

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**VIVIAN SEGANTINI SANCHES**

**ANÁLISE DO TEOR DE AGENTE DESLIZANTE E A INFLUÊNCIA DA  
TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO EM FILMES FLEXÍVEIS  
PARA EMBALAGENS**

**LONDRINA  
2022**

**VIVIAN SEGANTINI SANCHES**

**ANÁLISE DO TEOR DE AGENTE DESLIZANTE E A INFLUÊNCIA DA  
TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO EM FILMES FLEXÍVEIS  
PARA EMBALAGENS**

**Analysis of slip agent content and the influence of processing temperature on  
flexible packaging films.**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel de Engenharia de Materiais da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Joice Erica Motezuki

**LONDRINA  
2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento do trabalho, mesmo para fins comerciais, sem a possibilidade de alterá-lo, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**VIVIAN SEGANTINI SANCHES**

**ANÁLISE DO TEOR DE AGENTE DESLIZANTE E A INFLUÊNCIA DA  
TEMPERATURA DE PROCESSAMENTO EM FILMES FLEXÍVEIS  
PARA EMBALAGENS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia de Materiais da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 07 de dezembro de 2022

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Joice Erica Motezuki  
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais  
Professora do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais – UTFPR-LD  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Elisângela Corradini  
Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais – UTFPR-LD  
Professora do Departamento de Engenharia de Materiais  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup>. Fabio Cezar Ferreira  
Doutorado em Química (Físico-Química)  
Professor do curso de Licenciatura em Química – UTFPR-LD  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”.

**LONDRINA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por sempre abençoar meu caminho, me permitindo viver momentos únicos dentro e fora da universidade.

Agradeço meus pais, Siomara e Paulo, e à minha irmã e meu cunhado, Laura e Felipe, por sempre me concederem o apoio necessário para cursar esses anos de faculdade e todas as outras experiências que tive até aqui.

Agradeço meu namorado e sua família, que propiciaram suporte tanto para ele quanto para mim.

Meus agradecimentos também aos amigos e amigas que fiz durante a faculdade e compartilhei momentos de alegria e preocupação, a minha professora orientadora Joice Motezuki por compartilhar seu conhecimento comigo, aos professores que tive aula ao longo da graduação e foram fundamentais para eu chegar até aqui como engenheira de materiais e aos servidores da UTFPR.

Tenho muita sorte por ter cruzado meu caminho com vocês ao longo da faculdade. Muito obrigado!

### Oração da Serenidade

Deus, concedei-me a serenidade  
Para aceitar as coisas que não posso modificar,  
Coragem para modificar aquelas que posso,  
E sabedoria para perceber a diferença.

## RESUMO

Os filmes flexíveis poliméricos são responsáveis por grande parte do mercado de transformação do plástico, e compõem uma gama de produtos muito presente na vida da população, como sacolas, embalagens de alimentos e materiais descartáveis. Com o objetivo de facilitar o deslizamento dos filmes na produção, agentes deslizantes são adicionados à extrusão para que o coeficiente de fricção (COF) dos filmes seja baixo o suficiente para se ter uma boa produtividade. O objetivo desse trabalho ao analisar o teor de agente deslizante e a influência da temperatura de processamento em filmes flexíveis para embalagens é entender como a migração desse tipo de aditivo para a superfície do material pode afetar o seu comportamento pós processamento. Para caracterizar a superfície do filme, foi utilizado a medida do ângulo de contato pela gota séssil em seis amostras diferentes, variando entre elas a porcentagem de aditivo (0% como referência, 2% e 4%) e a temperatura de processamento (190°C e 220°C em média), e concluiu-se que ao trabalhar com um perfil de temperaturas de extrusão um pouco mais elevado e com uma concentração maior de agente deslizante, podemos obter um filme com maior estabilidade dimensional e melhor processabilidade. Entretanto, em termos de redução de custo, observa-se que é possível aditivar com 2% de agente deslizante e obter valores de COF relativamente baixos, podendo-se aumentar tanto a janela de processamento por extrusão quanto a maquinabilidade de filmes flexíveis.

Palavras-chave: filmes flexíveis, polímeros, agente deslizante, ângulo de contato, temperatura de processamento.

## ABSTRACT

Flexible polymeric films are responsible for a large part of the plastic transformation market and make up a range of products that are very present in people's lives, such as bags, food packaging and disposable materials. In order to facilitate the sliding of the films in production, slip agents are added to the extrusion so that the coefficient of friction (COF) of the films is low enough to have a good productivity. The objective of this work, when analyzing the sliding agent content and the influence of the processing temperature in flexible packaging films, is to understand how the migration of this type of additive to the surface of the material can affect its post-processing behavior. To characterize the surface of the film, the measurement of the contact angle by the sessile drop in 06 different samples was used, varying between them the percentage of additive (0% as reference, 2% and 4%) and the processing temperature (190°C and 220°C on average), and it was noticed that when working with a slightly higher profile of extrusion temperatures and with a higher concentration of slip agent, we can obtain a film with greater dimensional stability and better processability. However, in terms of cost reduction, it is observed that it is possible to add 2% of slip agent and obtain relatively low COF values, being able to increase both the extrusion processing window and the machinability of flexible films.

