tereftalato de etileno)] e PVDC [poli(cloreto de vinilideno)];
- **Camadas de adesão:** devido a incompatibilidade dos materiais usados nas camadas, utiliza-se entre os materiais uma camada de material com excelente adesão em ambos, isso evita delaminação do filme (OTTERBACH, 2011).

Em muitos casos, os filmes coextrudados apresentam camadas que desempenham mais de uma destas funções devido às propriedades dos materiais que as compõem. Cada camada pode ser formada por um homopolímero (apenas um tipo de mero na cadeia principal), um copolímero (diferentes meros) ou até mesmo uma blenda (mistura física de dois ou mais polímeros) (OTTERBACH, 2011).

Economicamente, a coextrusão é uma das soluções para a obtenção de um produto multifuncional produzidos com menor custo. A técnica permite otimizar as propriedades dos polímeros de maior custo, reduzindo a quantidade necessária para conferir propriedades específicas como a de selagem, aderência, rigidez, resistência ao impacto, rasgo, perfuração, brilho, entre outras, em comparação à um filme monocamada, em que os componentes estão misturados (CRIPPA, 2006 apud MARTÍNEZ e ARROYO, 1998). Por exemplo, a coextrusão permite a produção de um filme multicamada na qual na camada externa seja incorporado um aditivo para reduzir o coeficiente de atrito (COF), não havendo a necessidade de “desperdício” desses componentes em outras camadas. Estão disponíveis no mercado coextrusoras de 3 a 11 camadas. As máquinas com produção de 3 a 5 camadas são indicadas para a fabricação de filmes de alta transparência para stand-up pouches, embalagens twist-wrap, empacotamento automático; filmes para posterior laminação, revestimento, impressão e outros processos de conversão; filmes termoencolhíveis (shrink) e do tipo stretch; filmes para sacolas promocionais, camisetas, sacos de lixo e outras. Além de filmes para embalagem do tipo serviço pesado, adequados ao sistema FFs (Form, Fill & seal-Film), que são filmes tubulares sanfonados para linhas com empacotamento automático (CARNEVALLI, 2016).

Por outro lado, o segmento de extrusoras que oferecem de 7 a 11 camadas são mais indicadas para aplicações em: filmes de alta barreira para embalagem de leite, carne, peixe e outros alimentos; filmes de alta barreira para embalagens especiais de produtos químicos diversos como tintas, vernizes, detergentes e outros; filmes de alta barreira para embalagem de produtos biológicos e de uso em medicina e até em filmes de polietileno com propriedades que permitem uma diminuição da espessura total (CARNEVALLI, 2016). A Figura 3 ilustra um esquema de uma matriz de filme soprado de cinco camadas. A Figura 4 mostra uma fotografia de uma máquina coextrusora também de cinco camadas.

Figura 3 - Esquema de matriz de filme soprado de cinco camadas



Fonte: Adaptado de Carnevalli, 2016.

Figura 4 - Fotografia de máquina coextrusora de cinco extrusoras



Fonte: Da Autora, 2023.

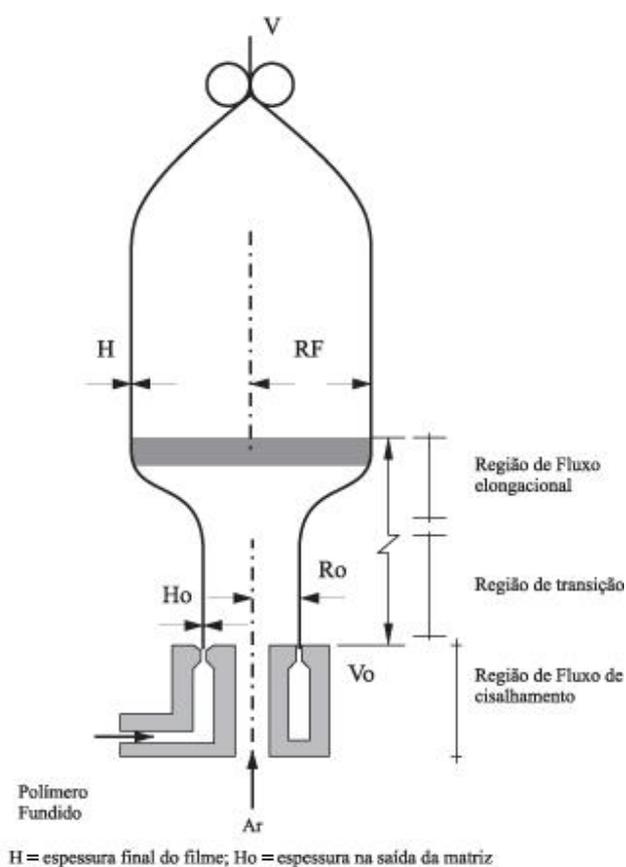
Diante do que foi exposto, entende-se que as razões para a utilização da coextrusão são muitas, elas englobam a obtenção de propriedades específicas de desempenho (propriedades de barreira, alta resistência e selabilidade); redução de custos, uma vez que é possível reduzir a quantidade de polímeros caros e alocar polímeros baratos em camadas em que não há necessidade de materiais com alto

valor; redução do número de etapas de processo, pelo fato de que elimina algumas etapas de laminação e reduz custo de adesivo. Além do mais, a coextrusão também pode contribuir na redução do desperdício, sendo que em alguns casos permite até a utilização de material reciclado em algumas camadas (MARTINS, s.d).

2.2.3 Parâmetro de processamento: Razão de Insuflamento

Um dos parâmetros mais importantes para processos de extrusão e coextrusão é a razão de sopro ou razão de insuflamento, também denominada de BUR = R_f/R_o , onde R_f = raio final do filme soprado, R_o = raio inicial do filme (FERREIRA, 2012).

Figura 5 - Esquema de balão de extrusão



Fonte: Ferreira , 2012.

A razão de insuflamento pode ser calculada pelas equações: $RI = D / d$ ou $RI = L / (d \times \pi)$. Dessa forma, a razão de insuflamento é definida como sendo a relação entre o diâmetro do balão (D) e o diâmetro da matriz (d) ou então a largura do filme extrusado (L) dividida pelo diâmetro da matriz (d) multiplicado por π . Os valores de RI indicados para processo dependem do material e situam-se entre:

PEBD: RI de 2,0 : 1 a 4,0 : 1

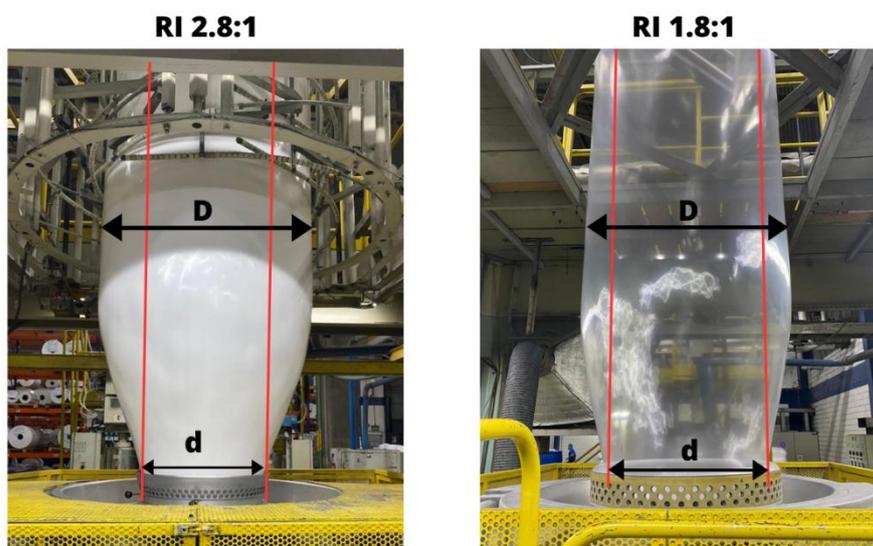
PEBDL: RI de 2,5 : 1 a 3,0 : 1

PEAD: RI de 4,5 : 1 a 6,5 : 1

Quando os valores estão abaixo dessa faixa, a resistência ao impacto é prejudicada, mas a resistência ao rasgo transversal é melhorada. Por outro lado, quando os valores estão acima dessa faixa, a resistência ao rasgo longitudinal e ao impacto são aprimoradas. Além disso, a opacidade diminui, o contraste aumenta e a resistência mecânica geral do filme tubular é aprimorada ao aumentar RI dentro da faixa recomendada de trabalho (FERREIRA, 2019).

A Figura 6 ilustra dois exemplos de balões de extrusão com RIs diferentes. Observa-se que para o processo com RI maior, a diferença de abertura do balão de extrusão em relação à matriz é mais significativa.

