



GIOVANA AZEVEDO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS OCASIONADO PELA REDUÇÃO DE ESPESSURA
EM FILMES DE POLIETILENO PARA EMBALAGENS
ALIMENTÍCIAS**

LAVRAS

2023

GIOVANA AZEVEDO FERREIRA

**AVALIAÇÃO DO IMPACTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OCACIONADO
PELA REDUÇÃO DE ESPESSURA EM FILMES DE POLIETILENO PARA
EMBALAGENS ALIMENTÍCIAS.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências do curso de Engenharia Química, para
a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Juliano Elvis de Oliveira

Orientador

LAVRAS

2023

AGRADECIMENTOS

Á Deus, por ser luz em meio às incertezas, dificuldades e inseguranças.

Aos meus pais, Giovani e Iris Patrícia, pelo apoio emocional e financeiro, pelos braços abertos para me acolher, pelas palavras de incentivo e pelo amor incondicional.

Ao meu irmão, Otávio, que esteve presente durante a minha graduação e agora seguirá os mesmos passos.

Ao meu esposo, Gustavo, por toda paciência, compreensão e amor ao longo deste trabalho.

Ao meu filho Hugo, por ser meu porto seguro e ser a razão a qual me manteve até aqui.

Aos meus avós, tios e padrinhos, que estiveram ao meu lado durante a graduação, com todo apoio e conselhos.

Aos meus colegas da Valgroup, em especial Ana Maria, Paula e Higor, por todo apoio e ajuda que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Juliano, pela paciência, pela confiança, profissionalismo e disponibilidade em me orientar.

À Universidade Federal de Lavras, e a todos os meus professores, especialmente aos do Departamento de Engenharia de Química, por cada conhecimento compartilhado e experiências vivenciadas.

A todos que de alguma maneira contribuíram para realização deste trabalho, sejam diretamente ou com palavras de incentivo e apoio.

RESUMO

O consumo de termoplásticos tem aumentado significativamente nos últimos anos em especial no setor de embalagens alimentícias. Estes materiais poliméricos são responsáveis pelas principais funcionalidades de uma embalagem: conter e proteger a maioria dos alimentos consumidos e distribuídos em todo o mundo. Além das propriedades de contenção e proteção, é necessário que a embalagem atenda requisitos relacionados aos aspectos econômicos ao processo produtivo. Para tal, matérias-primas com custo/benefício como o polietileno (PE), são empregadas na produção de embalagens devido a facilidade de processamento, disponibilidade e versatilidade. Existem diversos tipos de polietileno, os mais utilizados na produção de embalagens flexíveis para indústria alimentícia cita-se o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e o polietileno de baixa densidade (PEBD). Todos estes tipos de PE possuem características específicas que garantem o bom desempenho mecânico dos filmes. Muito fala-se sobre sustentabilidade, com isso indústrias alimentícias propõem alternativas tecnológicas como redução de espessura do filme para diversos segmentos do mercado, dentre eles filmes para laminação, empacotamento automático e filmes termoencolhíveis. Neste aspecto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da redução da espessura de filmes de polietileno e seu comportamento mecânico. Foram realizadas análises de resistência ao rasgo, módulo, tensão de ruptura e alongamento. Após as análises realizadas em laboratório, fica evidente que as propriedades mecânicas não se alteram em filmes com espessura reduzida, uma vez que, há uma compensação na formulação relacionando as propriedades de cada polietileno. Desta forma, o projeto torna-se viável tecnicamente, não impactando na produtividade do cliente, além da produção de um filme mais sustentável sem comprometer sua funcionalidade.

Palavras-chave: redução de espessura, poliolefinas, propriedades mecânicas, resinas de alto impacto, polietileno linear de baixa densidade

SUMÁRIO

SUMÁRIO	5
1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
3. REFERENCIAL TEÓRICO	9
3.1 Polímeros.....	9
3.2 Poliolefinas.....	11
3.2.1 Polietileno	12
3.2.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE).....	14
3.2.1.2 Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)	15
3.2.1.3 Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE)	16
3.3 Embalagens para alimentos	17
3.4 Embalagens flexíveis.....	18
3.5 Filmes para embalagens flexíveis.....	19
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1 Material	24
4.2 Métodos.....	24
4.2.1. Processo de extrusão	24
4.2.2 Análises das propriedades mecânicas.....	25
4.2.2.1 Espessura.....	25
4.2.2.2 Resistência ao rasgo	26
4.2.2.3 Módulo	27
4.2.2.4 Tensão de ruptura e alongamento.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5.1 Filmes para laminação.....	28
5.2 Filmes termoencolhíveis	31
5.3 Filmes para empacotamento automático	33
6. CONCLUSÃO	37
7. REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A indústria de termoplásticos ganhou notoriedade nos últimos anos, refletindo as demandas do mercado consumidor. Um dos maiores mercados consumidores de termoplásticos é o segmento de embalagens, presente em diversos setores produtivos como de alimentos, cosméticos, automobilístico, higiene e limpeza, entre outros (GEYER et al.,2017). Os materiais poliméricos exercem um papel importante nas mais diversas atividades humanas, como por exemplo no setor alimentício, uma vez que essa classe de materiais é responsável por conter e proteger a maioria dos alimentos consumidos e distribuídos em todo o mundo (LARA,2019).

A indústria de embalagens apresentou um crescimento de 0,5% no ano de 2020, o que representa um resultado positivo na produção de embalagens plásticas, metálicas, celulósicas e de vidro. Vale ressaltar que as embalagens plásticas se destacaram, com crescimento de 6,8% (ABRE, 2021). Cerca de 76% do consumo mundial de embalagens plásticas flexíveis é destinado para o setor alimentício (CAMILO,2016). Dessa forma, as embalagens são consideradas um negócio rentável e com crescimento ascendente que contribui para o PIB de diversos países. A relevância das embalagens também é um indício da urbanização da população que busca por alimentos ultra processados ou mesmo por produtos alimentícios pós-colheita de alta qualidade (CAMILO, 2016).

As funções básicas de uma embalagem são conter e proteger o produto, além de informar o consumidor. Através da função de proteção dos produtos alimentícios a sociedade pode evitar o desperdício de alimentos, permitindo economias na produção e distribuição de bens (LARA,2019). Para determinar qual o melhor tipo de embalagem a se empregar, é necessário que ela atenda não só os requisitos de contenção e proteção do alimento e informação do consumidor, mas também os aspectos econômicos associados aos processos produtivos (ALVES,2017).

Devido à versatilidade de propriedades de *commodities* como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC) e politereftalato de etileno (PET), estes polímeros são amplamente utilizados no mercado de embalagens e apresentam maior participação no valor da produção mundial (ABRE, 2021). Estas matérias-primas apresentam uma eficiente relação entre custo/benefício e são amplamente utilizados para a

produção de embalagens plásticas rígidas e flexíveis devido à facilidade de processamento, disponibilidade e versatilidade (ELIAS,2011).

Diversas propriedades destes materiais afetam desde os fabricantes até o consumidor final das embalagens flexíveis para alimentos. Como exemplo pode-se citar as propriedades mecânicas dos filmes plásticos que estão associadas com o desempenho mecânico desde a linha de produção nas máquinas, até o tipo de manuseio, empilhamento, transporte e temperatura de estocagem (MORGHETI,2019).

As grandes indústrias de transformação de termoplásticos estão rotineiramente em busca de redução de custos sempre levando em conta a sustentabilidade. Neste sentido, são propostas alternativas tecnológicas como redução da espessura (gramatura) do filme termoplástico.

2. OBJETIVOS

Objetivo Geral:

Avaliação do efeito da redução da espessura de filmes de polietileno em seu comportamento mecânico em solicitação de tração.

Objetivos específicos:

- a) Avaliar as propriedades mecânicas dos filmes de polietileno;
- b) Avaliar a espessura dos filmes de polietileno;
- c) Avaliar o efeito combinado da redução de espessura e a composição;
- d) Determinar a correlação entre a espessura dos filmes de polietileno e seu comportamento mecânico

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Polímeros

A aplicação de polímeros naturais é conhecida há muitos anos, desde 1600 antes de Cristo, com o uso da borracha natural para confeccionar objetos (HOSLER et al, 1999). No século XVI, espanhóis e portugueses após o descobrimento da América do Sul obtiveram o primeiro contato com a borracha, extraída de uma árvore endêmica das Américas (*Hevea brasiliensis*), que apresentava características de alta densidade e flexibilidade desconhecidos até então (CANEVAROLO,2006).

Em 1839, após a descoberta da vulcanização por Charles Goodyear, conferiu à borracha características como elasticidade não linear, não pegajosidade e durabilidade. O primeiro polímero sintético foi obtido por Leo Baekeland em 1912, obtido através da reação entre fenol e formaldeído gerando a conhecida baquelite (CANEVAROLO,2006)

Somente após a Segunda Guerra Mundial, que foram feitas novas descobertas na área. No entanto, o termo polímero foi utilizado pela primeira vez pelo químico alemão J. Berzelius em 1832, quando tentou designar um termo para diferenciar moléculas orgânicas que possuíam os mesmos elementos químicos em sua composição, como por exemplo etileno e buteno (HAGE,1998).

Em 1920, o químico alemão Hermann Staudinger publicou um artigo científico intitulado “On Polymerization”. Nesse artigo, o pesquisador sugeria pioneiramente a estrutura molecular da borracha. Sua pesquisa evidenciou que cada molécula de borracha (um polímero derivado do isopreno) é composta por cadeias de unidades químicas idênticas (meros). Assim como, descobriu que o comportamento mecânico da borracha (alta elasticidade e resistência à tração) é atribuído ao longo comprimento dessas cadeias e, portanto, à sua elevada massa molar (NATARELLI. et al, 2022).