Keywords: flexible films, polymers, slip agent, contact angle, processing temperature.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de embalagens com filmes poliméricos flexíveis.....	16
Figura 2 - Desempenho da indústria brasileira de embalagens flexíveis em 2020 em segmento. ....	17
Figura 3 - Valor bruto da produção por segmento em bilhões de reais em 2021. ....	17
Figura 4 - Representação da configuração estereoespecíficas do PP: (a) Isotático; (b) Sindiotático; (c) Atático.....	20
Figura 5 - Componentes de uma máquina extrusora de rosca única.....	22
Figura 6 - Difusão da amida para a superfície ao longo do tempo. ....	23
Figura 7 - Estrutura química da Erucamida. ....	24
Figura 8 - Definição do ângulo de contato entre uma gota líquida e uma superfície plana e horizontal. ....	25
Figura 9 - Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e correspondentes valores de ângulo de contato.....	25
Figura 10 - Fluxograma do procedimento experimental utilizado nesse trabalho. ....	28
Figura 11 - Matriz plana no início da extrusão de limpeza.....	30
Figura 12 - Extrusora monorosca utilizada no trabalho.....	31
Figura 13 - Bobinador utilizado para embobinar o filme extrusado. ....	31
Figura 14 - Goniômetro de ângulo de contato que será utilizado no trabalho. .	32
Figura 15 - Sistema utilizado para medição do ângulo de contato, composto por micropipeta, suporte com garra e goniômetro. ....	32
Figura 16 - Micrômetro em uso. ....	33
Figura 17 - Interfaceamento para cálculo de COF. ....	33
Figura 18 - Temperaturas configuradas e reais em cada zona do perfil de 190°C. ....	34
Figura 19 - Temperaturas configuradas e reais em cada zona do perfil de 220°C. ....	34
Figura 20 - Diferença do aspecto entre as laterais do filme extrusado. ....	36
Figura 21 – Exemplo de disposição da fita dupla face, da amostra e da micropipeta em relação a base do goniômetro. ....	36
Figura 22 - Resultado no goniômetro da amostra 3 com 0% de aditivo extrusada a 220°C.....	37
Figura 23 - Gabaritos e estilete utilizados para cortar amostras para COF. ....	38
Figura 24 - Fixação da amostra no Interfaceamento.....	38
Figura 25 - Manchas de aspecto “molhado” logo após a saída do material da matriz.....	44
Figura 26 - Manchas com aspecto "molhado" ao longo do embobinamento do filme.....	45
Figura 27 - Aspecto visual das bobinas extrusadas com perfil de temperatura de 190°C.....	46



<b>Figura 28 - Aspecto visual das bobinas extrusadas com perfil de temperatura de 220°C. ....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 29 - Comparação entre bobinas dos materiais aditivados com 2% de agente deslizante. ....</b>	<b>47</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperaturas configuradas e reais na pré-extrusão.....	29
Tabela 2 - Formulações realizadas. ....	30
Tabela 3 - Sequência de extrusão das amostras.....	35
Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de ângulo de contato. ....	39
Tabela 5 - Resultados obtidos através da medição de espessura.....	40
Tabela 7 - Desvio padrão da espessura das amostras. ....	42
Tabela 6 - Resultados obtidos no COF.....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABIEF	Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis
ABRE	Associação Brasileira de Embalagens
CA	Ângulo de Contato
COF	Coefficiente de Fricção
FTIR	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier
H	Hidrogênio
IUPAC	União Internacional de Química Pura e Aplicada
PE	Polipropileno
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PP	Polipropileno
T <sub>g</sub>	Temperatura de Transição Vítrea
TGA	Ensaio de termogravimetria
T <sub>m</sub>	Temperatura de Fusão Cristalina
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	Objetivo Geral .....	14
1.2	Objetivos Específicos .....	14
1.3	Justificativa.....	14
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Polímeros e a Indústria de Embalagens</b> .....	<b>15</b>
2.1.1	Embalagens de filmes flexíveis poliméricos .....	15
2.1.2	Poliiolefinas .....	18
2.1.2.1	Polipropileno .....	18
2.2	Extrusão de Polímeros .....	21
2.2.1	Extrusão de filmes .....	21
2.3	Aditivos.....	23
2.3.1	Agentes deslizantes.....	23
2.4	Ensaio de Ângulo de Contato.....	24
2.5	Coeficiente de Fricção em Filmes (COF) .....	26
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA</b> .....	<b>28</b>
3.1	Preparação dos materiais e equipamentos .....	28
3.2	Extrusão das amostras.....	34
3.3	Ensaio no goniômetro .....	35
3.4	Espessura .....	37
3.5	Ensaio no interfaceamento para cálculo de COF .....	37
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>39</b>
4.1	Resultados no goniômetro .....	39
4.2	Resultados de espessura.....	40
4.3	Resultados de COF .....	42
4.4	Análise do aspecto visual.....	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira de plásticos flexíveis é um dos principais ramos de embalagens no Brasil, principalmente devido as demandas do setor de alimentos e de limpeza doméstica, principalmente sacos/sacolas e descartáveis. O aumento em 2021 de 2,9% na produção de flexíveis em relação a 2020 evidencia que esse mercado está em constante crescimento, porém ainda há muito a se explorar - apesar do crescimento nos últimos anos, o consumo per capita de embalagens plásticas flexíveis é baixo no Brasil (9,8 kg/habitante) se comparado a outros países (GONÇALVES, 2022), o que dá a essa indústria um espaço de destaque no mercado nacional.

Basicamente, os agentes deslizantes são utilizados para diminuir o atrito entre superfícies, e são mais utilizados do que imaginamos. Na injeção, o seu uso em tampas para bebidas, por exemplo, reduz a força necessária para aplicação na linha de envase (aumentando a produtividade), e facilita a abertura da tampa ao diminuir o torque de remoção (auxiliando no uso do produto) (BRASKEM, 2021). Já para a extrusão de filmes, a indústria de empacotamento automático precisa utilizar filmes com valores baixos de coeficiente de fricção (COF), caso contrário ocorre o efeito de “bloqueio”, onde o material fica tão colado a ele mesmo que dificulta o desbobinamento e, muitas vezes, provoca até o descarte do material.

Entretanto, os agentes deslizantes têm uma tendência muito forte em migrar para a superfície, afetando as propriedades externas do filme. Ou seja, à medida que os deslizantes são fundamentais para o processo e aplicação, esses mesmos aditivos também trazem um ônus ao seu uso quando mal dosados.

Ao analisar a influência do teor de agente deslizante e a influência da temperatura de processamento em filmes flexíveis poliméricos para embalagens através da medida do ângulo de contato pela gota séssil, espera-se ser possível elucidar o comportamento pós processamento de filmes flexíveis e entender como o isso implica na maquinabilidade, selagem, empilhamento e adesão entre embalagens.

## **1.1 Objetivo Geral**

Analisar a influência do teor de agente deslizando e a influência da temperatura de processamento em filmes flexíveis poliméricos para embalagens.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar a influência do teor de agente deslizando e da temperatura de processamento em filmes de polipropileno (PP) através da análise de ângulo de contato por gota séssil;
- Relacionar o comportamento identificado com situações da indústria de filmes flexíveis.

## **1.3 Justificativa**

Os filmes flexíveis poliméricos aditivados com agentes deslizantes possuem uma grande responsabilidade dentro da indústria de embalagem, visto que reduzem a aderência entre as paredes dos filmes e facilitam o manuseio das embalagens no geral. Entretanto, a migração de agente deslizando entre as camadas do filme flexível polimérico é um problema bastante atual na indústria de embalagens pois, por conferir a característica de deslizamento ao filme, seu uso pode gerar diversas falhas no processo, como por exemplo, dificuldades na maquinabilidade, na selagem, no empilhamento e adesão entre embalagens.