Figura 6 - Balões de extrusão com diferentes RIs



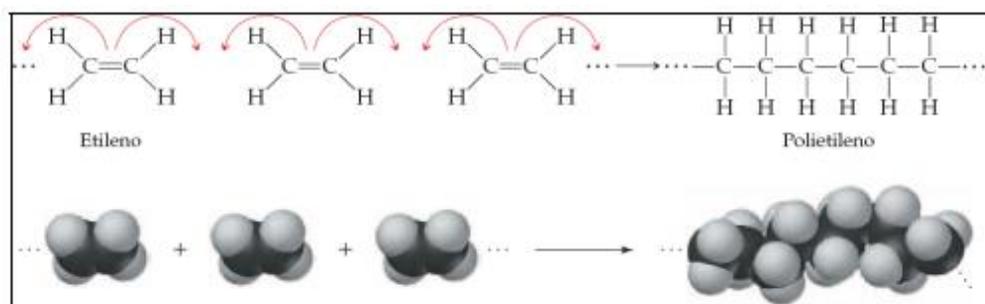
Fonte: Da Autora, 2023.

2.3 POLIETILENO (PE)

Acidentalmente, na Inglaterra, no ano de 1933, químicos descobriram uma cera branca ao aplicar alta pressão em uma mistura de etileno com benzoaldeído. A partir disso, em 1935 foi desenvolvida a síntese do PE em alta pressão, mas a produção em escala industrial iniciou-se apenas em 1939 (VIEIRA, 2009).

O polietileno é um polímero que faz parte da família das poliolefinas, que são extensivamente utilizados no setor de plásticos para embalagens em função da grande variedade de suas propriedades. São formados a partir da polimerização de certos hidrocarbonetos insaturados conhecidos como olefinas ou alquenos. O PE é uma das poliolefinas mais importantes utilizadas para embalagens. Cada poliolefina é caracterizada por sua unidade repetitiva, com cada mero sucessivo na série contendo um grupo CH_2 a mais. O etileno tem fórmula química C_2H_4 e é a unidade repetitiva do polietileno. O número de átomos de hidrogênio é sempre duas vezes o número de átomos de carbono (TWEDE; GODDARD, 2009). O mero de PE e sua reação de polimerização são representados na Figura 7.

Figura 7 - Esquema da reação de polimerização do etileno



Fonte: Torres, 2007.

As principais propriedades do polietileno são sua resistência, capacidade de soldagem a quente e sua função de barreira à água e ao vapor d'água. O PE também é valorizado pela absorção à umidade e baixo coeficiente de fricção (ou atrito). Além disso, o PE é geralmente inerte e tem considerável resistência química. Essas propriedades, aliadas com seu baixo custo (inclusive um dos menores entre as resinas para embalagem), fazem com que o PE seja um dos materiais mais populares para este segmento. Ademais, outra característica importante que o material possui é o baixo ponto de amolecimento, isso reflete também em mais

economias no processamento, ou seja, não é necessário que a extrusora gaste tanta energia, comparado com outras resinas (TWEDE; GODDARD, 2009).

O PE oferece muitas vantagens em aplicações, mas também possui suas limitações, como por exemplo, não ser apropriado para envase a quente, justamente por possuir baixo ponto de amolecimento. Sendo assim, ele é mais indicado para envase de alimentos à temperatura ambiente ou congelados, sendo que não perde sua flexibilidade em temperaturas mais baixas. Além do mais, o polietileno é difícil de imprimir, então sua superfície precisa ser tratada por um tratamento chamado Corona para então receber a tinta (TWEDE; GODDARD, 2009). Como citado anteriormente, o PE é formado por longas unidades de C_2H_4 e, em razão da habilidade dos átomos de carbono formarem ramificações laterais e condições variadas às quais a polimerização pode acontecer, o material nem sempre é formado com moléculas de igual tamanho e formato. Desta forma, as condições de síntese, técnica e mecanismo de polimerização irão influenciar na estrutura e propriedades do PE. As propriedades desses variados tipos de polietilenos dependem da estrutura molecular (estrutura linear ou ramificadas), massa molar, morfologia (conformação molecular) e do grau de cristalinidade. O grau de cristalinidade do PE exerce influência na densidade, resistência à tração, barreiras à gás e a vapor d'água, rigidez e estabilidade térmica. Por outro lado, ela é inversamente proporcional à propriedades como transparência, resistência ao impacto, alongamento e selagem a quente (TWEDE; GODDARD, 2009).

Os principais tipos de polietileno disponibilizados no mercado são o PEAD (Polietileno de Alta Densidade), PEBD (Polietileno de Baixa Densidade) e PELBD (Polietileno Linear de Baixa Densidade). A seguir eles serão discutidos separadamente. A Tabela 2 abaixo mostra uma comparação de valores de temperatura de fusão (T_f), densidade e resistência à tração entre os três tipos de PE. Nota-se que quanto maior a densidade, mais alta é a temperatura de fusão e maior a resistência à tração.

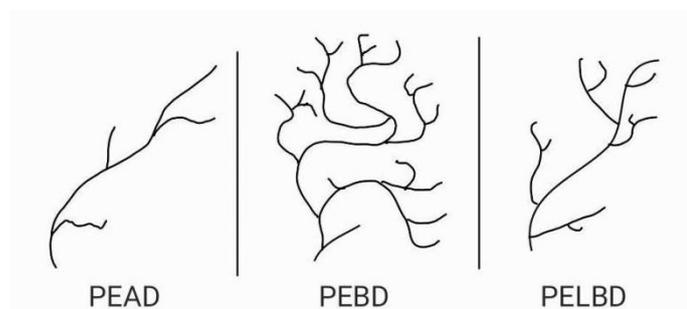
Tabela 2 - Comparação entre as principais propriedades do PEAD, PEBD e PELBD

Propriedade	PEBD	PELBD	PEAD
Tf (°C)	110	120-130	>130
Densidade (g/cm ³)	0,92	0,92-0,94	0,94-0,97
Resistência à tração (MPa)	24	37	43

Fonte: Coutinho, Mello et all, 2003.

A estrutura molecular é diferente em cada uma das variações do polietileno. O PEAD tem uma estrutura mais linear, o que permite um denso empacotamento das moléculas, resultando em um polímero mais denso e rígido. Já o PEBD, é caracterizado por longas ramificações laterais, o que confere ao material flexibilidade, transparência e facilidade de processo. O PELBD difere do PEBD pois tem ramificações mais curtas e distribuição de massa molar mais estreita. A Figura-8 apresenta alguns dos diferentes tipos de cadeias de polietilenos.

Figura 8 - Diferentes tipos de cadeia de polietilenos



Fonte: Adaptado de Twede, 2009.

Os próximos tópicos irão trazer particularidades desses variados tipos de PE.

2.3.1 Polietileno de Alta Densidade (PEAD)

O Polietileno de Alta Densidade é obtido pelo processo de polimerização do eteno sob pressões na faixa de 10 a 50 atm e temperaturas entre 20 a 80 °C. Essas condições resultam em um material altamente cristalino, com cristalinidade entre 70 a 80%, devido seu baixo teor de ramificações. A estrutura linear das cadeias (estrutura praticamente isenta de ramificações) reflete em maior densidade do

polímero e isso faz com que ocorra orientação, alinhamento e empacotamento das cadeias de forma intensa, como consequência, a temperatura de fusão é mais elevada que em outras categorias de PE (VIEIRA, 2009). A elevada cristalinidade e a diferença de índice de refração entre as fases amorfa e cristalinas fazem com que os produtos feitos em PEAD sejam translúcidos e menos transparentes que aqueles em PEBD. Uma de suas principais propriedades é a resistência mecânica e de impacto, estas são influenciadas proporcionalmente pelo peso molecular do material. Além do mais, a orientação das cadeias também exerce grande influência sobre a resistência mecânica do polímero. À medida em que as cadeias são orientadas a resistência é mais elevada, isso acontece porque as orientações aumentam o empacotamento das cadeias e em consequência a sua rigidez. (VIEIRA, 2009).

De maneira geral, os polietilenos são resistentes a muitos dos produtos químicos, exceto aos ácidos oxidantes, halogênios livres (como o cloro) e algumas cetonas. Em temperatura ambiente, o PE é insolúvel em todos os solventes, já em temperaturas mais elevadas, a sua solubilidade em hidrocarbonetos aumenta rapidamente. Esses solventes não dissolvem o polímero em temperatura ambiente, mas são absorvidos por ele em consequência do intumescimento (ou inchamento) do material. A solubilidade em um solvente depende da densidade do polímero, quanto menor a densidade, maior a solubilidade, sendo assim, o PEAD apresenta menor solubilidade que o PEAB, além de também apresentar menos intumescimento (SARANTOPOULOS, 2017). Devido às propriedades de alta resistência citadas anteriormente, o PEAD é majoritariamente utilizado como matéria-prima de garrafas moldadas por sopro, usadas para envase de leite, detergentes, xampus, óleos para reatores, entre outros produtos. Na categoria de processamento por injeção, o material também é utilizado em engradados, paletes, tambores e containers para armazenamento. Além dessas aplicações, o polímero também é matéria-prima da maioria dos sacos e sacolas para embalagem de alimentos, que são produzidos a partir do filme extrusado (TWEDE; GODDARD, 2009).

2.3.2 Polietileno de Baixa Densidade (PEBD)

O Polietileno de Baixa Densidade é um polímero que possui grau de cristalinidade entre 45 e 55%, temperatura de fusão na faixa de 110 a 115 °C e é obtido pela polimerização do gás eteno com a presença de oxigênio sob altas temperaturas (de 100 a 300 °C) e pressão (de 1000 a 3000 atm). Em razão dessa alta pressão implementada, ocorre a formação das ramificações da cadeia, tanto longas, como curtas. Essas ramificações possuem grande influência sobre as propriedades do material (VIEIRA, 2009).