Os materiais poliméricos estão presentes em diversas áreas e atividades do dia a dia. São utilizados desde indústrias automotivas, médico-hospitalares e até mesmo em embalagens para alimentos. Nesta perspectiva, produtos que utilizavam vidros, cerâmica, aço etc. atualmente estão sendo substituídos por polímeros, uma vez que, suas características e propriedades tornam mais eficaz a funcionalidade dos produtos (PIATTI E RODRIGUES, 2005).

Os produtos das reações de polimerização, aquelas onde moléculas de baixa massa molar reagem entre si dando origem a moléculas maiores caracterizadas pela repetição de uma

unidade básica (“mero”), são chamados de polímeros (BLASS, 1988). Segundo a IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry), polímeros são definidos como moléculas caracterizadas pela repetição múltipla de uma ou mais espécies de átomos ou grupos de átomos ligados uns aos outros em quantidades suficientes para fornecer um conjunto de propriedades que não variam acentuadamente com a adição ou remoção de uma ou algumas unidades constitucionais.

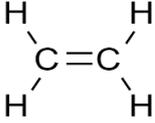
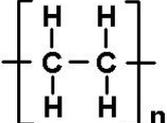
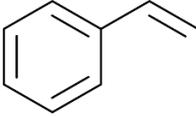
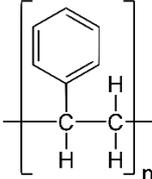
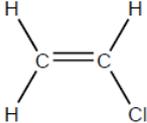
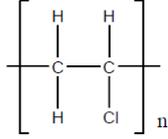
Os polímeros podem ser oriundos de fontes renováveis ou fósseis, sendo o primeiro destes sintetizados pela natureza como borracha natural e celulose, e o segundo aqueles cujos são obtidos a partir da síntese do petróleo (CANEVAROLO, 2006).

Em termos de composição química, os polímeros podem ser classificados em homopolímeros e copolímeros. O primeiro apresenta em sua estrutura a mesma unidade repetida em todas as suas moléculas. Logo, copolímeros são polímeros com uma ou mais unidades de construção diferentes distribuídas regular ou irregularmente ao longo de seu comprimento (EBNESAJJAD, 2012).

Portanto, com a grande variedade de materiais poliméricos existentes, torna-se necessário selecioná-los em grupos que compartilhem propriedades que facilitem o entendimento e estudo das propriedades desses materiais. Neste aspecto, os polímeros podem ser classificados: quanto à origem (naturais ou sintéticos); quanto à arquitetura molecular (linear, ramificada ou reticulada); quanto ao modo de preparação (policondensação e poliadição); quanto as características de fusibilidade (termoplásticos e termorrígidos); e quanto à variedade de meros que compõem a cadeia (homopolímeros e copolímeros) (LUCAS et al., 2001).

De acordo com a IUPAC (2013), o nome do polímero deve ser determinado pela expressão “poli” + nome do monômero como é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Nomenclatura de alguns polímeros de acordo com a IUPAC.

Monômero	Polímero
Etileno 	Polietileno 
Estireno 	Poliestireno 
Cloreto de Vinila 	Poli(cloreto de vinila) 

Fonte: Adaptado de Canevarolo (2006).

3.2 Poliolefinas

As poliolefinas são materiais formados pela polimerização de adição de hidrocarbonetos insaturados como as olefinas que apresentam uma ligação dupla de carbono-carbono. Uma reação em cadeia adiciona novos meros à molécula de polímero em crescimento, uma de cada vez através do ataque de ligações duplas nos monômero por sítios ativos como radicais livres, cátions e ânions (EBNESAJJAD, 2012).

Representam uma importante família de termoplásticos que compartilham a organização básica de sua estrutura molecular, no qual um radical monovalente caracteriza a resina e apresenta o grau de polimerização (BLASS,1988).

Tabela 2 – Poliolefinas mais comuns

Polímero	Abreviatura	Radical
Polietileno	PE	-H
Polipropileno	PP	-CH ₃
Poli (cloreto de vinila)	PVC	-Cl
Poliestireno	PS	-C ₆ H ₆

Fonte: Adaptado de Blass (1988).

A utilização das poliolefinas em larga escala nos mais diversos setores produtivos, principalmente de embalagens, refere-se a maior vantagem na qual apresenta custo reduzido de produção, bem como a facilidade de processamento, tornando-as economicamente viáveis para a indústria. (BONA,2007).

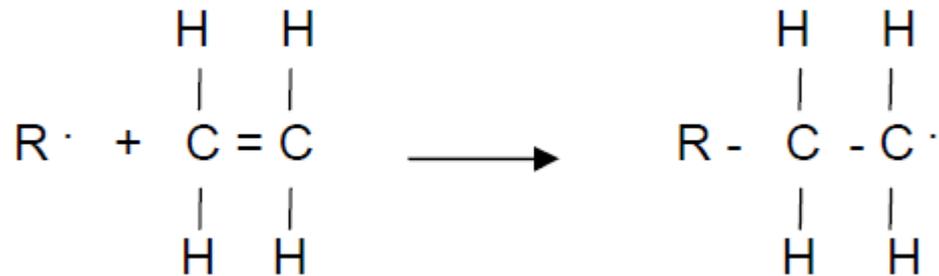
O polietileno é a classe mais importante de poliolefinas, principalmente em aplicações de embalagem, e é obtido pela polimerização do etileno (MIRANDA E FILHO, 2005).

3.2.1 Polietileno

No ano de 2005, o polietileno foi o polímero com maior volume de produção do mundo, com uma produção global estimada em 84 milhões de toneladas por ano. Apesar de sua antiguidade, o polietileno ainda é o polímero mais consumido no mundo e novas tecnologias continuam a serem realizadas com o objetivo de melhorar suas propriedades e características e, conseqüentemente, aumentar sua competitividade no mercado (VASILE; PASCU, 2005; PEACOCK,2000).

O etileno após à exposição de condições apropriadas e controladas de temperatura e pressão resulta no polietileno. O processo de polimerização do gás etileno para obtenção do polietileno, inaugura-se com a reação entre um iniciador normalmente do tipo Ziegler-Natta e o monômero etileno gerando um centro ativo com um elétron desemparelhado em um dos lados formado pelo catalisador + mero (MIRANDA E FILHO, 2005). Essa reação pode ser visualizada na Figura 1.

Figura 1 – Fase inicial do processo de polimerização do etileno



Fonte: Miranda e Filho (2005)

O polietileno é um polímero flexível semicristalino cujas propriedades são fortemente influenciadas pelas quantidades relativas de fases amorfas e cristalinas. São materiais inertes à maioria dos produtos químicos, devido sua natureza apolar, alta massa molar e estrutura semicristalina (COUTINHO et al, 2003). Considerado um polímero de cadeia simples (-CH₂-CH₂-), o polietileno possui propriedades únicas que o tornam um dos polímeros mais utilizados no mundo. Sua estrutura molecular consiste em longas cadeias de carbonos ligados covalentemente entre si, cada carbono ligado a um par de átomos de hidrogênio (PEACOCK,2000).

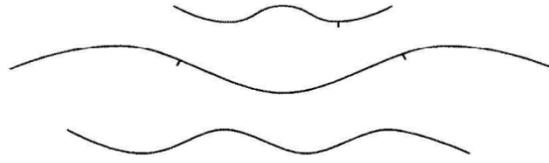
As macromoléculas de polietileno podem ser ramificadas em vários graus e conter pequenas quantidades de insaturação. No entanto, algumas podem apresentar mais ramificações que outras na qual modificam a natureza do material, bem como limitam o nível de cristalinidade (MELO, 2013)

Existem vários tipos de polietileno, caracterizados pelas propriedades moleculares e morfológicas, pelas condições de reação, e pelo sistema catalisador utilizado para a polimerização (COUTINHO et al, 2003). Neste aspecto, levando em consideração as condições reacionais, o sistema catalítico empregado na polimerização e as ramificações, três tipos principais de polietileno podem ser produzidos, sendo em virtude disso, classificado da seguinte forma:

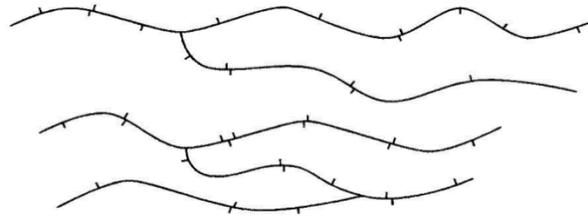
- Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE);
- Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE);
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE);

Figura 2 – Diferentes classes de polietileno. a) PEAD; b) PEBD; c) PELBD

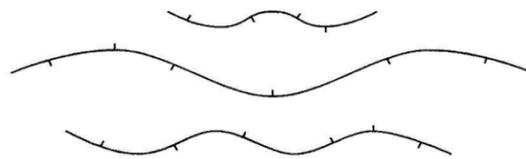
a)



b)



c)



Fonte: Melo (2013)

3.2.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD ou HDPE)

Foi produzido pela primeira vez, em 1955, com os catalisadores organometálicos de Ziegler-Natta, empregando o processo de polimerização na fase gasosa, a temperaturas mais baixas e pressões próximas à pressão atmosférica. Apresenta moléculas não ramificadas e com poucas falhas sem afetar sua linearidade. Além disso, oferece elevada densidade, com relação aos outros tipos, variando em torno de $0,94-0,97\text{g/cm}^3$ (GARCIA, 2002).