Devido ao frequente uso dos agentes deslizantes e dos problemas consequentemente vivenciados na indústria, o estudo do teor ótimo de consumo de agentes deslizantes se faz necessário. Dito isso, os resultados da análise de caracterização da superfície de filmes flexíveis são de extrema importância para o ramo industrial e científico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Polímeros e a Indústria de Embalagens

Os polímeros estão presentes diariamente na vida de todos, e são encontrados desde produtos simples (como canetas, sacolas e garrafas) até complexos (como itens hospitalares, componentes eletrônicos e revestimentos de aeronaves). Essa diversidade de aplicações deve-se à versatilidade de características que podem apresentar, sendo possível substituir elementos não-poliméricos de tal forma que aperfeiçoe o desempenho técnico e a qualidade dos produtos.

#### 2.1.1 Embalagens de filmes flexíveis poliméricos

Lino (2015) destaca que se pode dividir os filmes flexíveis em dois grupos principais:

- Monocamadas: composto apenas de um único material, sua extrusão requer menor controle e pode chegar a uma velocidade de 500 quilos por hora;
- Multicamadas: composto por dois ou mais materiais no mesmo filme, sua extrusão requer menor velocidade, devido à complexidade do controle do processo com mais de um substrato.

As embalagens de filmes flexíveis poliméricos são utilizadas para armazenar diversos tipos de produtos, adequando seu volume, espessura e medidas de acordo com o item a ser embalado, como observado na Figura 1. Destacam-se por apresentarem características que atendem a diversas necessidades, como a utilização de materiais diferentes — por exemplo, papel e alumínio — e com várias camadas, podendo acondicionar pós, líquidos e sólidos (PIVA, 2014).

Pode ser definida como:

Embalagens plásticas flexíveis são aquelas cujo formato depende da forma física do produto acondicionado e cuja espessura é inferior a 250  $\mu\text{m}$ . Nessa classificação se enquadram os sacos e sacarias com duas ou três soldas, *pouches* de quatro soldas, envoltórios fechados por torção e/ou grampos, tripas, *pouches* autossustentáveis (*stand up pouches*), fundos termoformáveis flexíveis que se conformam ao produto, filmes encolhíveis (*shrink*) para lacres, rótulos, envoltórios ou unitização, filmes esticáveis (*stretch*) para envoltórios de bandejas ou para amarração de carga na paletização, sacos de rafia, etc. Os materiais flexíveis incluem ainda selos termoseláveis, rótulos e etiquetas plásticas (SARANTÓPOULOS et al., 2017).

**Figura 1 - Exemplos de embalagens com filmes poliméricos flexíveis.**



**Fonte: POLO FILMS (2021).**

As embalagens plásticas destacam-se no mercado como uma solução apropriada para diversos tipos de envases, garantindo que o produto embalado seja preservado durante o armazenamento, transporte, tempo de prateleira e resista a condições desfavoráveis, como umidade, luz e microrganismos. Elas têm conquistado cada vez mais espaço no mercado, apresentando versatilidade e propriedades intrínsecas muitas vezes não encontradas nas embalagens de outras classes de materiais. Isso é evidenciado pelo volume de produção dessa indústria nos últimos anos, o qual vem apresentando um crescimento considerável.

Através da pesquisa realizada pela MaxiQuim e pela Associação Brasileira da Indústria de Embalagens Plásticas Flexíveis (ABIEF), é possível perceber que a indústria de alimentos é o principal mercado para o setor de embalagens flexíveis: o segmento consumiu mais de 800 mil toneladas das 2,088 milhões de toneladas de embalagens produzidas em 2020, como mostrado na Figura 2.



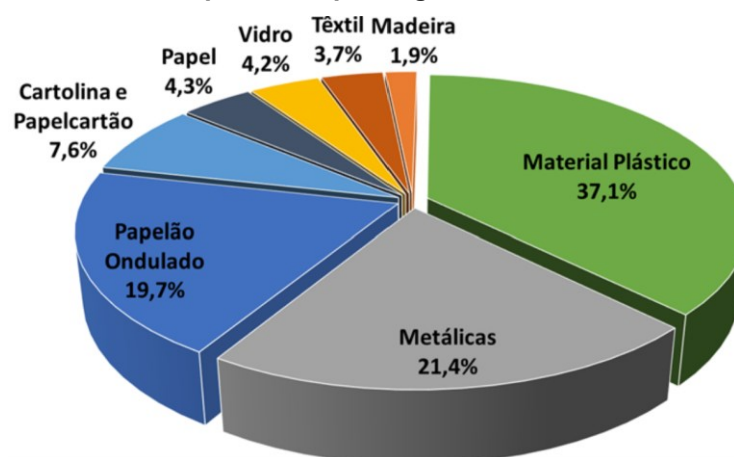
Figura 2 - Desempenho da indústria brasileira de embalagens flexíveis em 2020 em segmento.



Fonte: POLO FILMS (2021).

De acordo com a ABRE (Associação Brasileira de Embalagens), o valor bruto da produção do setor de embalagens atingiu R\$111 bilhões em 2021, um crescimento de 31% em relação ao ano anterior. O setor de embalagens plásticas apresentou a maior participação desse montante, correspondendo a 37,1% do total, como observado na Figura 3 (ABRE, 2022).

Figura 3 - Valor bruto da produção por segmento em bilhões de reais em 2021.



Fonte: IBGE. Elaboração: FGV (2022).

Com esse crescimento, surge a necessidade de desenvolvimentos e estudos mais aprofundados voltados para a otimização dos processos de transformação do plástico em embalagens, promovendo a contínua melhoria da qualidade e uso consciente de matérias-primas.

O polipropileno é um dos polímeros mais utilizados na fabricação de embalagens plásticas flexíveis, principalmente em aplicações para produtos alimentícios. Os tipos de polipropileno mais utilizados para sacolas e embalagens de filmes laminados com aplicação na área alimentícia são os homopolímeros (MANRICH, 2013).