Na maioria dos casos, as ramificações do PEBD são tão longas quanto a sua cadeia principal. Isso gera efeito sobre a viscosidade no polímero fundido, além de que são elas que determinam o grau de cristalização e as temperaturas de transição do material. Dentre os tipos de PEs, esse é o que apresenta menor grau de cristalinidade, já que as ramificações longas não conseguem se acomodar na rede cristalina. Dessa forma, o material combina propriedades como boa transparência, resistência ao impacto, alta flexibilidade, fácil processabilidade, além de boa barreira à água e ao vapor d'água (VIEIRA, 2009).

Segundo pesquisa realizada pelo mercado Americano, mais da metade de todo o montante de PEBD é processado por extrusão de filmes que são convertidos em produtos como sacos de lixo, embalagens para alimento, filmes estirados e encolhíveis, entre outros. O material pode ser extrudado como um revestimento sobre outros materiais, sendo que grande parte é utilizada em estruturas laminadas ou co-extrudadas formando filmes multicamadas. Em muitos projetos o PEBD é utilizado com função de selante térmico médio, além de ser empregados em produtos que necessitam de barreira à água. Além disso, o polímero também é usado para frascos de condimentos apertáveis (squeeze) e em tampas de encaixe explorando suas propriedades de alongação (TWEDE; GODDARD, 2009).

2.3.3 Polietileno Linear de Baixa Densidade (PELBD)

O Polietileno Linear de Baixa Densidade é um copolímero de eteno e um comonômero (propeno, 1-buteno, 1-hexeno ou 1-octeno), o qual pode variar. Outra forma de obtenção do PELBD é pela polimerização do eteno, em baixos níveis de pressão, em fase gasosa ou em solução. O polímero tem sua estrutura molecular caracterizada por cadeias lineares com ramificações curtas em maior quantidade e distribuição de peso molecular, quando comparado ao PEBD. Fatores como tipo de distribuição do comonômero utilizado, teor de ramificações e peso molecular influenciam na estrutura da cadeia e, conseqüentemente, nas propriedades do material (VIEIRA, 2009).

As características acima interferem nas propriedades do produto. As curtas ramificações são benéficas ao material, de modo que podem melhorar sua rigidez, densidade, dureza e resistência à tração. Isso é resultado da estrutura ramificada em algumas regiões da cadeia, que impedem um arranjo perfeito entre elas. Em termos de comparação, a cristalinidade, que é uma das propriedades afetadas de forma diretamente proporcional ao alinhamento das cadeias poliméricas, tratando-se do PELBD, está em um nível intermediário entre o PEAD e o PEBD. Atrelada à cristalinidade, outras propriedades como densidade, temperatura de fusão e resistência à tração também se apresentam de forma intermediária entre os outros dois tipos de PE (VIEIRA, 2009). Ainda, por não ter ramificações de cadeia longa, o PELBD tem uma alongação muito maior que o PEBD. Além disso, possui maior resistência ao rasgo, resistência ao alongamento, tem resistência ao impacto e apresenta melhor resistência ao trincamento sob tensão. Esse material permite que sejam otimizados os custos de produção, sendo que é possível empregar menos matéria-prima garantindo iguais ou melhores níveis de resistência. O polímero também oferece mais durabilidade e resistência química, além de ser menos transparente que o PEBD. Os fatores anteriormente citados fazem com que o material seja cada vez mais importante no mercado de filmes (TWEDE; GODDARD, 2009).

Como os outros tipos de PE, o PELBD pode ser empregado em vários setores de diferentes indústrias. Devido ser termoplástico e possuir boa capacidade

de selagem a quente, é bastante utilizado em embalagens de gêneros de primeira necessidade, como exemplo em mistura com o PEBD na extrusão, pode ser empregado em filmes de embalagens de empacotamento de alimentos como açúcar, farinhas, leite em pó, ou até mesmo em outros artigos de higiene e descartáveis. Já em mistura com o PEAD ou PEBD, o PELBD é mais utilizado em sacarias industriais, que servem de embalagem para adubos, produtos químicos e ração animal, por exemplo (VIEIRA, 2009).

2.3.3.1 Polietileno Linear de Baixa Densidade obtido por catalisador Metaloceno (mPE)

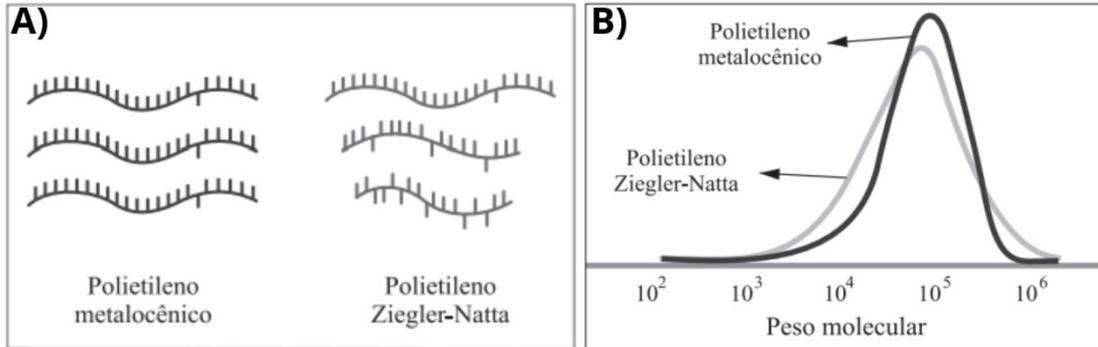
O fato de que os átomos de carbono e hidrogênio podem ser arrançados de maneiras diferentes nos materiais, aumenta a possibilidade de produzir variações das propriedades de polímeros, usando técnicas diferentes de polimerização e diferentes catalisadores. Atualmente, existe muito investimento e estudo na área de catálise, principalmente metalocenos, para incrementar as propriedades de polímeros como o polietileno (TWEDE; GODDARD, 2009).

De forma geral, os PELBDs são polimerizados na presença de catalisadores conhecidos como Ziegler-Natta, os quais promovem a distribuição de cronômetros de forma heterogênea, ou seja, não totalmente regular nas cadeias principais do polímero. Com o objetivo de obter uma distribuição uniforme dos cronômetros ao longo da cadeia principal, foram desenvolvidos os catalisadores metalocênicos (VIEIRA, 2009). A obtenção de polietilenos lineares por meio de catalisador metaloceno permite melhorar a arquitetura molecular e assim otimizar o dimensionamento das propriedades físicas, mecânicas e de selagem do material. Esse controle sob a estrutura molecular do polímero aumenta significativamente a possibilidade de obter um polímero específico para cada aplicação (SARANTOPOULOS, 2017).

A Figura 9-a representa a distribuição de cronômetros nas cadeias de PELBD na presença dos dois diferentes tipos de catalisadores. Ao lado, na Figura 9-b está graficamente representada a distribuição de peso molecular, onde podemos observar que com o catalisador metalocênico a distribuição fica mais estreita, ao

contrário que com a catálise Ziegler-Natta, que apresenta maior variação de peso molecular.

Figura 9 - a) Distribuição de comonômero nas cadeias de PELBD e b) Distribuição de peso molecular



Fonte: Adaptado de VIEIRA, 2009

3 METODOLOGIA

Para a comparação das propriedades mecânicas dos filmes de polietileno extrusados e coextrusados, foi utilizada pesquisa experimental quantitativa. A pesquisa foi realizada durante o primeiro semestre de 2023, em laboratório de empresa parceira.

3.1 MATERIAIS DE ESTUDO

Foram analisadas amostras de filmes de polietileno que possuem a mesma fórmula, mas foram extrusados em máquinas diferentes, sendo elas: extrusora monocamada e co-extrusoras de 5 camadas. A fórmula é composta majoritariamente por resina de PEBDL, contendo também PEBD, pigmentos e aditivos auxiliares de processo. A Tabela 3 mostra de forma mais detalhada a composição de cada amostra. A escolha dessa composição se deve ao fato de que é uma formulação utilizada em grande parte dos produtos da empresa em que foi realizado o estudo e além disso, é uma das fórmulas que ainda são produzidas nos três modelos de extrusoras.

A empresa armazena amostras de retenção de todas as Ordens de Produção (OPs). Sendo assim, com a ajuda de um relatório emitido via sistema, foram selecionadas 3 amostras processadas por extrusão (máquina de código interno 5013) e 4 amostras processadas por co-extrusão (sendo 3 da máquina 5053 e 1 da máquina 5035), que foram fabricadas no período de fevereiro a abril de 2023. Todos os filmes analisados possuem também a mesma espessura nominal (116 micrômetros), sendo assim foi possível compará-los em vários aspectos mecanicamente.