Apresentam um maior empacotamento das cadeias bem como estruturas orientadas e lineares, exercendo assim forte efeito sobre as propriedades mecânicas do polímero, como aumento da resistência e rigidez. Devido à sua estrutura mais densa e compacta, apresenta características como boa resistência ao calor, à tração e barreira à vapor de água, bem como excelente resistência química devido às interações intermoleculares. No entanto, possui fraca barreira à passagem de oxigênio, é desprovido em transparência, e geralmente é reconhecido por sua opacidade (TWEDE E GODDARD, 2009)

É um dos termoplásticos mais utilizados para fabricação de embalagens. (TWEDE E GODDARD, 2009). Devido a sua linearidade, o PEAD permite altos graus de cristalinidade

tornando-o adequado para aplicações de contenção de líquidos, como leites, detergentes, baldes, tambores etc. (FERREIRA, 2012; MELO, 2013).

O polietileno de alta densidade (PEAD) e o polietileno de baixa densidade (PEBD) apresentam muitas aplicações em comum, mas em geral, o PEAD é mais duro e resistente e o PEBD é mais flexível e transparente. Um exemplo da relação de dureza e flexibilidade está no fato de que o PEAD é utilizado na fabricação de tampas com rosca (rígidas) e o PEBD na de tampas sem rosca (flexíveis) (COUTINHO et al, 2003).

3.2.1.2 Polietileno de baixa densidade (PEBD ou LDPE)

O Polietileno de Baixa Densidade (PEBD) obtido por meio de experimentos em 1939 pela Chemical Industries (ICI), foi utilizado pela primeira vez como isolante em cabos de radares com o intuito de vencer a Segunda Guerra Mundial (BARBOSA et al, 2017). Desde então, o polietileno tem evoluído e ganhado mais qualidade.

Conhecido também como LDPE (low density polyethylene), é o insumo plástico mais utilizado no mercado de acordo com a Associação Brasileira da Indústria do Plástico (ABIPLAST). Este insumo ficou em quinto lugar entre as principais resinas consumidas no Brasil no ano de 2019, apresentando cerca 8,8%. (ABIPLAST,2019)

O processo de obtenção do PEBD consiste em comprimir o gás etileno puro em um reator tubular a alta pressão (1000 a 3000 atm) na faixa de temperatura de 140 a 330°C, no qual ocorre a reação de polimerização de radicais livres na presença de iniciadores (BEKRY et al, 2022) (BARBOSA et al, 2017). A reação de polimerização altera a simetria da cadeia principal, levando a uma estrutura menos compacta, com baixa densidade e resistência mecânica reduzindo assim as forças atrativas entre as cadeias do polímero (BARBOSA et al, 2017) (CRIPPA,2006).

Outrossim, é um polietileno quimicamente inerte e insolúvel em condições ambientes no qual apresenta características como flexibilidade, resistência a choque, tenacidade, bom processamento e transparência devido à presença das ramificações longas (TWEDE E GODDARD, 2009). Comumente o aumento de ramificações longas é acompanhado do aumento de massa molar, dificultando a avaliação desses parâmetros isoladamente para as propriedades do produto (BECKER,2002).

O Polietileno de Baixa Densidade é a versão menos densa e mais flexível do PE, apresentando como principais características a alta flexibilidade, transparência em pequenas espessuras, permeabilidade a óleos e gorduras e baixa permeabilidade a vapor d'água. A

aplicação mais comum do polietileno de baixa densidade são as sacolas plásticas, devido ao seu baixo custo e boa flexibilidade. Além disso é utilizado em filmes laminados, embalagens para produtos farmacêuticos e filmes para embalagens de alimentos (JORGE,2013).

Em relação a estrutura, no polietileno de baixa densidade as diversas ramificações de cadeia curta reduzem seu grau de cristalinidade, bem abaixo quando comparado com o polietileno de alta densidade (COUTINHO et al, 2003). Sendo assim, resulta em um produto flexível e com baixo ponto de fusão. Neste sentido, quando se compara o polietileno de baixa densidade com o polietileno linear de baixa densidade nota-se ramificações de cadeias mais curtas neste último, apresentando assim uma distribuição de massa mais estreita (FERREIRA, 2012).

3.2.1.3 Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou LLDPE)

O Polietileno Linear de Baixa Densidade foi inserido na década de 70 pela Union Carbide por meio de uma tecnologia própria de fase gasosa e foi licenciado pela Unipol como um processo que utiliza catalisadores altamente ativos e não requer remoção de resíduos de catalisador (GARCIA,2002).

Este polietileno pode ser obtido por processos em solução, suspensão ou fase gasosa apresentando diferentes estruturas que são definidas dependendo do tipo de catalisador utilizado. Neste sentido, o tipo de catalisador utilizado controla as características do produto apresentando efeitos significativos na distribuição das ramificações de cadeias curtas (COUTINHO et al, 2003). Assim, emprega-se catalisadores como Ziegler-Natta para obter polímeros com distribuição de massa molar larga, e catalisadores metalocênicos para obter polímeros com estreita distribuição de massa molar (BECKER,2002).

Polietileno linear de baixa densidade (PELBD) é um copolímero de etileno com uma α -olefina, com densidade entre 0,918-0,940 g/cm³ e como o próprio nome faz referência, apresenta ramificações de cadeias mais curtas. Se diferencia dos outros tipos de polietileno devido à presença dessas ramificações curtas que influenciam sobre a morfologia e algumas propriedades físicas como rigidez, dureza e resistência à tração (SILVEIRA,2012).

Devido à ausência de ramificações de cadeias longas o PELBD apresenta baixa processabilidade quando comparado com o PEBD (SPALDING E CHATTERJEE,2017). No entanto, apresenta maior resistência física e a temperaturas mais altas, bem como maior durabilidade e resistência química (TWEDE E GODDARD, 2009). Se comparado ao PEAD, o PELBD proporciona resistência à tração mais baixa conforme o número de ramificações se

intensifica, tal qual uma maior resistência ao rasgo, apresentando assim propriedades intermediárias entre o PEBD e o PEAD (COUTINHO et al, 2003).

Devido às suas excelentes propriedades mecânicas, o PELBD é amplamente utilizado como base para blendas de PELBD e PEBD, ganhando notoriedade no mercado de embalagens. A vantagem dessas misturas é que elas combinam boas propriedades mecânicas, por um lado, com boas propriedades de processamento e boa limpidez, por outro, permitindo a produção de produtos mais duráveis com menos material (SARANTOPOULOS,2002). DE acordo com Rocha (2013), o consumo de PELBD, utilizado principalmente para a produção de embalagens de alimentos, em especial as embalagens flexíveis, cresce a uma taxa superior à do PEBD.

3.3 Embalagens para alimentos

De acordo com a RDC N° 259, de 20 de setembro de 2002 para rotulagem de alimentos embalados da ANVISA, embalagem é um recipiente destinado a garantir a conservação e facilitar o transporte e manuseio dos alimentos (ANVISA, 2002). Desempenha um papel importante na indústria de alimentos devido às suas funções versáteis. Além do armazenamento do produto, a embalagem também é fundamental para a preservação, qualidade e segurança do produto, atuando como uma barreira contra fatores que contribuem para a deterioração química, física e microbiológica (JORGE,2013).

O mercado de embalagens de alimentos passou por um processo de desenvolvimento tecnológico contínuo e rápido nas últimas décadas. Atenção particular é dada à importância do controle eficiente dos muitos componentes envolvidos na fabricação de materiais de contato com alimentos, pois os materiais utilizados não são considerados completamente inertes ou inóculos (FREIRE et al,1998).

Existem quatro materiais de embalagem básicos: vidro, metal, plástico e derivados de madeira (incluindo papel e papelão). Existem muitas variações dentro dessas quatro classificações, cada uma com muitas características únicas (TWEDE E GODDARD,2009). Vários fatores são considerados ao escolher o melhor material para embalar um determinado produto alimentício, incluindo: a natureza do produto, requisitos de proteção, prazo de validade exigido do produto, mercado-alvo etc. (BARÃO, 2011).

A embalagem plástica apresenta vantagens em relação a outros tipos de materiais por ser feita de materiais leves, baratos, moldáveis, práticos e duráveis. Nesse sentido, seguem tendências globais que visam simplificar o dia a dia (LUIS,2013). A classificação das

embalagens plásticas pode ser feita em relação à estrutura do material e podem ser divididas em embalagens rígidas ou flexíveis com base em aspectos mercadológicos e técnicos. As embalagens plásticas rígidas são aquelas encontradas na forma de garrafas, frascos, bandejas e caixas. As flexíveis são aquelas cujo formato depende da forma física do produto a ser acondicionado (SARANTOPOULOS et al,2002).

3.4 Embalagens flexíveis

Uma das tecnologias que revolucionou o setor de embalagens logo após a Segunda Guerra Mundial foi a embalagem flexível permitindo que o material conquistasse o mercado que anteriormente era das embalagens de papel (ANYADIKE,2010). Esta revolução se deu devido ao fato das embalagens flexíveis apresentarem baixo custo, praticidade e disponibilidade de diferentes resinas para produção no mercado, além de proporcionar rapidez no processo de envase e facilitar o transporte (MOTA,2004)

De acordo com Sarantopoulos et al. (2002), embalagens plásticas flexíveis são aquelas cujo formato depende da forma física do produto acondicionado e cuja espessura é inferior a 250 μm . Somando-se a isso, as embalagens podem ser sacos ou sacarias com soldas, filmes termoencolhíveis para unitização, filmes esticáveis para envoltório e sacos flexíveis que se conformam ao produto (SARANTOPOULOS et al, 2002).