### 2.1.2 Poliolefinas

Podem ser definidas como polímeros de cadeia carbônica compostas apenas por átomos de carbono, com simples ou duplas ligações entre eles, onde R e R' são os átomos de hidrogênio (H) ou grupos alquilas. São materiais altamente cristalinos e não possuem grandes interações com as moléculas de qualquer solvente devido a sua natureza química, majoritariamente composta por carbonos. Como exemplos de polímeros poliolefinicos, temos o polietileno (PE) e o polipropileno (PP), dois materiais *commodities* amplamente utilizados devido seu baixo custo, baixo nível de exigência mecânica e facilidade de processamento (NUNES; LOPES, 2014).

São obtidas a partir de hidrocarbonetos alifáticos insaturados conhecidos como olefinas (ou alquenos). Utilizando técnicas de polimerização e catalisadores diferentes, é possível que os átomos de carbono e hidrogênio sejam arranjados de diversas formas, produzindo polímeros com variações de propriedades (TWEDE, GODDARD, 2010).

#### 2.1.2.1 Polipropileno

Em 1954, Giulio Natta, da Itália, descobriu que certos catalisadores do “tipo Ziegler” eram capazes de produzir polímeros de alta massa molar a partir do propileno e de muitas outras olefinas. Em 1957, já se iniciou a exploração comercial do PP, sendo amplamente usado para fibras, filmes e injeção (NUNES, 2014).

O propileno, também chamado de propeno, é um gás incolor, apolar, altamente inflamável, solúvel em água, que apresenta ponto de fusão - 185,3 °C e ponto de ebulição - 47,7 °C, aproximadamente (SARANTÓPOULOS et al., 2017). Emprega-se a técnica de polimerização em suspensão, onde o diluente de reação (geralmente nafta) é medido e separado.

Em processos descontínuos, a reação é realizada a temperaturas aproximadas de 60 °C durante 1 a 4 horas. Em um processo típico, uma conversão de 85% de polímero é obtida (NUNES, 2014).

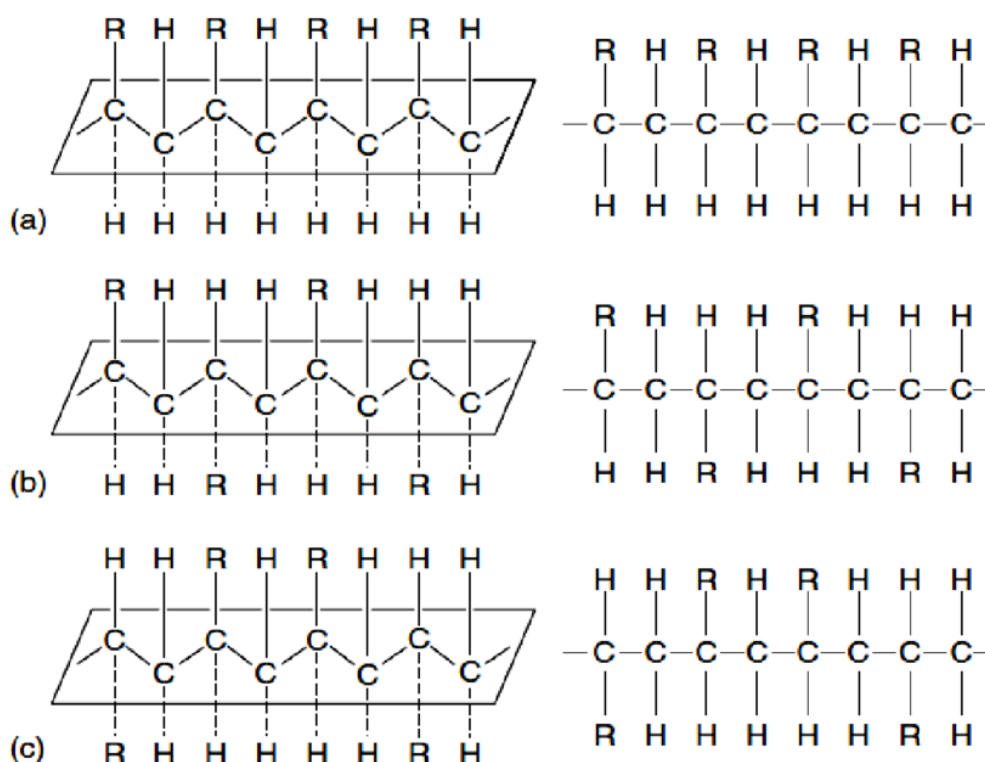
O PP homopolímero é produzido somente com propileno, possui temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de -10 °C e temperatura de fusão cristalina ( $T_m$ ) entre 160 e 165 °C. Apresenta elevada rigidez, resistência a altas temperaturas, boa resistência química abaixo de 80 °C, boa resistência elétrica e mecânica (SARANTÓPOULOS *et al.*, 2017).

Já o PP copolímero randômico é produzido com dois ou mais monômeros, normalmente por propeno e aproximadamente 6% de eteno, adicionado aleatoriamente durante a reação de polimerização. Apresenta a mesma  $T_g$ , menor  $T_m$  e menor solubilidade que o PP homopolímero. Os principais diferenciais são a alta transparência e flexibilidade, baixa transferência de odor e sabor, elevado índice de fluidez e excelente resistência ao dobramento e ao impacto a baixas temperaturas, e é indicado para chapas extrusadas e termoformadas, apresentando boa processabilidade (NUNES, 2014). Está presente em diversas aplicações, como embalagens para alimentos, cosméticos e utilidades domésticas.

A alta flexibilidade e transparência ocorrem pois é composto por eteno e outra olefina, na maioria das vezes o etileno, que é responsável por auxiliar na formação de defeitos na fase cristalina, dificultando a cristalização. Com a cristalização mais lenta, menor será a temperatura de fusão e maior será a transparência e o brilho do material. O menor grau de cristalinidade também resulta em um incremento na resistência ao impacto, maior resistência ao dobramento e menor densidade (MANRICH, 2013).

A taticidade é a regularidade na colocação dos grupos laterais em uma estrutura. O grupo metil ( $\text{CH}_3$ ) do PP pode apresentar diferentes configurações estereoespecíficas: isotática, sindiotática ou atática, como mostrado na Figura 4. Normalmente, não se verifica a presença 100% de uma ou outra configuração, sendo que a taxa de cristalização alcançada pelo PP é da ordem de 30 a 65% (MANRICH, 2013).