Tabela 3 - Distribuição de componentes no filme

ROSCA	Máquina 5035 Fórmula 5019	cobertura (%)	Máquina 5053 Fórmula 9019	cobertura (%)	Máquina 5013 Fórmula 1019	cobertura (%)
A	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Pigmento Aditivo auxiliar de fluxo	27	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo -Aditivo deslizante	10	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo -Aditivo antioxidante -Aditivo anti bloqueio -Pigmento	100
B	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo	8	-PEBDL -PEBDL metaloceno -Pigmento	20		
C	-PEBDL -PEBD -Pigmento - Aditivo auxiliar de fluxo	30	-PEBDL -Pigmento	40		
D	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo	8	-PEBDL -Pigmento	20		
E	-PEBDL -PEBDL metaloceno -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo - Aditivo antioxidante - Aditivo anti bloqueio	27	-PEBDL -PEBD -Aditivo auxiliar de fluxo	10		

Fonte: Da Autora, 2023.

Cada máquina possui suas características em relação aos parâmetros de processo. Há variações em relação à velocidade de produção, tamanho da matriz (que influencia na relação de insuflamento), taxa de catalização e custo de produção, conforme ilustrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de processo

	Máquina 5035 (coextrusora)	Máquina 5053 (coextrusora)	Máquina 5013 (extrusora)
Matriz	300 mm	600 mm	400 mm
Velocidade de produção	~200 kg/h	~700 kg/h	~100 a 200 kg/h
Custo de produção	5% < X	0,25% < X	X
Taxa de catalizador metalloceno	17%	10%	30%

Fonte: Da Autora, 2023.

3.2 ENSAIOS

Os ensaios foram realizados no laboratório da qualidade da empresa parceira, pela autora. Esse laboratório dispõe de todos os equipamentos necessários para os testes. Foi avaliada a resistência mecânica dos filmes de polietileno por métodos destrutivos (resistência à tração e deformação na ruptura; módulo secante; resistência à propagação do rasgo e resistência à perfuração).

3.2.1 Propriedades de Tração

A metodologia do ensaio de tração é baseada na ASTM D882 - *Standard test method for tensile properties of thin plastics sheeting* de 2018, esse método se aplica à determinação das propriedades de tração de filmes e chapas finas com espessura inferior a 1mm. As medidas das propriedades de tração envolvem basicamente a separação em velocidade constante, de duas garras que prendem um corpo de prova (CP) de filme de dimensões padronizadas, registrando ao longo do ensaio a força ou a resistência (tensão) a qual o material oferece em função da sua deformação ou alongamento (SARANTOPOULOS, 2017).

3.2.1.1 Resistência Máxima à Tração e Deformação na Ruptura

A norma ASTM D882 (2018) define a resistência máxima à tração, conforme o nome sugere, como a máxima resistência que o material oferece quando submetido à tração. A resistência à tração é a relação entre a força máxima e a área da seção transversal inicial do corpo de prova. Pode ser expressa em MPa, N/m² ou kgf/cm². No ensaio de tração, a propriedade de deformação na ruptura é a relação percentual entre o comprimento inicial do corpo de prova e seu comprimento após a ruptura. O resultado é expresso em % (ASTM, 2018). Tanto os valores de deformação, como a resistência máxima à tração foram obtidos conforme descrito a seguir.

Para a execução do ensaio, foram preparados dez corpos de prova de cada amostra (sendo cinco cortados no sentido transversal da bobina (DT) e outros cinco no sentido longitudinal, também chamado de sentido máquina (DM)). Utilizou-se um gabarito de 2,54 x 7,5 cm e um estilete de corte preciso para a confecção dos corpos de prova. De acordo com a ASTM D882, a espessura do CP é um valor conhecido ou obtido por micrômetro, sendo assim, o filme utilizado possui espessura nominal de 116 micrômetros. O ensaio foi realizado na Máquina Universal de Ensaio Mecânicos, modelo EMIC DL500 MF e consiste em fixar o corpo de prova nas garras do equipamento, mantendo a distância inicial de 50 ± 2 mm entre as garras e proceder iniciando a máquina, que alonga o material até que ocorra ruptura. A velocidade de tracionamento é de 300 mm/min conforme método ASTM D882. A Figura-10 ilustra a máquina universal de ensaios em teste de resistência à tração e deformação.

Figura 10 - Ensaio de resistência à tração



Fonte: Da Autora, 2023.

3.2.1.2 Módulo Secante

O módulo secante é a relação entre a força de tração e a deformação determinada utilizando um ponto específico de deformação antes do escoamento. Geralmente, para filmes flexíveis é utilizado como referência 1% de deformação. Ele é utilizado quando não é possível determinar exatamente a região elástica da curva de força *versus* deformação, e é um indicador da rigidez do filme. O módulo secante é expresso em MPa, N/m² ou kgf/cm² (SARANTOPOULOS, 2017).

O ensaio é semelhante em partes ao de resistência máxima à tração e ao alongamento. Para a determinação do módulo secante, também foram ensaiados 10 corpos de prova de cada amostra, sendo cinco no sentido DT e outros cinco no sentido DM. Da mesma forma, o ensaio foi realizado no equipamento EMIC. Entretanto, neste caso, conforme a norma ASTM D882, os CPs foram preparados com dimensões iguais a 2,54 x 28 cm e então fixados nas garras do equipamento, inicialmente à distância de 25 cm.

3.2.2 Resistência à Perfuração

A resistência à perfuração é um parâmetro importante a se analisar no desenvolvimento e avaliação da qualidade de embalagens para acondicionamento de produtos que apresentam pontas, cantos vivos ou outras espécies de protuberâncias que possam danificar o material (SARANTOPOULOS, 2017).

Essa propriedade é determinada por meio da aplicação de uma força biaxial, a qual representa os tipos de solicitações a que o material é submetido. Tendo como base a norma ASTM F1306 (2016) - *Slow Rate Penetration Resistance of Flexible Barrier Films and Laminates*, que apresenta a metodologia para a determinação da resistência à perfuração em filmes mono ou multicamadas quando a solicitação é realizada em velocidade baixa, o ensaio procedeu da seguinte forma: Foram preparados 5 corpos de prova de cada amostra, com aproximadamente 50 mm x 50 mm, em seguida, ensaiados em máquina universal de ensaios (EMIC DL500 MF), equipada com os dispositivos especiais para o ensaio em questão. A perfuração foi realizada com uma ponteira metálica de ponta esférica, com diâmetro de 3,2 mm, a uma velocidade de 25mm/min. O resultado é expresso em Newton (N).

Figura 11 - Ensaio de resistência à perfuração



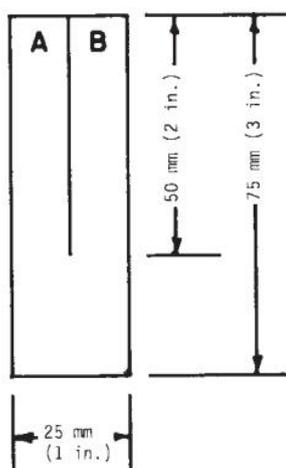
Fonte: Da Autora, 2023.

3.2.3 Resistência à Propagação do Rasgo

A resistência ao rasgamento é um parâmetro importante para a avaliação da qualidade de um filme plástico. Em geral, valores elevados de resistência são necessários para uma boa maquinabilidade e além disso, como exemplo, para aplicação em embalagens de acondicionamento de produtos sólidos que possam sofrer alguma perfuração, essa característica poderá evitar maiores danos. Em contrapartida, para embalagens do tipo fácil abertura, é desejável baixa resistência à propagação do rasgo, pois nesse caso, o objetivo é o rasgamento com baixo esforço. Essa característica é função da natureza química do material e está ligada à orientação e direção das cadeias poliméricas, sendo assim, são obtidos diferentes valores conforme o sentido escolhido para o ensaio (SARANTOPOULOS, 2017).

O ensaio é baseado na norma ASTM D1938 de 2019 - Método de teste padrão para resistência à propagação de rasgos de filme plástico e chapas finas por um método de rasgo único. A Figura 12 mostra um esquema das dimensões dos CPs, que consiste em largura constante de 25 mm e 75 mm de comprimento, havendo um corte de 50 mm exatamente na metade da largura do corpo de prova, paralelo à direção ensaiada. Desta forma, foram ensaiados 10 corpos de prova por amostra, sendo 5 para cada sentido (DM e DT), em máquina universal de ensaios EMIC DL50 MF, operando a uma velocidade constante.