A embalagem flexível é feita de uma ou várias camadas de filme, podendo ser do tipo monocamada ou multicamada. O primeiro tipo é feito extrudando apenas um material ou uma blenda de dois tipos compatíveis. A segunda é a união de dois ou mais filmes de monocamada por processos de laminação ou coextrusão (LIMA,2020). A vantagem deste tipo de embalagem é que diferentes materiais podem ser combinados para obter um equilíbrio de propriedades que atendam aos requisitos econômicos, ambientais e de conservação (SARANTOPOULOS et al,2002)

As embalagens flexíveis estão presentes tanto nos produtos mais sofisticados quanto nos mais simples e baratos, sendo amplamente difundidas em todos os segmentos de consumo (MOTA,2004). Se destacam pela relação entre embalagem/quantidade de produto e pela flexibilidade que oferecem ao dimensionamento de propriedades como número de camadas que compõem a estrutura, tipos de matérias presentes na estrutura, tipos de resina, espessuras e processo de obtenção do filme (SARANTOPOULOS et al, 2002). A produção de filmes

flexíveis é feita através do processo de extrusão, que consiste na transformação da matéria prima (resina de polímeros granulada) em filme plano, enrolado em bobinas.

3.5 Filmes para embalagens flexíveis

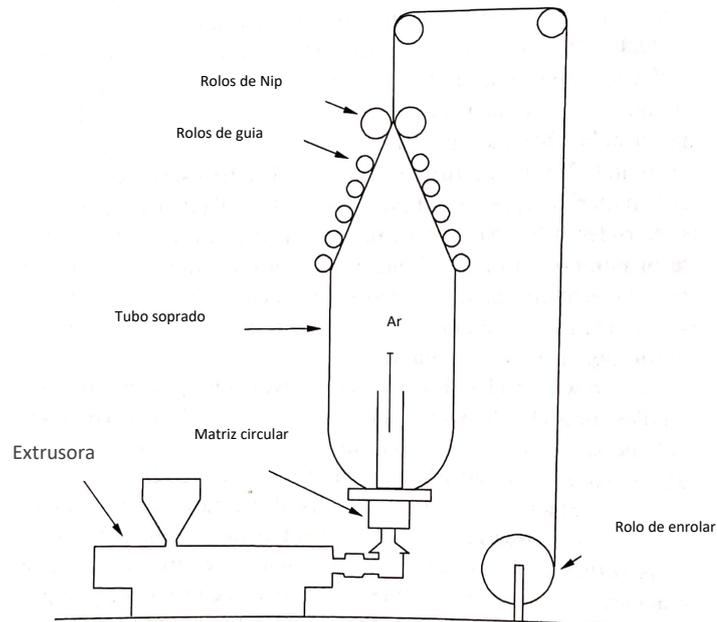
Os principais processos industriais de conversão de materiais termoplásticos utilizam moldagem por calor e pressão e incluem processos como compressão e injeção que permitem a obtenção direta do artefato e calandragem e extrusão, que permite a produção contínua de produtos semiacabados. Somando-se a isso, existem moldagem por sopro e termoformagem que são formados por inflação e gás (ROCHA,2013)

De acordo com Robertson (2016) “a extrusão pode ser definida como forçar continuamente um material fundido por meio de um dispositivo de moldagem”. Faz-se necessário a utilização de pressão para forçar a fusão através de uma matriz, uma vez que a viscosidade dos polímeros fundidos é elevada. A extrusão, atualmente, é um dos mais importantes métodos de processamento de plásticos e a maioria dos plásticos é processada em extrusoras e normalmente passa por duas ou mais extrusoras no caminho do reator químico até o produto final.

O filme soprado é produzido pela extrusão de polímero fundido na forma de um tubo através de uma matriz anular. O ar é injetado no centro da matriz, expandindo o tubo até atingir um diâmetro maior.

Filmes soprados, por processo de extrusora balão, são produzidos pela extrusão de um polímero fundido, na forma de um tubo, através de uma matriz anelar, no centro da qual ar é injetado, inflando o tubo até este atingir um diâmetro maior. É formada então um balão, cujas paredes são estiradas verticalmente por rolos puxadores que se encontram acima da matriz e conseguinte achatam o filme que será bobinado como pode ser observado na Figura 3. (CRIPPA,2006) (MANRINCH,2005).

Figura 3 – Extrusão de filme tubular soprado



Fonte: Adaptado de Robertson (2016)

Defeitos como variações na espessura dos filmes, defeitos da superfície, baixa resistência à tração e ao impacto, bloqueio e enrugamento podem ocorrer no processo de extrusão tubular (ROBERTSON,2016). Na matriz, a largura e a espessura do filme podem ser reguladas por meio da velocidade da extrusora e do tamanho do balão (MANRICH,2005).

As propriedades do filme dependem fortemente do polímero usado e das condições de processamento. Neste aspecto, as propriedades mecânicas dos filmes são geralmente melhores no processo de extrusão por balão e o processo é mais fácil e flexível de operar (ROBERTSON,2016). Sendo assim, a realização de ensaios mecânicos atrelados ao processo produtivo de embalagens pode fornecer informações importantes sobre o desempenho real de embalagens em aplicações práticas e isto ocorre diretamente no processo de extrusão de filmes tubulares.

Há uma infinidade de aplicações de filmes para embalagens flexíveis, dentre elas, neste trabalho será estudado filmes para empacotamento automático, filmes para laminação e filmes termoencolhíveis.

Os filmes para empacotamento automático são ideias para embalar diversos produtos, não só produtos alimentícios. Estes filmes devem apresentar algumas propriedades, independente do material utilizado em sua fabricação, como por exemplo resistência ao rasgo e durabilidade. Durante o envase e manejo do produto e até mesmo no processo logístico é

necessário que o filme apresente resistência a rupturas e rasgos proporcionando segurança e preservando as propriedades do produto embalado (BARRETO, 2016).

Os filmes técnicos podem ser utilizados em diversos tipos de embalagens como por exemplo a laminação. Estes filmes podem ser obtidos em diversas larguras e gramaturas dependendo do tipo de aplicação final. É muito utilizado pela indústria alimentícia devido a presença de características de conservação das propriedades originais do produto como resistência ao oxigênio, barreira à luz e umidade, e segurança à impactos (PINTO,2020).

Os filmes termoencolhíveis (shrink) são filmes de alta resistência para embalar e empacotar diversos tipos de produtos garantindo a segurança. Este tipo de filme pode ser obtido em variadas espessuras e larguras para atender a diferentes necessidades garantindo sempre transparência, impermeabilidade e bastante resistência apesar da flexibilidade (LIGABO,2020)

Neste aspecto, para garantir as principais características destes filmes emprega-se diversas variáveis durante o processo de extrusão com o objetivo de não haver nenhuma perda significativa.

3.6 Variáveis influentes no processo de extrusão de filmes para embalagens flexíveis

Devido ao processo de fabricação, sempre existe a possibilidade de uma certa quantidade de embalagem apresentar defeito. Neste contexto, as inspeções devem ser realizadas para obter embalagens livres de defeitos.

Para que a embalagem flexível desempenhe efetivamente suas funções de contenção e proteção, ela precisa de dimensões consistentes e adequadas à aplicação. Nesse sentido, a espessura deve ser avaliada para determinar a vida de prateleira, propriedades mecânicas e barreira a gases e vapor de água de alguns produtos alimentícios. A variação de espessura causa problemas de desempenho mecânico e perda de barreira, afetando a performance da embalagem (SARANTOPOULOS et al, 2002).

As propriedades mecânicas de um material são as propriedades relacionadas à resposta do material a estímulos mecânicos as quais são importantes para o desempenho ideal da embalagem. Por sua vez, os ensaios mecânicos são métodos empregados para medir tais propriedades com o objetivo de garantir e controlar a qualidade, prever o comportamento do produto, investigar falhas, entre outros (CANEVAROLO JUNIOR, 2006) (SARANTOPOULOS et al, 2002).

A avaliação das propriedades mecânicas pode ser realizada de forma estática ou dinâmica. Por exemplo: propriedades mecânicas como módulo elástico, tensão e deformação são características analisadas sem a ruptura do material. Por outro lado, parâmetros como tensão e deformação a ruptura e resistência ao impacto são propriedades mecânicas determinadas no limite da resistência destrutiva do polímero (CANEVAROLO JUNIOR, 2006).

Além das propriedades mecânicas que garantem o acondicionamento do produto na embalagem, a selagem também é indispensável para que o produto armazenado seja preservado, mantendo suas características físicas e químicas até o momento de abertura. Além disso, todo o percurso até o consumidor final deve ser considerado para garantir que o produto não seja aberto ou rasgado durante o transporte ou manuseio, resultando em perda do produto. Neste sentido, características como a resistência a termossoldagem à tração (Hot Tack) é uma das mais importantes utilizadas em embalagens flexíveis.

A termossoldagem é um processo pelo qual duas estruturas contendo pelo menos uma camada na interface são unidas pela ação combinada de calor e pressão. O *hot tack* ocorre antes do resfriamento do material e está relacionado ao emaranhamento das cadeias poliméricas, à viscosidade e às forças intermoleculares presentes no material (SARANTOPOULOS et al, 2002).