Figura 4 - Representação da configuração estereoespecíficas do PP: (a) Isotático; (b) Sindiotático; (c) Atático.



Fonte: OLIANI (2013).

Para materiais isotáticos, os grupos laterais ficam dispostos todos do mesmo lado. Para os sindiotáticos, os grupos laterais ficam dispostos de lados alternados. Já para o atático, não existe regularidade na disposição dos grupos laterais (WASHINGTON, 2013).

Referente aos PPs isotáticos, são os mais comuns entre os PPs comercializados e apresentam uma conformação helicoidal das cadeias de PP que se arranjam em uma célula unitária monoclinica, que pode estar tanto com rotação para o lado direito quanto para o lado esquerda, com orientação para cima ou para baixo. Esse posicionamento irá depender da temperatura de cristalização e do grau de orientação (MANRICH, 2013).

Sobre os PPs sindiotáticos, estes não são comumente encontrados para uso comercial e tem-se obtido materiais com estereoregularidade comparável ao PP isotático (MANRICH, 2013).

Para os PPs atático, não há cristalização e, por isso, possui consistência de cera, sendo pegajoso (MANRICH, 2013).

## 2.2 Extrusão de Polímeros

No processo de extrusão de polímeros, basicamente o material é forçado pelo movimento da rosca arquimediana contra uma matriz que proporciona a formação do perfil contínuo que origina o produto desejado (SOUZA, ALMEIDA, 2015). É possível obter produtos com comprimentos ilimitados e seção transversal constante, como barras, mangueiras, tubos e filmes (BERGLER, 2019).

### 2.2.1 Extrusão de filmes

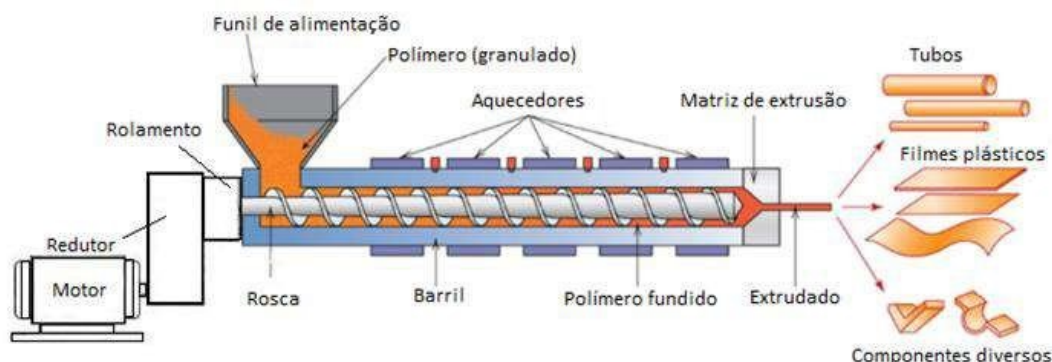
A extrusão de filmes é responsável por uma grande parcela do volume do mercado de extrusão. Porém, apesar desse grande volume, a massa de material empregada é muito baixa em relação a outros processos de transformação de polímeros. Aliado à alta produtividade, é um processo que proporciona ótima relação custo-benefício (SOUZA, ALMEIDA, 2015).

A matéria-prima, normalmente em temperatura ambiente, pode estar na forma de grânulos ou pós, e alimenta a extrusora através do funil de alimentação. É fundamental que tenha um sistema de refrigeração na entrada do cilindro junto ao funil de alimentação, a fim de garantir um bom resfriamento desta região e evitar a interrupção do fluxo de matéria prima (FERREIRA, 2019). Progressivamente, o transporte desse material no canhão pela rosca gera o aquecimento, plastificação e homogeneização do material. Como há a eliminação do ar existente entre esses grãos, a densidade aumenta de duas a quatro vezes do valor inicial. Por isso, o material deve ser comprimido ao longo da rosca para manter os níveis de cisalhamento adequados (MANRICH, 2013).

Ao chegar na matriz de extrusão, o material é forçado contra o cabeçote, e essa zona de restrição é responsável por gerar a pressão necessária para o filme ganhar forma.

Na Figura 5, é possível identificar os principais componentes de uma extrusora de rosca única.

**Figura 5 - Componentes de uma máquina extrusora de rosca única.**



**Fonte: Benk Company.**

A regulagem da espessura, além de ser feita pela abertura da matriz, é também promovida pela relação entre a velocidade de extrusão e a velocidade do estiramento do polímero na longitudinal (sentido da máquina) pelos rolos puxadores (SOUZA, ALMEIDA, 2015).

Os rolos puxadores, também conhecidos como rolos de achatamento e arraste, são regulados para minimizar os efeitos do inchamento do extrudado e proporcionar tensionamento ao material. Para isso, o extrudado é puxado com velocidade ligeiramente superior à da saída da matriz (FERREIRA, 2015).

Por fim, o filme é embobinado pelo bobinador, promovendo o armazenamento do filme em tubos de papelão ou plástico. O filme pode ser comercializado dessa forma ou ser o produto intermediário em um processo de formatação de pouche, por exemplo.

Quanto maior for a tensão de tração no bobinamento, maior será o estiramento do filme, e mais duro ficará o rolo bobinado. Dados empíricos têm mostrado que uma tensão de tração igual à 0,5% do módulo elástico do polímero pode ser aplicada sem induzir tensões permanentes significativas (SMITH, 2003).

Alguns bobinadores possuem facas que cortam em ambos os lados, gerando dois filmes simples separados. Também é possível o corte em apenas um dos lados do filme, resultando em um filme de largura igual à circunferência do balão (também conhecido como enfestado).

## 2.3 Aditivos

Pode-se dizer que todos os polímeros comerciais recebem aditivos, sendo que existem vários tipos de aditivos, como: plastificantes, estabilizantes, antiestáticos, antibloqueios, pigmentos, deslizantes, antioxidantes, retardantes de chama, etc.

Aditivos são basicamente utilizados por duas razões: a primeira é que os aditivos são algumas vezes necessários para alterar as propriedades do material (tornando os mais rígidos, mais flexíveis ou mais baratos, por exemplo), e a segunda razão é a necessidade de conferir estabilidade ao material durante o serviço e/ou processamento (RABELLO, 2011).