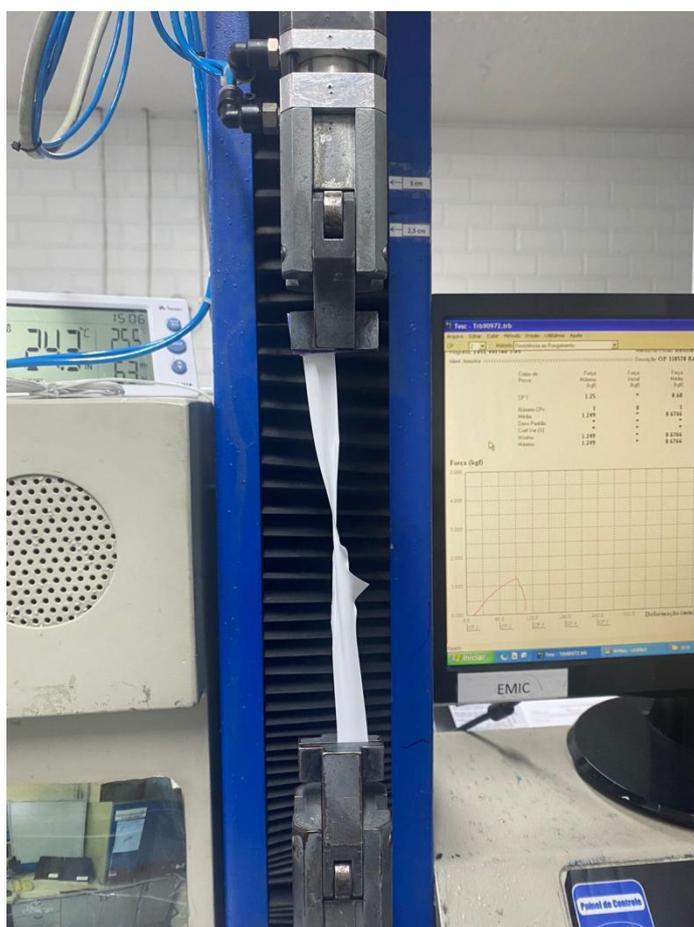
Figura 12- Esquema do corpo de prova para ensaio resistência à propagação do rasgo



Fonte: ASTM, 2019.

A fixação do corpo de prova é feita por meio das garras do equipamento. A propagação do rasgo é feita em velocidade constante de 250 mm/min pelos 25 mm restantes do CP, de forma que os dois segmentos fiquem separados completamente. Por fim, é gerado um gráfico força *versus* deformação e o resultado deve ser expresso em Newton (N) (ASTM , 2019).

Figura 13 - EMIC em ensaio de rasgamento



Fonte: Da Autora, 2023.

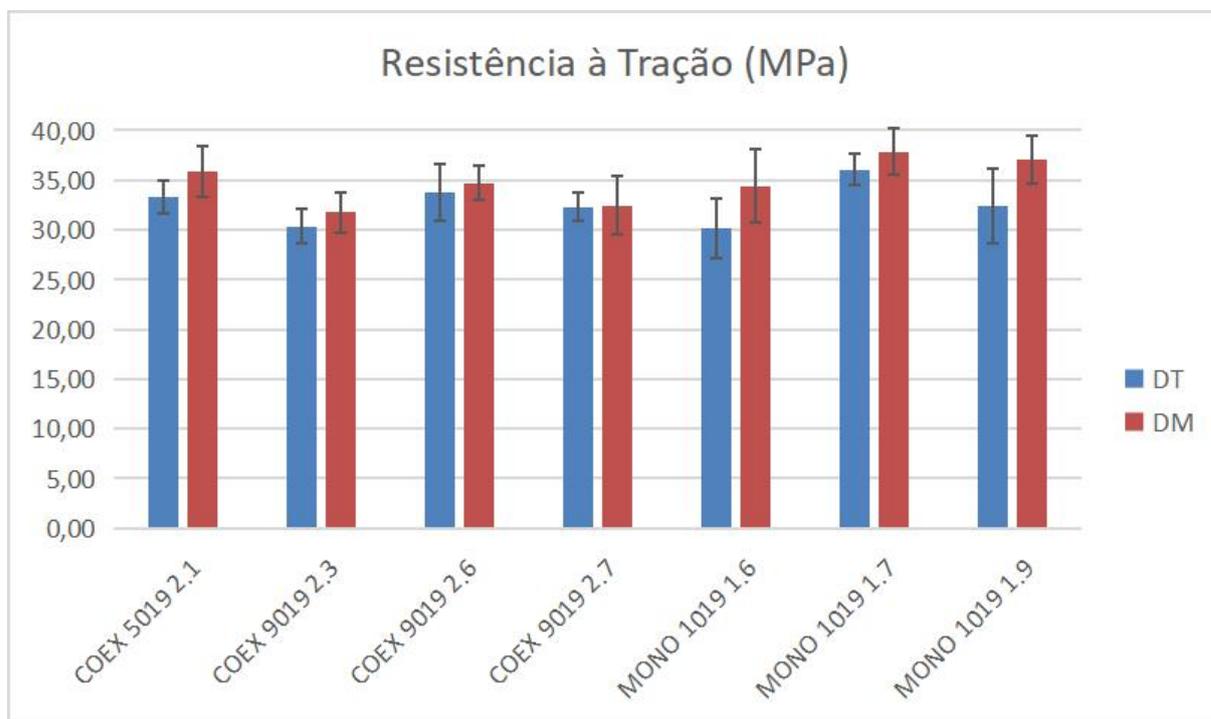
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Gráfico 1, são apresentados os valores de resistência à tração relacionados a cada tipo de extrusora e relação de insuflamento (RI). Observa-se que, de maneira geral, que os filmes não mostraram diferenças significativas em relação a essa propriedade. Comparando os valores obtidos nos ensaios de corpos de prova ensaiados na direção que o filme é extrusado e em sequência bobinado, chamada de direção máquina (DM) e na direção transversal ao bobinamento (DT), observa-se que em todas as amostras, as resistências em sentido “máquina” são melhores. Essa diferença pode ser explicada pela característica de processamento de extrusão, onde o estiramento se dá principalmente na DM, ocasionando uma maior orientação nesta direção (RUPPENTHAL, 2012).

Os filmes processados em máquinas extrusoras com RI: 2.6:1 e 2.7:1 apresentaram a menor diferença entre valores de tensão na ruptura em DM e DT. De acordo com a literatura [FERREIRA,2019], o RI ideal para o PEBDL ocorre entre 2.5:1 e 3.0:1, proporcionando resultados de propriedades mecânicas mais homogêneas tanto na DM como na DT.

Nesta análise, os filmes que se destacam, principalmente em maiores valores de resistência no sentido DM são o COEX 5019 - RI 2.1, COEX 9019 - RI 2.6 e o MONO 1019 - RIs 1.6 e 1.9. Sabe-se que os filmes produzidos na extrusora monocamada utilizam 30% de catalisador metalloceno, ou seja, 3 vezes mais que aqueles extrusados na máquina 5053, multicamadas, e próximo de o dobro do utilizado pela extrusora multicamada 5035. A obtenção de polietilenos lineares por meio de catalisador metalloceno permite melhorar a arquitetura molecular e assim otimizar o dimensionamento das de propriedades físicas, mecânicas e de selagem do material (SARANTOPOULOS, 2017). Com isso, para garantir as propriedades físicas, mecânicas e os níveis de selagem desejados nas superfícies do filmes, é adicionada maior quantidade de catalisador em máquinas monocamadas, o que aumenta a linearidade e organização das cadeias de PE, refletindo então nos valores de resistência mecânica observados neste estudo.

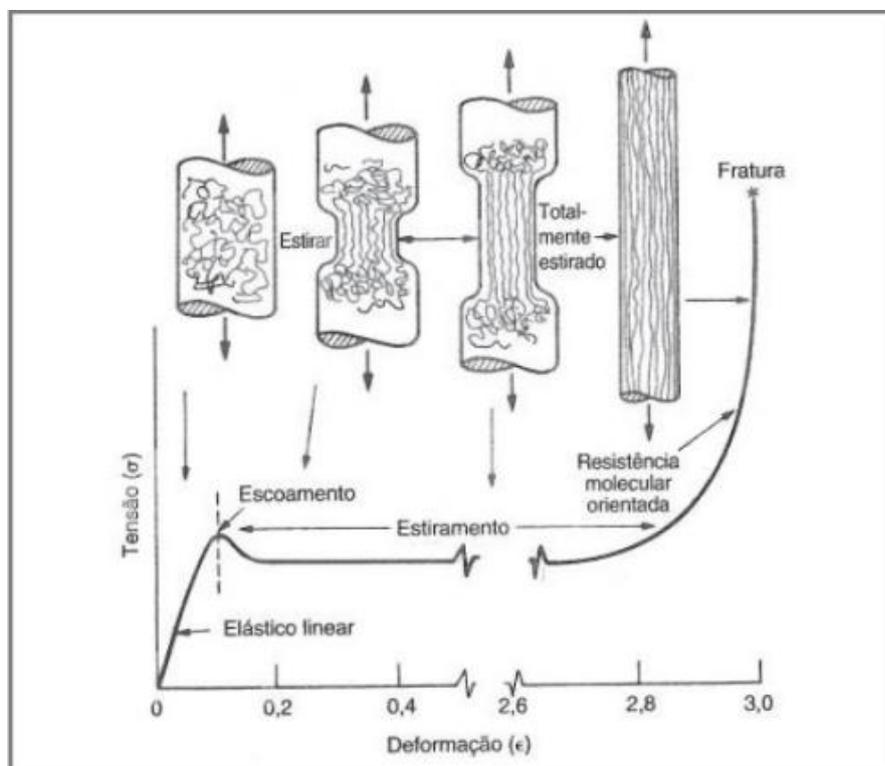
Gráfico 1 - Resistência à tração



Fonte: Da Autora (2023)

A Figura-14 representa esquematicamente uma curva de tensão *versus* deformação típica de um material polimérico, juntamente com o comportamento das cadeias poliméricas ao longo do ensaio. Essa figura auxilia o entendimento do comportamento dos filmes ensaiados, uma vez que quanto maior a orientação das cadeias, teoricamente maior será a força necessária para que ocorra deformação.