No decorrer deste trabalho serão descritas todas as condições de teste e preparação dos corpos de prova, faixa de temperatura, tempo e pressão para cada análise das características. A discussão sobre a produção de polímeros possui múltiplas dimensões. Ao mesmo tempo em que se requer oferecer um produto com boa qualidade, otimizado favorecendo a sociedade, não obstante, é necessária uma preocupação pela geração de menor volume de resíduos, sem dúvidas uma preocupação com a sustentabilidade.

3.7 Sustentabilidade

Os polímeros utilizados em diferentes embalagens, têm sido um dos grandes problemas da poluição ambiental devido ao grande consumo de produtos industrializados como os alimentos, resultando assim em um elevado volume de resíduos sólidos urbanos ao longo dos últimos anos. (MANRICH, 2000).

Devido ao fato de muitos plásticos não serem biodegradáveis e serem despejados em aterros sanitários, gera-se um acúmulo no ambiente que permanecem durante muitos anos devido às suas propriedades físicas. Os resíduos independentemente de suas variações,

quando descartados de forma incorreta, são considerados um grande desafio para a sustentabilidade.

Com a consciência cada vez maior da necessidade de políticas ambientais para o desenvolvimento e crescimento econômico, a sociedade busca formas de neutralizar os impactos e harmonizar as dimensões social, econômica e ambiental (PEREIRA,2018). O termo sustentabilidade não se refere apenas às questões ambientais, mas a todos os aspectos que afetam as pessoas, incluindo questões econômicas, energéticas, sociais e culturais. Portanto, também pode ser pensado como a capacidade humana de interagir com o mundo (CORREA E HEEMANN,2022).

Para contribuir positivamente com a sustentabilidade, as embalagens devem ser fabricadas a partir de materiais oriundos de fontes ambientalmente corretas, com tecnologias limpas de produção, redução do consumo de matéria-prima, serem recuperáveis após a utilização, além de serem fabricadas, transportadas e recicladas utilizando energia renovável (LANDIM et al,2016). Neste aspecto, a redução de espessura de embalagens flexíveis para alimentos, otimiza a redução de resina utilizada favorecendo os aspectos relacionados à sustentabilidade, ou seja, minimiza o impacto que a embalagem provoca no ambiente, mas mantendo sua funcionalidade garantido segurança e qualidade do produto.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Nesta etapa serão descritos os materiais empregados neste estudo, contudo sem aludir os nomes específicos dos polímeros e suas composições, por questões de confidencialidade.

Para a realização da pesquisa utilizou-se três tipos de filmes extrusados para segmentos diferentes da indústria de alimentos. Para fins comparativos, empregou-se filmes de polietileno com redução de espessura bem como o mesmo filme padrão, sem redução de espessura. A Tabela 3 apresenta a composição, de uma forma genérica, dos filmes em estudo assim como as dimensões dos filmes.

Tabela 3 – Características dos filmes estudados

/Tipo de filme	Filme termoencolhíveis (shrink)	Filme para empacotamento automático	Filme para laminação
Propriedades			
Dimensões tradicional	540x0,060mm	360x0,042mm	890x0,024mm
Dimensões com redução de espessura	540x0,050mm	360x0,038mm	890x0,022mm
Composição	A% PELBD B% PEBD C% PEAD Aditivos	A% PELBD B% PEBD C% PEAD Aditivos	A% PELBD B% PEBD Aditivos

Fonte: Da Autora (2022).

4.2 Métodos

4.2.1. Processo de extrusão

Os filmes obtidos foram extrusados em processo tubular no qual são estirados longitudinalmente e transversalmente o que possibilita uma melhor resistência mecânica à embalagem flexível. Controlando-se a velocidade de extrusão e o tamanho do balão é possível

controlar a largura e a espessura dos filmes. O equipamento utilizado para a obtenção dos filmes estudados é representado pela Figura 4. Este tipo de equipamento pode obter filmes em até nove camadas.

Figura 4 – Extrusora de filme tubular



Fonte: Da Autora (2022).

4.2.2 Análises das propriedades mecânicas

4.2.2.1 Espessura

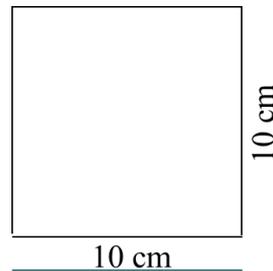
Para cada amostra analisada foram retirados corpos de prova utilizando um gabarito de dimensão (10x10cm), representado pela Figura 6. A análise é feita utilizando um espessímetro, representado pela Figura 5, no qual é realizada média aritmética de dez pontos aleatórios sobre a superfície do filme

Figura 5 – Equipamento de análise de espessura



Fonte: Da Autora (2022)

Figura 6 – Representação do corpo de prova para análise de espessura

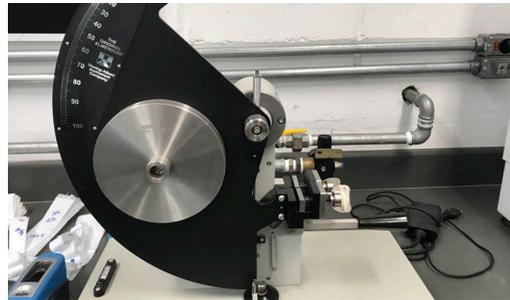


Fonte: Da Autora (2023)

4.2.2.2 Resistência ao rasgo

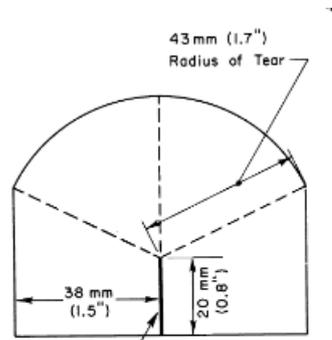
Para esta análise, utilizou-se a norma ASTM D1922. Os corpos de prova foram cortados com gabarito no sentido DM (direção de máquina) e no sentido DT (direção transversal) das amostras, como apresentado na Figura 8. As amostras foram submetidas ao teste elemendorf, por meio do equipamento do tipo pêndulo representado pela Figura 7, com o intuito de determinar a força requerida para ocorrer o rasgo do filme.

Figura 7 – Equipamento para análise de resistência ao rasgo



Fonte: Da Autora (2022).

Figura 8 – Representação do corpo de prova para análise de resistência ao rasgo



Fonte: ASTM D1922.

4.2.2.3 Módulo

A análise de módulo determina a força necessária para o rompimento do filme. Para isso usou-se a norma ASTM D882. Também se utilizou corpos de provas na direção DM e corpos de prova na direção DT seguindo o gabarito. As amostras foram posicionadas e esticadas no centro da máquina de ensaio, representada pela Figura 9, sempre travados com ar comprimido.

Figura 9 – Equipamento INSTRON para análise de módulo, alongamento e tração



Fonte: Da Autora (2022).

Figura 10 – Corpo de prova para análise de módulo, alongamento e tração



Fonte: LIGABO (2020).

4.2.2.4 Tensão de ruptura e alongamento

Para esta análise também se faz uso da ASTM D882, bem como corpos de provas na DM e DT. Este ensaio realiza a análise da tensão de ruptura da solda, sendo assim, antes do teste as amostras foram seladas e em seguidas colocadas no equipamento INSTRON, apresentado anteriormente na Figura 9, de modo que que a solda ficasse posicionada no centro. Para a obtenção dos dados foram realizadas três medidas para obter a média dos resultados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos em laboratório, para avaliação das propriedades mecânicas dos filmes obtidos e da viabilidade da redução de espessura de embalagens flexíveis para alimentos. Ressalta-se que para a obtenção dos filmes com redução de espessura foi realizado um ajuste na formulação para compensar perdas.

5.1 Filmes para laminação

O filme referência de embalagens para laminação apresenta uma espessura de 28 micrometros e a espessura a ser obtida após a redução é de 25 μm . A tabela 3 e 4, apresenta os resultados obtidos dos ensaios realizados em laboratório para os filmes referência e com redução de espessura

Tabela 3 – Resultados obtidos para espessura de filmes para laminação

Filme para Laminação		
Valores teóricos	24 μm	22 μm
Valores reais	28 μm	25 μm

Fonte: Da Autora (2023).