### 2.3.1 Agentes deslizantes

É comum os filmes de PEBD (polietileno de baixa densidade) e de PP aderirem fortemente entre si, impedindo a separação e dificultando operações de armazenagem e transporte. Para se evitar estes efeitos, aplica-se agentes deslizantes ao polímero antes da produção do filme. Para o PEBD, usualmente utiliza-se oleamida e para o PP utiliza-se cerca de 0,1 a 0,15% de erucamida (RABELLO, 2011).

É um aditivo com função migratória, formando uma camada uniforme na superfície (conforme pode ser observado na Figura 6), sendo responsável pela característica de deslizamento de filmes poliméricos. Sem o deslizamento adequado, seria impossível a aplicação do filme de polipropileno em processos de empacotamento automático, por exemplo (MANRICH, 2013).

**Figura 6 - Difusão da amida para a superfície ao longo do tempo.**



Fonte: BRASKEM (2021).

O tempo necessário para a exsudação do agente deslizante pode ser de dias ou semanas. Esse tempo depende do grau de bi orientação, de outros aditivos presentes na formulação e do tipo de agente utilizado. O tratamento corona pode remover parte do aditivo da superfície, mas após o tratamento, mais agente deslizante pode aflorar e, por isso, é importante conhecer o tempo de exsudação total desse

aditivo (MANRICH, 2013). Além disso, a presença de agente deslizante na superfície do filme diminui o brilho do produto. Esse fenômeno ocorre, pois, apesar de as terminações das cadeias do agente deslizante serem polares, o restante de sua estrutura é apolar, o que gera o fenômeno de exsudação ao longo do tempo quando em uma matriz apolar como o PP. Dessa forma, as terminações com o grupamento polar (amida) tendem a migrar para a superfície do filme pela incompatibilidade com a matriz, enquanto o restante apolar das cadeias tende a permanecer na matriz.

Ajudam na processabilidade do PP tanto dentro de roscas como em canais de matrizes, moldes e nos cilindros puxadores dos equipamentos. Podem ser empregados em peças onde necessita-se baixo coeficiente de atrito, como em engrenagens e juntas (RABELLO, 2011). São usados em processos de filme plano e soprado onde auxiliam no estiramento e, principalmente, no escorregamento entre dois filmes. Os mais utilizados atualmente são à base de amidas graxas, como as erucamidas e oleamidas, siliconas, ceras de polietileno e teflon (MANRICH, 2013).

A erucamida ( $C_{22}H_{43}NO$ ) tem uma ligação dupla na estrutura química, observado na Figura 7, o que apresenta importante efeito antibloqueio e possui excelente estabilidade térmica, o que minimiza o amarelamento. Devido seu maior peso molecular, a migração para superfície é mais lenta que da oleamida, porém os valores de COF são menores. Seu ponto de fusão é de 79 a 80°C (DATIQUIM, 2014).

Figura 7 - Estrutura química da Erucamida.



Fonte: BRASKEM (2021).

## 2.4 Ensaio de Ângulo de Contato

Todo material está em contato com outro elemento, seja ele sólido, líquido ou gasoso. A interação entre uma superfície e um determinado líquido pode ser estudada através da medida do ângulo de contato (CA), que é definido como o ângulo ( $\theta$ ) entre um plano tangente a uma gota do líquido ( $\gamma_{LV}$ ) e um plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado ( $\gamma_{SL}$ ), conforme esquematizado na Figura 8 (BAIRRAL, 2012).



**Figura 8 - Definição do ângulo de contato entre uma gota líquida e uma superfície plana e horizontal.**



Fonte: BAIRRAL (2012).

O ângulo de contato entre uma gota de um líquido com uma tensão superficial conhecida e uma superfície sólida depende da relação entre as forças adesivas (que fariam a gota se espalhar sobre a superfície) e as forças coesivas do líquido (que querem contrair a gota a uma esfera com uma superfície mínima) (SHAW, 1975). Portanto, o formato de uma gota de água depende da energia de superfície (região de maior energia), apresentando um formato específico para cada situação de acomodação, pois a maneira com que o volume da gota se acomoda (estado de menor energia) depende diretamente das interações entre a água e a superfície do material.

**Figura 9 - Diagrama de gotas sobre superfícies com diferentes graus de molhabilidade e correspondentes valores de ângulo de contato.**

Regime	Super-hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Super-hidrofóbico
Diagrama da gota				
Ângulo de Contacto	$\theta < 10^\circ$	$\theta < 90^\circ$	$\theta > 90^\circ$	$\theta > 150^\circ$

Fonte: BAIRRAL (2012).

Conforme observado na Figura 9, quando o ângulo  $\theta$  for menor do que  $10^\circ$ , é possível dizer que o material da superfície é super-hidrofílico; se o ângulo se situar entre  $10^\circ < \theta < 90^\circ$ , diz-se que o líquido molha a superfície do sólido (ou seja, é hidrofílico); entre  $90^\circ < \theta < 150^\circ$ , considera-se que o líquido não molha o sólido (ou seja, temos um material hidrofóbico); quando  $\theta > 150^\circ$ , diz-se que o material é super-hidrofóbico; e, por fim, quando  $\theta = 180^\circ$ , tem-se  $\cos \theta = -1$ , e o trabalho de adesão

líquido-sólido é zero. Este é o caso limite quando não há adesão entre as duas fases (o líquido não apresenta molhabilidade alguma) (BAIRRAL, 2012).

Os substratos (no caso desse experimento, os filmes monocamadas extrusados) devem ser sempre limpos com isopropanol. As gotas do líquido devem ser sempre de mesmo volume, e depositadas com o auxílio de uma seringa ou conta gotas, sendo o perfil de cada uma das gotas imediatamente observado com o auxílio de goniômetro de ângulo de contato, que ajudará a obter o ângulo entre o líquido e a superfície sólida. Com os ângulos medidos, é possível o cálculo dos respectivos trabalhos de adesão, que irão permitir a caracterização de cada dos substratos estudados (SHAW, 1975).

Normalmente, utiliza-se água destilada em volume controlado para esse ensaio. A água destilada é o estado mais puro da água, sem misturas com outros sais, substâncias ou microrganismos.

## **2.5 Coeficiente de Fricção em Filmes (COF)**

O atrito é a força de resistência que surge quando duas superfícies deslizam ou tentam deslizar uma sobre a outra, ou seja, é uma medida da dificuldade relativa do deslizamento entre duas superfícies. Essas superfícies podem ser ambas plásticas, uma metálica e uma plástica ou mesmo de outras naturezas. A força de atrito tem direção paralela às superfícies e sentido contrário ao do movimento.