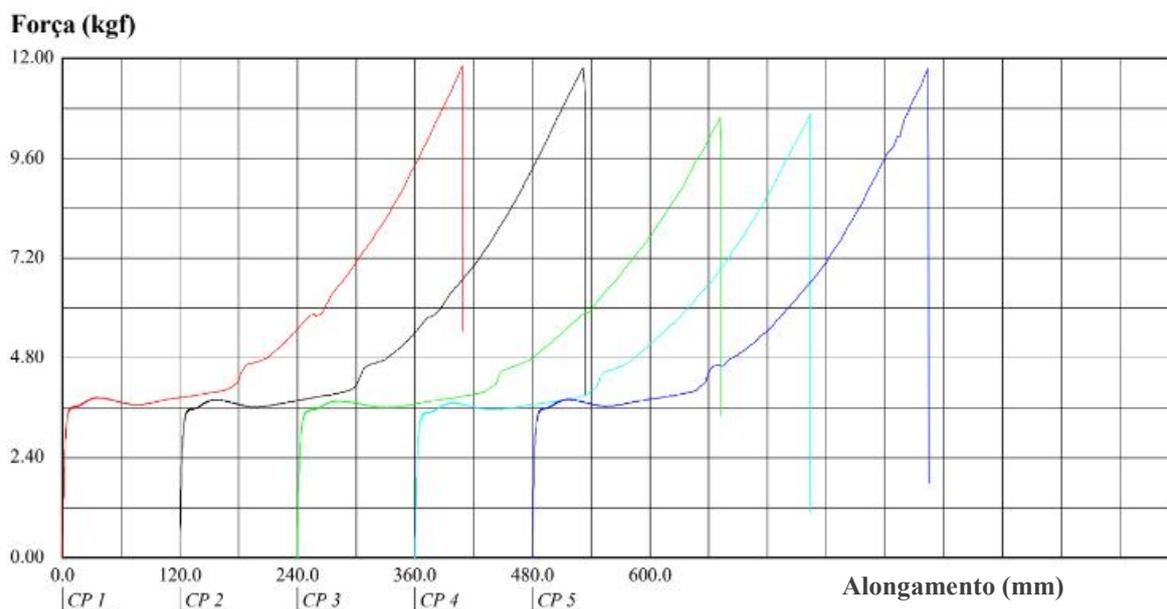
Figura 14 - Curva tensão versus deformação de um material polimérico e o alinhamento das cadeias poliméricas durante a aplicação de tensão de tração



Fonte: Ruppenthal, 2012.

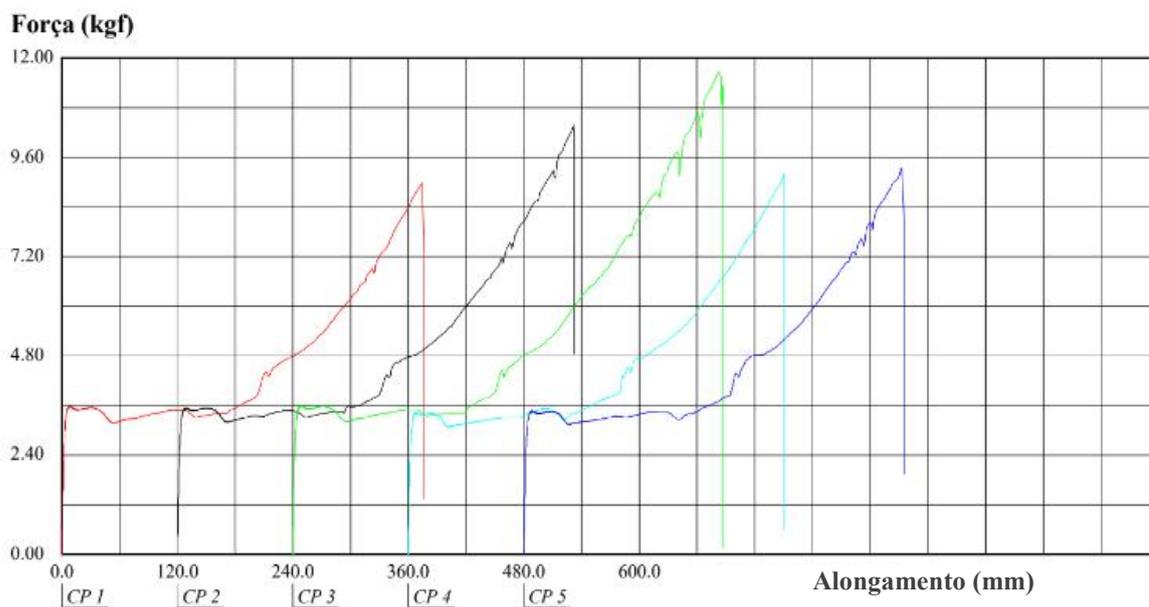
Os Gráficos 2 e 3 representam as curvas do ensaio de tração obtidas nos para a amostra MONO 1019 (RI 1.9). Observa-se que no sentido DM, as curvas apresentam valores de força de ruptura mais elevados do que aqueles encontrados em sentido DT. Além disso, o sentido DT também apresenta maior irregularidade entre as curvas, com pequenas quedas de força ao longo do ensaio. Este comportamento pode ser atribuído à “desorientação” das cadeias. Ademais, as curvas mostram que a zona de estiramento no sentido transversal é maior que no sentido máquina, informação esta que condiz com a teoria representada pela Figura 14.

Gráfico 2 - Força versus alongamento MONO 1019 (RI 1.9) em sentido DM



Fonte: Da Autora, 2023.

Gráfico 3 - Força versus alongamento MONO 1019 (RI 1.9) em sentido DT

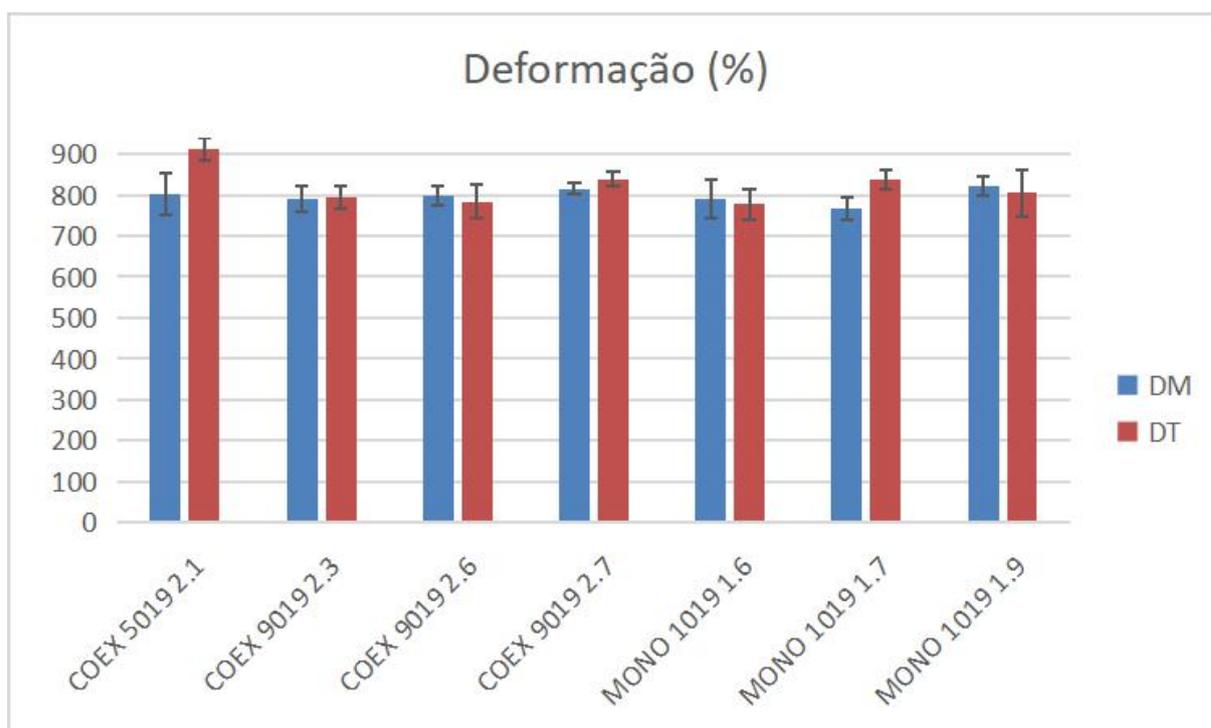


Fonte: Da Autora, 2023.

O Gráfico 4 mostra os valores de deformação DM e DT de todas as amostras analisadas no estudo. Esses dados foram obtidos pelos mesmos ensaios de resistência à tração. A deformação está relacionada com a mobilidade das cadeias

poliméricas, dessa forma, percebe-se que o sentido DT apresenta valores levemente superiores do que o DM, porém muito próximos. De maneira geral, as amostras da coextrusora 9019 e da extrusora 1019 apresentam valores similares de deformação, na faixa de 800%. Já a coextrusora 5019 se destaca entre elas, apresentando uma faixa de 900% de deformação, sendo a maior porcentagem.