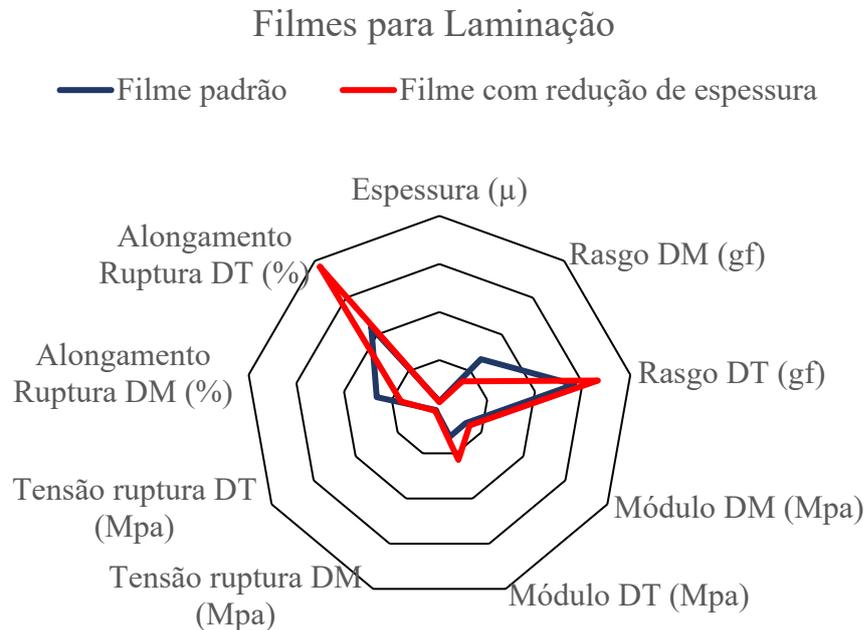
Tabela 4 – Resultados obtidos de filmes para laminação

Filme para Laminação		
Propriedades mecânicas	Filme 28 μm	Filme 25 μm
Rasgo (gf) - DM	266,6	146
Rasgo (gf) - DT	565	664
Módulo (Mpa) - DM	124,4	143,54
Módulo (Mpa) - DT	126,3	228,89
Tensão ruptura (Mpa) - DM	24,19	28,84
Tensão ruptura (Mpa) - DT	16,14	21,55
Alongamento Ruptura (%) - DM	263,33	161,7
Alongamento Ruptura (%) - DT	438,11	767,81

Fonte: Da Autora (2023).

Com os dados obtidos no projeto, foi possível gerar o Gráfico 1, para melhor observação das diferenças de propriedades do filme referência de 28 μm versus filme com redução de espessura de 25 μm .

Figura 11 – Análise das propriedades mecânicas de filmes para laminação



Fonte: Da Autora (2023).

Em relação à espessura, foi feita uma redução de 12% em seu valor. Como filmes para laminação são produtos com elevada complexidade técnica, a redução de espessura tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas do filme, por isso optou-se pela redução de apenas 3 micras a fim de minimizar as perdas em propriedades.

Com relação à resistência ao rasgo, é possível observar que houve uma pequena diminuição na direção de estiramento do filme (DM) e aumento na direção transversal (DT), as propriedades de alongamento apresentaram o mesmo comportamento. No que diz respeito à rigidez do material, representada pelo módulo secante, é possível observar que houve aumento em ambas as direções DM e DT, a tensão na ruptura teve um pequeno incremento na DM e na DT.

As mudanças nos valores das propriedades de resistência ao rasgo e alongamento podem ser explicadas devido à diferença de formulação entre as propostas de filme. Para o filme de 25 μm , há uma redução no teor de polietileno de alta densidade (PEAD) e aumento de polietileno linear de baixa densidade (PELBD), buscando compensar as propriedades mecânicas que são comprometidas com a redução de espessura. Desta forma, o filme tem maior tendência ao alongamento e apresenta maior resistência ao rasgamento na direção

transversal (DT). Isso se explica devido à diferença de estrutura química entre o PELBD e o PEAD. O PELBD possui pequenas ramificações de cadeia que limitam a cristalização. A cristalinidade mais baixa em comparação com o PEAD torna o material menos duro e permite maior alongamento.

Na direção de máquina, os valores de alongamento e resistência ao rasgo estão menores, pois o estiramento na direção de máquina gera uma orientação do polietileno neste sentido, facilitando o rasgo. Como a espessura está reduzida em 12% é preciso empregar menos força para rasgar o filme na direção de orientação (DM), o que reflete também em menor alongamento nesta direção.

O pequeno aumento no módulo em ambas as direções está relacionado com a utilização de resinas de PELBD de alta performance desenvolvidas pelas petroquímicas para conferir propriedades de rigidez e alta resistência ao impacto, estas resinas de polietileno produzidas com catalisadores especiais apresentam um valor de densidade mais elevado, o que contribui para manter a rigidez em projetos de redução de espessura. Dessa forma, ao reduzir o teor de HDPE não há prejuízo no valor de módulo secante, mantendo as propriedades de rigidez requeridas para a embalagem.

Avaliando os valores de tensão de ruptura, verificou-se um ligeiro aumento na DM e na DT, o que pode ser explicado pela redução de PEBD na formulação. Em projetos de redução de espessura, o PEBD, assim como o PEAD, acaba prejudicando as propriedades mecânicas, desta forma, é comum reduzir o uso destes materiais e priorizar maior percentual de PELBD. O PELBD por ter maior densidade e cadeias com ramificações curtas apresenta maior resistência à tração, o que resulta em maior tensão na ruptura.

Pode-se perceber com os dados da Tabela 1 e pela análise do gráfico da Figura 11, que as propriedades rasgo DT., módulo DM e DT, tensão de ruptura DM e DT, alongamento D.T foram melhoradas, enquanto somente o rasgo na DM sofreu decréscimo. Através da análise desses resultados é possível observar que a redução de espessura em 12% neste caso não afetou significativamente as propriedades mecânicas do filme, dessa forma, é possível concluir que algumas embalagens podem ser redesenhadas para um modelo mais sustentável sem comprometer sua funcionalidade.

5.2 Filmes termoencolhíveis

Para embalagem usando filmes termoencolhíveis, a espessura do filme de referência é de 61 μm e a espessura alcançada após a redução foi de 47 μm . As tabelas 5 e 6 mostram os resultados dos testes de laboratório dos filmes de referência e de redução.

Tabela 5 – Resultados obtidos para espessura de filmes termoencolhíveis

Filme termoencolhíveis		
Valores teóricos	60 μm	50 μm
Valores reais	61 μm	47 μm

Fonte: Da Autora (2023).

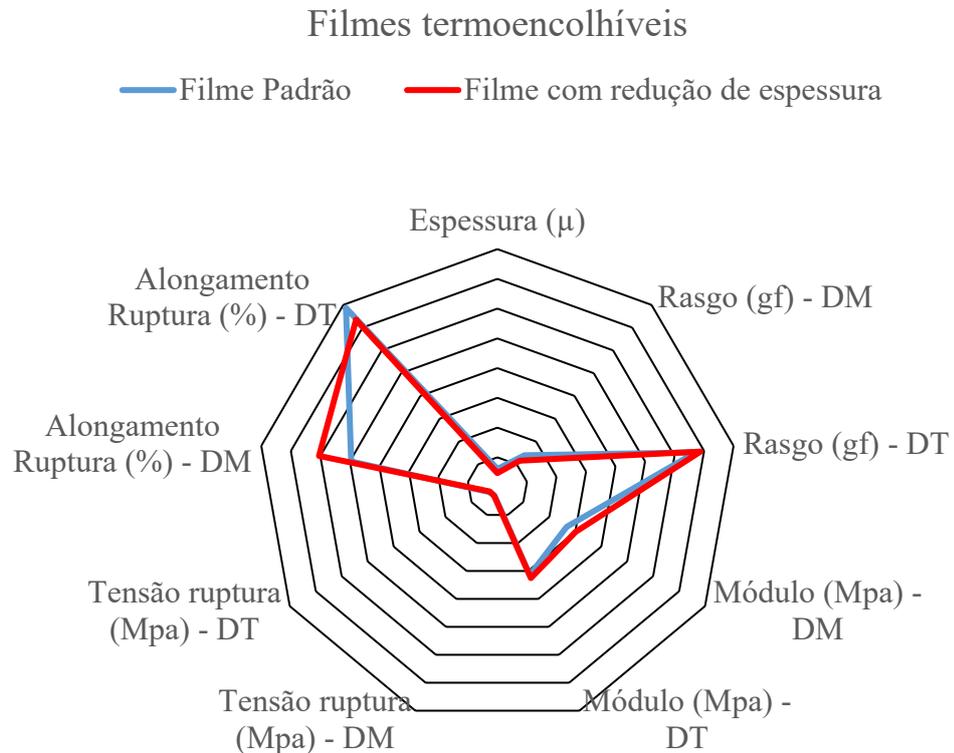
Tabela 6 – Resultados obtidos de filmes termoencolhíveis

Filme termoencolhíveis		
Propriedades mecânicas	Filme 61 μm	Filme 47 μm
Rasgo (gf) - DM	140	116
Rasgo (gf) - DT	672	688
Módulo (Mpa) - DM	267,22	300,92
Módulo (Mpa) - DT	314,52	325,59
Tensão ruptura (Mpa) - DM	29,43	31,54
Tensão ruptura (Mpa) - DT	32,46	29,45
Alongamento Ruptura (%) - DM	495,58	604,47
Alongamento Ruptura (%) - DT	786,14	733,92

Fonte: da Autora (2023).

Com base nos dados adquiridos, pode-se gerar o gráfico apresentado na Figura 12 para uma melhor visualização da diferença das propriedades do filme padrão (referência) em relação ao filme de espessura reduzida.

Figura 12 – Análise das propriedades mecânicas de filmes termoencolhíveis



Fonte: Da Autora (2023).

De forma visual, pode-se observar uma semelhança entre os resultados obtidos havendo sobreposição das curvas em muitas propriedades, evidenciando um comportamento extremamente representativo em relação aos resultados numéricos apresentados na Tabela 6.

Em relação à espessura, foi aplicada uma redução de 22%. Dado que os filmes termoencolhíveis necessitam de uma alta retenção para evitar o desalinhamento do produto e a unitização durante o processo no cliente, é necessário um aumento do percentual de polietileno de linear de baixa densidade (PELBD) que apresenta maior densidade e ramificações curtas, a fim de garantir um impacto insignificante nas propriedades mecânicas.