Existem dois tipos de atrito: estático e dinâmico. Atrito estático é a resistência ao início do movimento relativo entre duas superfícies; atrito dinâmico é a resistência oposta à continuidade de um movimento relativo entre duas superfícies. Normalmente, o atrito estático é maior que o dinâmico, porém, para alguns materiais plásticos, esta relação pode se inverter ou se igualar.

Na prática, a propriedade de atrito é avaliada pela determinação do coeficiente de atrito (COF), que é a relação entre a força de atrito e a força perpendicular que atua entre as duas superfícies de contato, normalmente a força da gravidade. Assim, da mesma forma que para a força de atrito, existem dois tipos de coeficientes de atrito: estático e dinâmico.

O atrito estático tem sua importância no empilhamento de embalagens, onde um coeficiente de atrito muito baixo é responsável pela instabilidade das pilhas, devido

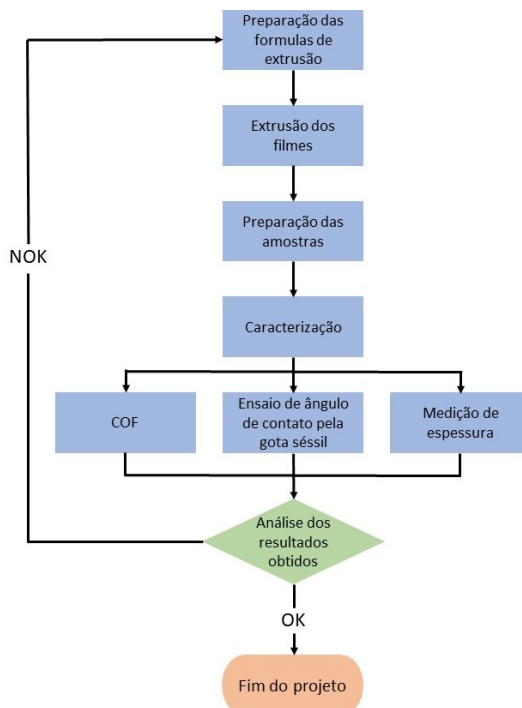
ao deslizamento das embalagens. O COF estático também pode ser associado com o desempenho de embalagens em esteiras transportadoras.

O atrito dinâmico é de grande importância na maquinabilidade de filmes flexíveis, devendo ser adequado à aplicação: nem baixo, nem alto. Caso não seja adequado, irão ocorrer problemas como: dificuldade no controle da tensão da bobina, alteração no registro de impressão, alongamento do material em máquina e interferência no desempenho do material em máquinas de acondicionamento. Neste caso, pode ocorrer o bloqueio do material na bobina e/ou rasgamento do material no ombro das máquinas, etc. A presença de aditivos deslizantes diminui o atrito. Esses aditivos, normalmente, exsudam para a superfície do material com o tempo e, portanto, a análise de um material em diferentes épocas pode fornecer valores diferentes de COF. A comparação de materiais em épocas distintas de fabricação só é aconselhável se o objetivo for avaliar o efeito do tempo de estocagem nessa propriedade superficial (SARANTÓPOULOS; TEIXEIRA, 2002).

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DA PESQUISA

O procedimento experimental utilizado neste trabalho para atingir os objetivos estabelecidos é apresentado na Figura 10, no qual encontra-se ilustrado o fluxograma referente as atividades desenvolvidas na prática do trabalho de conclusão de curso.

**Figura 10 - Fluxograma do procedimento experimental utilizado nesse trabalho.**



Fonte: Autoria própria (2022).

#### 3.1 Preparação dos materiais e equipamentos

Uma amostra de 335g de material deslizante PE-DL 50010 foi obtida por meio de uma empresa parceira (que preferiu manter-se anônima), e a resina base utilizada nesse trabalho foi o PP copolímero randômico de nome comercial Esenttia 01R25, da empresa Propilco, disponibilizada pelo Departamento de Engenharia de Materiais da UTFPR - Londrina.

O PP, por ser randômico, possui elevado teor de etileno, o que confere excelente resistência ao impacto. Esse material apresenta índice de fluidez de 0,8 g/min, resistência a tração de 24,13 MPa, tensão de alongamento de 13,5% (50 mm/min.) e resistência ao impacto de 128,11 J/M (método Izod com corpo de prova entalhado). Vale ressaltar que o PP randômico utilizado já possuía algum teor de agente deslizante em sua estrutura, que não foi informado pelo fornecedor.

O aditivo deslizante PE-DL 50010 foi fornecido em forma de pellets uniformes e livres de contaminação, apresenta densidade aparente entre 0,85 e 0,95 g/cm<sup>3</sup> e resiste a temperatura máxima de 220 °C.

Inicialmente, para garantir o resultado mais fidedigno possível, foi realizada uma extrusão preliminar de limpeza com PP puro Esenttia 01R25 (o mesmo utilizado para a extrusão final) a fim de remover do canhão qualquer tipo de resíduo, como aditivo, fibra, resina ou material degradado proveniente de extrusões anteriores que pudessem influenciar nos resultados esperados nesse trabalho. O material extrudado resultante foi descartado. A fim de se obter uma melhor homogeneização entre o PP Esenttia 01R25 e o material deslizante PE-DL 50010, foi realizada uma pré-extrusão com matriz do tipo filamento onde foram configuradas as temperaturas conforme apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1 - Temperaturas configuradas e reais na pré-extrusão.**

	Temperatura (°C)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Configurado	200	210	220
Real	201	210	220