Gráfico 4 - Deformação na ruptura

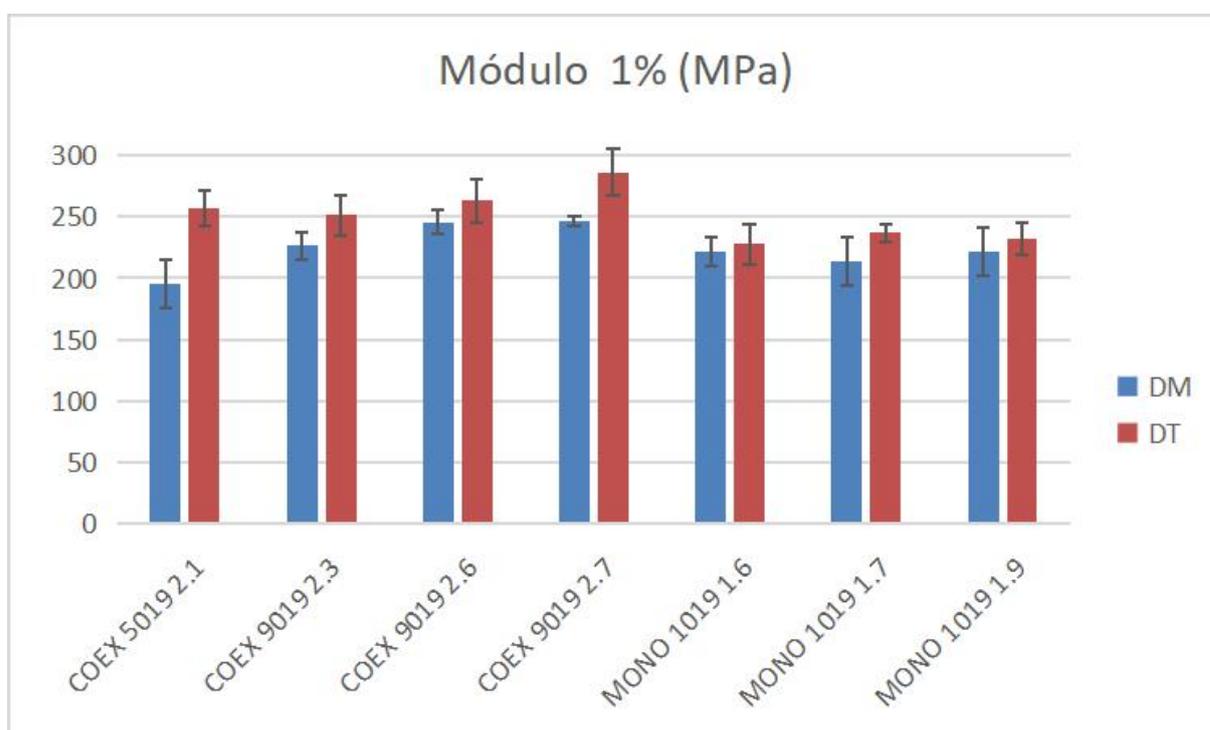


Fonte: Da Autora, 2023.

Os gráficos 5 e 6 trazem os valores de módulo em 1% e 10%, respectivamente. O módulo é uma relação entre a tensão de tração e a deformação em determinado ponto de deformação (neste caso, 1 e 10%). Essa propriedade indica a rigidez do material, sendo que quanto maior o módulo, mais rígido é o material (SARANTOPOULOS, 2017). Em análise do gráfico 3, observa-se que os filmes produzidos nas máquinas “COEX” apresentaram maiores valores de módulo. Constatou-se uma leve proporcionalidade entre o aumento do RI e maiores valores de módulo. Todas as amostras apresentaram maiores módulos em direção DT, principalmente as coextrusadas, este resultado pode estar relacionado ao fato de que para maiores valores de RI, também maior será o estiramento transversal,

proporcionando maior orientação das cadeias poliméricas. Além disso, os valores mais elevados de rigidez podem estar atrelados ao fato de que nas máquinas coextrusoras ocorre melhor distribuição de material entre as camadas.

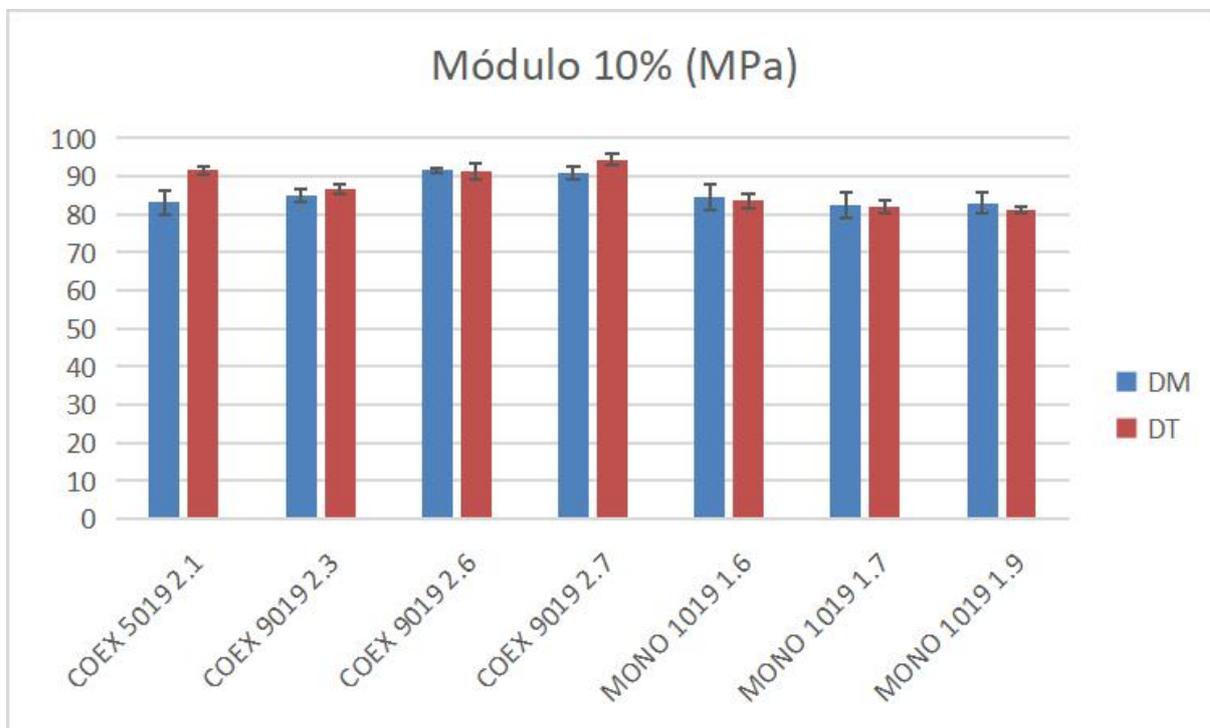
Gráfico 5 - Módulo 1%



Fonte: Da Autora, 2023.

No gráfico 6 pode-se observar que para o ponto de 10% de deformação, comparando valores de COEX e MONO, as diferenças se mantêm. Os filmes extrudados “MONO 1019” apresentam resultados similares entre si. Já nos filmes coextrudados, observa-se maior influência da relação de insuflamento e valores um pouco mais elevados que as amostras de filmes monocamada. Além disso, observa-se também que, comparado com os resultados de módulo em 1% de deformação, estas apresentam menos discrepância entre os valores de direção transversal e direção máquina, o que está ligado com o alinhamento das cadeias durante o ensaio. As amostras que se destacaram em rigidez tanto no sentido DM como DT foram as COEX 9019 2.6 e COEX 9019 2.7.

Gráfico 6 - Módulo 10%



Fonte: Da Autora, 2023.

Os resultados dos ensaios de resistência à propagação do rasgo, apresentados no Gráfico 7, se aproximaram muito do que foi encontrado no ensaio de módulo, em nível de comparação e proporcionalidade entre as amostras. De forma geral, como visto na análise das propriedades anteriores e na literatura, todos os filmes apresentaram maior resistência ao rasgo no sentido transversal. Para esta propriedade não é possível afirmar que existe uma relação entre a resistência e o RI, mas os filmes coextrusados como um todo ofereceram maiores valores, sendo a COEX 9019 2.3 e a COEX 9019 2.7 as mais resistentes à propagação do rasgo. Dessa forma, para aplicações que necessitam menor resistência ao rasgo, como em embalagens do tipo “rasga fácil”, entende-se que é mais inteligente a utilização do filme com rasgo paralelo em direção DM. Já para produtos que precisam garantir bom acondicionamento e resistir aos esforços que podem ser oriundos da propagação de um rasgo ocorridos no envase, transporte ou manuseio, indica-se a utilização dos filmes oriundos das máquinas coextrusoras com RIs entre 2.3 e 2.7