Em termos de resistência ao rasgo, observou-se uma ligeira diminuição na direção de estiramento (DM) e um aumento na direção transversal (DT) do filme, enquanto as propriedades de alongamento e tensão na ruptura apresentaram comportamento oposto, aumento na direção DM e redução na direção DT. Em relação ao módulo, pode-se observar que há um aumento tanto na direção DM quanto na direção DT.

Os filmes com menor espessura necessitam de uma maior rigidez, sendo assim, bem como os filmes para laminação, o aumento do módulo em ambas as direções é relacionado ao uso do polietileno linear de baixa densidade (PELBD). Para compensar a diminuição do percentual de PEAD, cuja responsabilidade é a força de retenção dos pacotes, ocorre um aumento do teor de PELBD. O módulo aumenta linearmente com a densidade, então mudanças no processamento do filme que aumentam a densidade e a cristalinidade também aumentam o módulo e a rigidez do polímero.

Avaliando-se a tensão na ruptura em termos de comparativos numéricos, verificou-se um ligeiro aumento na DM e um decréscimo na direção DT. Isto ocorre por efeito do percentual elevado de polietileno de alta densidade presente na estrutura, uma vez que, a quantidade elevada de ramificações do PEAD e sua baixa cristalinidade aumenta a tensão na ruptura, devido o material tornar-se mais rígido. Este mesmo comportamento, aumento na DM e diminuição na DT, ocorre com o alongamento, apresentando um comportamento inesperado, visto que para filmes com redução de espessura espera-se que à medida que o módulo aumente há um decréscimo do alongamento. Possivelmente isso se deve ao fato de outras características além da redução de espessura dos polietilenos, como por exemplo razão de sopro da extrusora ou presença de defeitos na superfície, uma vez que pioram as propriedades mecânicas fragilizando o filme. Sendo assim, é necessário a avaliação de mais corpos de prova.

Devido a redução da espessura em 22% é necessário aplicar uma força menor para rasgar o filme na direção de máquina (DM), o que pode ser observado pelos valores numéricos menores de resistência ao rasgo. Nesta direção, da mesma forma para o filme de laminação, há uma orientação do polietileno facilitando o rasgo.

Em suma, por meio das análises dos resultados numéricos da Tabela 6 e da Figura 12, a porcentagem elevada de redução de espessura se mostrou significativa à algumas propriedades mecânicas, enquanto somente no alongamento sofreu uma alteração.

5.3 Filmes para empacotamento automático

O filme referência para empacotamento automático apresenta uma espessura de 42 μm e reduziu-se a espessura em 6% obtendo um valor de 39,5 μm . As tabelas 7 e 8 apresentam os resultados numéricos obtidos em laboratório para as análises das propriedades mecânicas.

Tabela 7 – Resultados obtidos para espessura de filmes para empacotamento automático

Filme para empacotamento automático		
Valores teóricos	42 μm	38 μm
Valores reais	42 μm	39,5 μm

Fonte: Da Autora (2023).

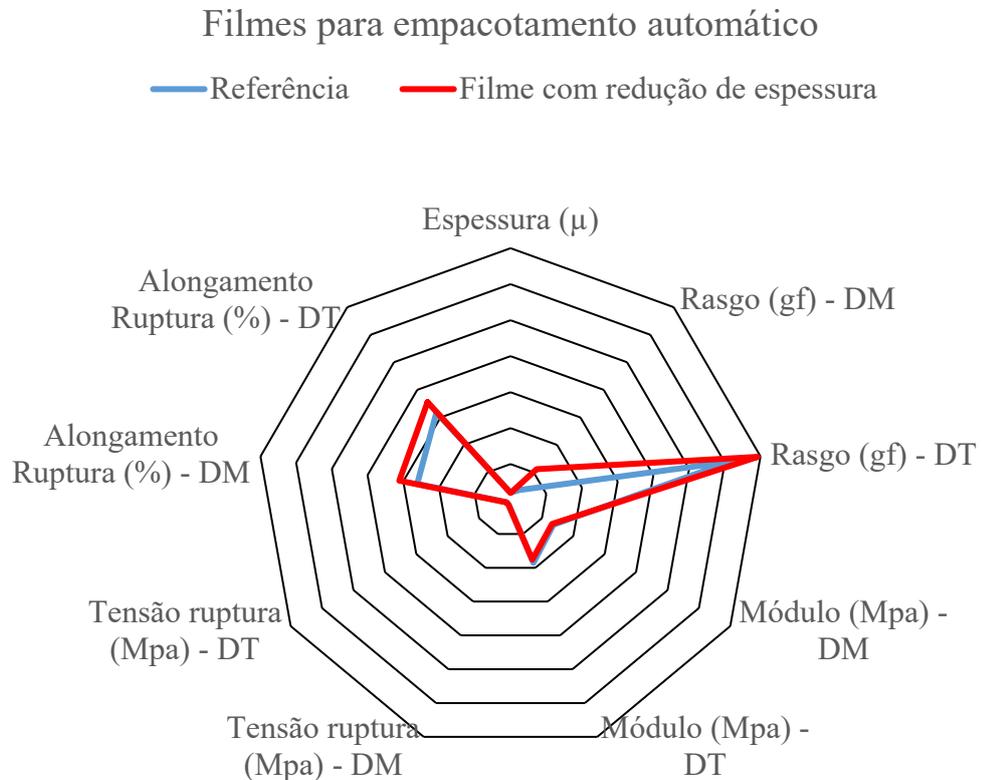
Tabela 8 – Resultados obtidos de filmes para empacotamento automático

Filme para empacotamento automático		
Propriedades mecânicas	Filme 42 μm	Filme 39,5 μm
Rasgo (gf) - DM	72,8	224
Rasgo (gf) - DT	1232	1384
Módulo (Mpa) - DM	273,06	264,42
Módulo (Mpa) - DT	370,66	352,17
Tensão ruptura (Mpa) - DM	27,63	29,1
Tensão ruptura (Mpa) - DT	23,63	24,9
Alongamento Ruptura (%) - DM	522,25	622,81
Alongamento Ruptura (%) - DT	635,25	711,14

Fonte: da Autora (2023).

Diante dos resultados obtidos na Tabela 7 e 8 é possível obter o gráfico apresentado na Figura 13 para uma análise visual das propriedades mecânicas do filme referência versus filme com espessura reduzida.

Figura 13 – Análise das propriedades mecânicas de filmes para empacotamento automático



Fonte: Da Autora (2023).

Qualitativamente e quantitativamente pelas análises da Tabela 8 e do gráfico da Figura 13, é notório melhoria nas propriedades mecânicas proporcionando um comportamento expressivo para o filme com redução de espessura.

Os filmes para empacotamento automático, assim como os de laminação, são de complexidade técnica devido à necessidade de excelentes propriedades de resistência ao impacto (*drop test*) e selagem. Para tal, há uma redução do polietileno de alta densidade (PEAD) e um aumento no percentual de polietileno linear de baixa densidade (PELBD).

Este acréscimo no teor de PELBD é dado por incremento de resinas de alto impacto, que apresentam elevada densidade devido à presença de ramificações curtas que limitam a cristalinidade apresentando uma maior mobilidade das cadeias, o que reflete diretamente nas propriedades de alongamento, tensão na ruptura e rasgo. Essa relação direta é observada pela Tabela 8, na qual em ambas as direções, DM e DT, há um aumento no rasgo, na tensão a ruptura e alongamento.

O módulo apresentou um decréscimo de 3% na direção de máquina (DM), e um decréscimo de 5% na direção transversal (DT), o que pode ser explicado pelo aumento do PELBD. Sendo assim, em termos práticos, não houve variação significativa nas propriedades de módulo do filme com redução de espessura se assemelhando ao filme referência, devido a garantia de melhoria nas outras propriedades mecânicas que são importantes para a embalagem final.

Considerando a finalidade e aplicação do filme, nota-se uma melhora nas propriedades mecânicas, não havendo variação significativa no filme de espessura reduzida. Sendo assim, a estrutura de algumas embalagens pode ser reestruturada sem afetar sua funcionalidade.

6. CONCLUSÃO

Em análise quantitativa referente ao teste de redução de espessura e avaliação das propriedades mecânicas dos filmes de polietileno para embalagens alimentícias é evidente que os filmes necessitam de uma maior rigidez para garantir o acondicionamento do material. Esse resultado é esperado, em vista da redução de polietileno de alta densidade (PEAD) e o aumento de polietileno linear de baixa densidade (PELBD).

A partir das análises realizadas, fica evidente que a presença de PELBD na estrutura do filme traz uma melhora nas propriedades mecânicas uma vez que, o polietileno linear de baixa densidade apresenta pequenas ramificações que limitam a cristalização e conseqüentemente tornam o material menos dura e permite maior alongamento. Portanto, reduzir o teor de HDPE não resulta em perda de valores de módulo secante, mantendo as propriedades de rigidez necessárias para embalagem.

Considerando-se as estruturas das embalagens e as aplicações do produto, propriedades mecânicas aprimoradas são vantajosas, pois significam melhor resistência do material às condições de fabricação interna. Para os clientes, isso significa que o produto é mais resistente às condições de armazenamento e manuseio, como queda durante o armazenamento ou estiramento durante a fabricação.

Desta forma, o projeto de redução de espessura torna-se viável tecnicamente, pois não impacta diretamente na produtividade do cliente mantendo as propriedades mecânicas do filme com redução de espessura próximas dos filmes referência e é possível obter um filme mais sustentável sem comprometer sua funcionalidade.

Para futuros estudos existem algumas possibilidades de melhorias e análises dentro determinados segmentos de mercado. Alternativamente, pode-se avaliar visualmente os filmes analisando as propriedades ópticas por meio de microscopia, avaliar as condições de processabilidade dos filmes como temperatura de extrusão, razão de sopro e camadas dos filmes alterando essas variáveis, bem como uma análise estatística de todos os dados por meio de superfície de resposta com o intuito de avaliar a interferência das propriedades na aplicação final.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, Mayra Fernanda. **Avaliação da eficiência de filmes multicamadas após a termoformagem para uso em embalagens do tipo cook in para presunto**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

ANVISA. **Resolução RDC nº 259, de 20 de setembro de 2002. Aprova o Regulamento Técnico sobre Rotulagem de Alimentos Embalados**. Ministério da Saúde - MS. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Anvisa. Disponível em <http://www.anvisa.gov.br>. Acesso em: 27 maio. 2023.

ANYADIKE, Nnamdi. **Embalagens flexíveis**. Editora Blucher, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DO PLÁSTICO, ABIPLAST. **Perfil 2019**. 2019. Disponível em: http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil2019_web_abiplast.pdf. Acesso em: 05 out 2022.

Associação Brasileira de Embalagens – ABRE, 2021. **Estudo macroeconômico da embalagem e cadeia de consumo**. São Paulo. Disponível em <https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2020-2/>. Acesso em 05 out. 2022

BARÃO, Mariana Zanon. **Embalagens para produtos alimentícios**. Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR, 2011.

BARBOSA, L. A., DREGER, A. A., SCHNEIDER, E. L., MORISSO, F. D. P., & SANTANA, R. M. C. **Polietileno de baixa densidade-PEBD: mercado, produção, principais propriedades e aplicações**. Revista Espacios, v. 38, n. 17, p. 1-13, 2017.

BARRETO, Luíza Burns. **Correlação estrutura-propriedade de blendas PEBDL/PEUDDL com ênfase na propriedade de selagem**. 2016.

BECKER, Márcia Regina. **Preparação e avaliação das propriedades de misturas de polietileno de baixa densidade com polietileno linear de baixa densidade**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2002.

BLASS, Arno. **Processamento de polímeros**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2ª edição. Florianópolis. Ed da UFSC, 1988. 313p.

BONA, Jaqueline Ceolin de. **Preparação e caracterização de filmes biodegradáveis a partir de blendas de amido com polietileno**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, 2007.

CAMILO, Assunta Napolitano. **Embalagens flexíveis**. Baureri, SP: INSTITUTO DE EMBALAGENS, 2011. 398 p, 2016.

CANEVAROLO JUNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2ª ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CORRÊA, Maria Eugenia; HEEMANN, Adriano. **Proposta de substituição de copos plásticos descartáveis em fábrica de grande porte**, 2022.

COUTINHO, Fernanda; MELLO, Ivana L.; SANTA MARIA, Luiz C. de. **Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações**. Polímeros, v. 13, p. 01-13, 2003.

CRIPPA, Agnaldo. **Estudo do desempenho de filmes multicamadas em embalagens termoformadas**. Pós Graduação em Engenharia de Ciência dos Materiais. Paraná, Universidade Federal do Paraná, v. 151, 2006.

EBNESAJJAD, Sina (Ed.). **Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: properties, processing and applications**. William Andrew, 2012.

ELIAS, Marcelo Brasil. **Desempenho de filmes soprados multicamada de blendas de polipropileno e copolímeros de etileno**. 2011. Universidade Federal de São Carlos. Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

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**. Dissertação Mestrado, UFRGS, 2012.

FREIRE, M. T. de A., REYES, F. G. R., KUZNESOF, P. M., & VETTORAZZI, G.. **Aspectos de legislação do mercado internacional de embalagens plásticas para alimentos**. Polímeros, v. 8, p. 42-52, 1998.

GARCIA, Eloísa. **A evolução da família dos polietilenos**. Informativo CETEA: Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens, v. 14, n. 1, p. 5-7, 2002.

GEYER, Roland; JAMBECK, Jenna R.; LAW, Kara Lavender. **Production, use, and fate of all plastics ever made**. Science advances, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

HAGE JR, Elias. **Aspectos Históricos sobre o Desenvolvimento da Ciência e da Tecnologia de Polímeros**. Polímeros, v. 8, p. 6-9, 1998.

HOSLER, Dorothy; BURKETT, Sandra L.; TARKANIAN, Michael J. **Prehistoric polymers: rubber processing in ancient Mesoamerica**. Science, v. 284, n. 5422, p. 1988-1991, 1999.

HOSLER, Dorothy; BURKETT, Sandra L.; TARKANIAN, Michael J. **Prehistoric polymers: rubber processing in ancient Mesoamerica**. Science, v. 284, n. 5422, p. 1988-1991, 1999.

IUPAC. **International Union of Pure and Applied Chemistry**, 2013. Disponível em: <<https://iupac.org/>>. Acesso em: 05 out. 2022.

JORGE, Neuza. Embalagens para alimentos. São Paulo: Cultura Acadêmica, 194 p., 2013. Disponível em: <<http://www.santoandre.sp.gov.br/pesquisa/ebooks/360234.PDF>>. Acesso em: 12 abr 2023.

LANDIM, A. P. M., BERNARDO, C. O., MARTINS, I. B. A., FRANCISCO, M. R., SANTOS, M. B., & MELO, N. R. De. **Sustentabilidade quanto às embalagens de alimentos no Brasil**. Polímeros, v. 26, p. 82-92, 2016.

LARA, Bruna Rage Baldone et al. **Morphological, mechanical and physical properties of new whey protein isolate/polyvinyl alcohol blends for food flexible packaging.** Food Packaging and Shelf Life, v. 19, p. 16-23, 2019.

LIGABO, Diego dos Santos Guedes. **Estudo de caso sobre a influência do uso de polietileno linear de baixa densidade em filmes termoencolhíveis em empresa de embalagens flexíveis.** Instituto de Macromoléculas Prof. Eloisa Mano. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Pós-graduação em Processamento de Plásticos e Borrachas, 2020.

LIMA, Bruna Felizardo de. **Estudo das propriedades mecânicas das embalagens flexíveis de polietileno com aditivo oxi-biodegradável.** Engenharia Química-Tubarão, 2020.

LUCAS, E. F.; SOARES, B. G.; MONTEIRO, E. **Caracterização de polímeros: determinação de peso molecular e análise térmica.** Editora E-papers Serviços Editoriais. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, p. 151-323,, 2001.

LUÍS, Vânia Sofia Ferrás. **Embalagens Flexíveis: estudo do processo de reticulação de adesivos e do coeficiente de atrito.** Tese de Doutorado. Instituto Politecnico do Porto (Portugal), 2013.

MANRICH, Sati. **Estudos em reciclagem de resíduos plásticos urbanos para aplicações substitutivas de papel para escrita e impressão.** Polímeros, v. 10, p. 171-178, 2000.

MANRICH, Silvio. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes.** São Paulo: Artliber Editora, 2005.

MELO, Patrícia Maria Alves de. **Compósitos particulados de polietileno de alta densidade e concha de molusco: efeito do teor e da granulometria.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013.

MIRANDA SILVA, Elson; FILHO, Severino Leopoldino Urtiga. **Desenvolvimento de um equipamento para ensaios em embalagens plásticas flexíveis.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

MORGHETI, Andreza Mariot. **Estudo das propriedades mecânicas do filme de polipropileno à partir da adição de diferentes porcentagens de elastômero.** Engenharia Química. Tubarão - SC, 2019.

MOTA, Lílian Rosa. **Controle de qualidade de embalagens flexíveis para biscoitos.** Goiás: Universidade Católica de Goiás, 2004.

NATARELLI, Caio Vinicius Lima; OLIVEIRA, Juliano Elvis; MATTOSO, Luiz Henrique Capparelli; SANTOS, Mayara de Oliveira. **Introdução aos Materiais Poliméricos**, p. 49 -90. In: Nanotecnologia Aplicada a Polímeros. São Paulo, 2022.

PEACOCK, Andrew. **Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications.** CRC press, 2000.

PEREIRA, Caio Henrique do Ó. **Misturas de PP/Resíduos de tecido de big bag.** 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Programa de Pós-Graduação

em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2018.

PIATTI, Tania Maria; RODRIGUES, Reinaldo Augusto Ferreira. **Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais**. Maceió: Edufal, p. 51, 2005.

PINTO, Miguel Ângelo Lima. **Desenvolvimento de laminados de celulose/zeína para embalagem alimentar**. Tese de Doutorado, 2020.

ROBERTSON, Gordon L. **Food packaging: principles and practice**. CRC press, 2016.

ROCHA, Patricia Mara de Freitas. **Estudo das propriedades do filme stretch produzido com polietileno linear de baixa densidade**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2013.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L. et al. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. Campinas: CETEA/ITAL, v. 1, p. 267, 2002.

SILVEIRA, Mauro Ricardo da Silva. **Funcionalização do polietileno linear de baixa densidade para promover adesão**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2012.

SPALDING, Mark A.; CHATTERJEE, Ananda (Ed.). **Handbook of industrial polyethylene and technology: Definitive guide to manufacturing, properties, processing, applications and markets set**. John Wiley & Sons, 2017.

TWEDE, Diana; GODDARD, Ron. **Materiais para embalagens**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 171 p.

VASILE, Cornelia; PASCU, Mihaela. **Practical guide to polyethylene**. iSmithers Rapra Publishing, 2005.