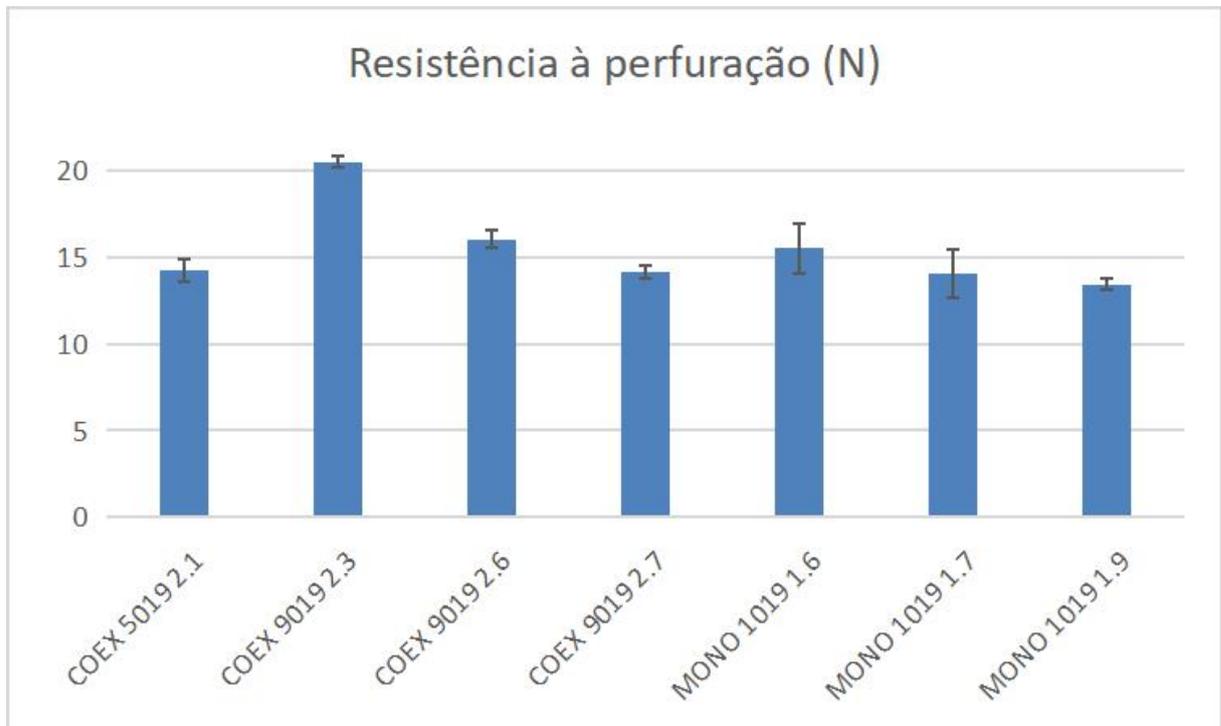
Gráfico 7 - Resistência à propagação do rasgo



Fonte: Da Autora, 2023.

O Gráfico 8 mostra os resultados do ensaio de resistência à perfuração. Diferente dos demais, este ensaio não diferencia amostras DM e DT, visto que a força é aplicada em uma região consideravelmente pequena do filme. Comparando as amostras de cada máquina separadamente, observa-se que aquelas produzidas com menor RI apresentaram valores levemente melhores de resistência à perfuração. O filme COEX 9019 2.3 se destacou entre todos, apresentando uma resistência à perfuração consideravelmente maior que os demais, estando na faixa dos 20 N, enquanto que o restante apresenta uma média de 15 N de resistência. Essa divergência é de certa forma inconclusiva, uma vez que nos ensaios anteriores o filme não apresentou resultados igualmente desproporcionais aos demais. Acredita-se que nesse caso possa ter ocorrido algum desvio de homogeneidade do corpo de prova.

Gráfico 8 - Resistência à perfuração



Fonte: Da Autora, 2023.

5 CONCLUSÃO

Diante das análises realizadas e dos resultados obtidos, conclui-se que de maneira geral, em termos de resistência mecânica, tanto os filmes extrusados como os coextrusados pela indústria de embalagens apresentam valores similares. Entretanto, vale destacar os filmes nomeados como COEX 9019 2.7 e COEX 9019 2.6, coextrusados na máquina 5053 e processado com RI de 2.7:1 e 2.6:1 respectivamente, se mantiveram como os mais resistentes na visão geral dos ensaios. Essa performance pode estar associada aos fatores como razão de insuflamento e processamento multicamadas, uma vez que as resinas são melhor distribuídas e há maior uniformidade entre as camadas no processamento de coextrusão.

Além disso, vale ressaltar que dependendo da propriedade analisada e da aplicação do produto final (embalagem flexível), existe um sentido (DM ou DT) que oferece melhores resultados.

Em um comparativo entre custo de produção e propriedades mecânicas, o filme COEX 5035 2.1, filme coextrusado na máquina 5035 com R.I 2.1:1, apresentou bons valores de resistência mecânica, principalmente em sentido DT, com redução de 5% de custo, comparado com os filmes extrusados na extrusora 5013 - monocamada.

Por fim, conclui-se que de maneira global os filmes coextrusados multicamadas ofereceram propriedades mecânicas equiparadas e/ou melhores que os extrusados, com a vantagem da redução de custo e a facilidade de dimensionamentos de matérias-primas, catalisadores e aditivos.

REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials. **Slow Rate Penetration Resistance of Flexible Barrier Films and Laminates**. ASTM F1306. New York: ASTM, 2016.

American Society for Testing and Materials. **Standart test method for tensile properties of thin plastics sheeting**. Active Standard ASTM D882. New York: ASTM, 2018.

American Society for Testing and Materials. **Standard Test Method for Tear-Propagation Resistance (Trouser Tear) of Plastic Film and Thin Sheeting by a Single-Tear Method**. ASTM D1938. New York: ASTM, 2019.

CALLISTER, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. : Wiley, 2014.

CARNEVALLI. **Coextrusoras** **POD**. Disponível em:<http://carnevalli.com/produtos/coextrusao/> . Acesso em: 04 abr. 2023.

COUTINHO, Fernanda M. B.; MELLO, Ivana L.; MARIA, Luiz C. de Santa. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 01-13, jan. 2003. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0104-14282003000100005>.

CRIPPA, Agnaldo. **ESTUDO DO DESEMPENHO DE FILMES MULTICAMADAS EM EMBALAGENS TERMOFORMADAS**. 2006. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

DATAMARK. **Mercado de Embalagem** 2016. Disponível em: <https://datamark.com.br/freestuff/>. Acesso em: 23 mar. 2023.

EMBALAGEM, Instituto de (org.). **EMBALAGENS**: design, materiais, processos e máquinas. São Paulo: Instituto de Embalagens - Ensino e Pesquisa, 2009.

FERREIRA, Roberto. **Controle do processo de extrusão de filmes tubular**. Sapucaia do Sul: IFRGS, 2019.

FERREIRA, Roberto Luiz Rodriguez. **Estudo da influência da razão de sopro na estrutura e propriedades de filmes de polietilenos produzidos pelo processo de extrusão tubular**. 125 f. - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – Ppge3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

JORGE, Neuza. **Embalagens para Alimentos**. São Paulo: Cultura Acadêmica - Universidade Estadual Paulista, 2013.

MARTINS, Gilmar. **Tecnologia Moderna de Extrusão de Filmes** (apostila) Volume 1. Instituto Avançado do Plástico – IAP. s.d

MENDONÇA, Bruno. **Estudo da Ocorrência de Canaletas no Processo e Delaminação em Uma Indústria de Embalagens Flexíveis**. 2019. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2019.

MCKEEN, Laurence. **Propriedades de Permeabilidade de Plásticos e Elastômeros**. Waltham: Elsevier, 2011.

OTTERBACH, João Claudio H.. **Processo de transformação de plásticos por extrusão de filmes tubulares**. Rio Grande do Sul: FIERGS SENAI, 2011.

RUPPENTHAL, Timóteo. **Blenda de reator de terpolímero de etileno e terpolímero de propeno** : Estudo da microestrutura, morfologia e avaliação de suas propriedades para aplicações de mercado. 2012. 125 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SANTOS, Andrelina Maria Pinheiro; YOSHIDA, Cristina Maria Pedroso. **Embalagem**. Recife: Edufrpe, 2011.

SARANTOPOULOS, Claire I. G. L; TEIXEIRA, Fábio Gomes. **Embalagens Plásticas Flexíveis: Principais Polímeros e Avaliação de Propriedades.** – 2. ed. Campinas: ITAL/CETEA, 2017.

TORRES, Amelia Angelica Ulloa. **ENVELHECIMENTO FÍSICO QUÍMICO DE TUBULAÇÕES DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE EMPREGADAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Puc-Rio, Rio de Janeiro, 2007.

TWEDE, Diana; GODDARD, Ron. **Materiais para Embalagens:** tradução de 2ª edição americana: Sebastião V. CANEVAROLO jr. São Paulo: Blucher, 2009.

VERCELLINO, Murilo Vianna. **Modelagem, simulação e otimização de processo de extrusão de filmes plásticos tubulares.** 2014. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

VIEIRA, Marcial Cesar. In: **Embalagens: design, materiais, processos, máquinas e sustentabilidade** [coordenação geral Assunta Napolitano Camilo]. Barueri: Instituto de Embalagens, 2009.

VIGNOL, Leonardo de Alencastro. **Desenvolvimento de Modelos Simplificados para o Estudo da Extrusão de Polímeros.** 2015. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.