**Fonte: Autoria própria (2022).**

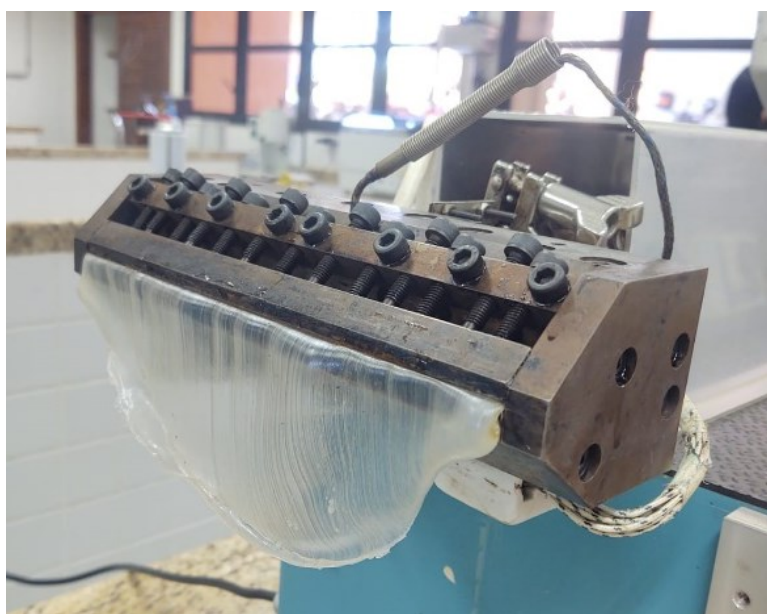
Conforme a extrusão ocorria, o material era submetido a um sistema de resfriamento forçado a ar, no qual envolve um sistema composto por um bobinador de filme AX Plásticos acoplado a um compressor de ar e, logo depois, o material em filamento foi peletizado pelo peletizador AX Plásticos, obtendo-se os *pellets* do material homogeneizado. Para cada formulação (0%, 2% e 4% de aditivo), conforme apresentado na Tabela 2, foram feitos cerca de 350g de material extrudado.

**Tabela 2 - Formulações realizadas.**

Extrusão	Descrição
A	Polipropileno puro
B	Polipropileno puro + 2% de aditivo deslizante
C	Polipropileno puro + 4% de aditivo deslizante

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Após finalizar a homogeneização do material, foi realizada a troca da matriz do tipo filamento para a matriz do tipo plana (Figura 11) e, novamente, uma extrusão com PP puro Esenttia 01R25 foi realizada, com o objetivo de limpar resíduos e possíveis contaminantes da matriz. O material resultante foi descartado.

**Figura 11 - Matriz plana no início da extrusão de limpeza.**

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Os processos de preparação, extrusão e peletização do material descritos acima foram realizados no laboratório de polímeros (B-001) do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina.

Referente aos equipamentos, foram utilizados:

- Extrusora monorosca de marca AX Plásticos, modelo AX 16:26 (Figura 12) e bobinador da mesma marca (Figura 13);

**Figura 12 - Extrusora monorosca utilizada no trabalho.**



Fonte: OLIVEIRA (2019).

**Figura 13 - Bobinador utilizado para embobinar o filme extrusado.**



Fonte: Autoria própria (2022).

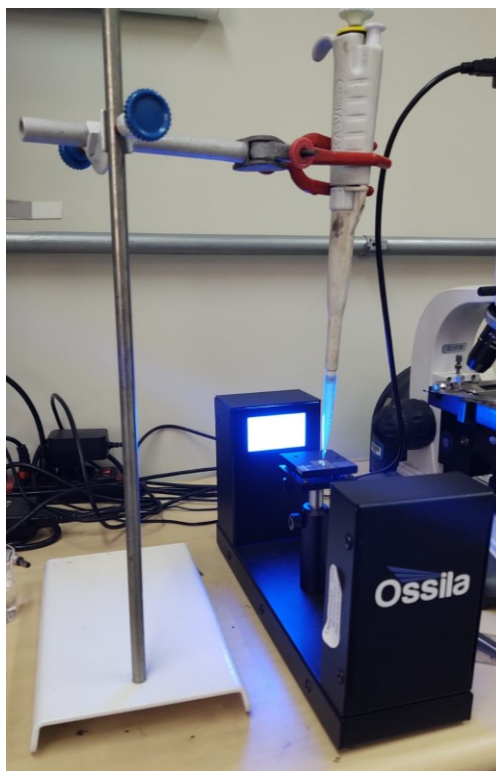
- Goniômetro de ângulo de contato da marca Ossila (Figura 14), suporte com garra e micropipeta da marca Kasvi, modelo Basic (Figura 15);

**Figura 14 - Goniômetro de ângulo de contato que será utilizado no trabalho.**



Fonte: OSSILA (2022).

**Figura 15 - Sistema utilizado para medição do ângulo de contato, composto por micropipeta, suporte com garra e goniômetro.**



Fonte: Autoria própria (2022).

- Medidor de espessura (micrômetro) manual e leitor digital da marca Mitutoyo, modelo Absolute (Figura 16);



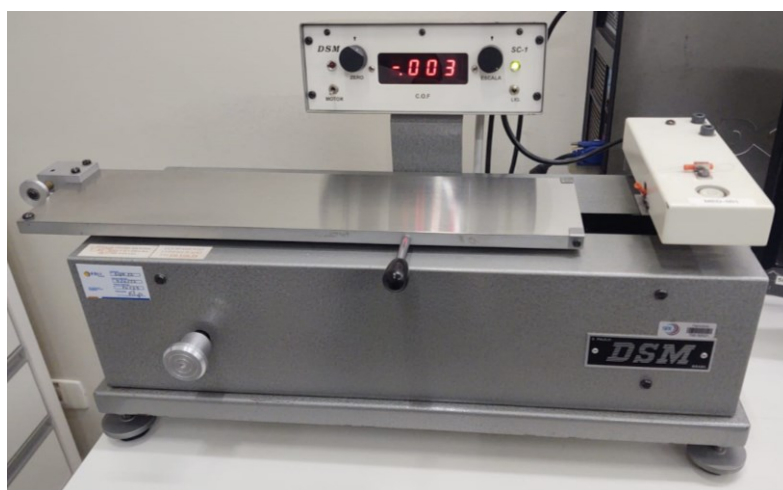
**Figura 16 - Micrômetro em uso.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

- Interfaceamento da marca DSM, modelo COF-SC1C (Figura 17);

**Figura 17 - Interfaceamento para cálculo de COF.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Os equipamentos utilizados nos ensaios de ângulo de contato, medição de espessura e COF foram inicializados e calibrados conforme o fabricante orienta ao ligar cada um desses equipamentos.

### 3.2 Extrusão das amostras

Com o material homogeneizado e já na concentração correta, cada concentração foi dividida em dois, a fim de extrusar, em matriz plana, cada uma delas a um perfil de temperatura diferente.

As temperaturas foram configuradas de acordo com as zonas:

- A zona 1, corresponde à região do barril onde ocorre a entrada e início da fusão do material;
- A zona 2 corresponde à região onde efetivamente ocorre a mistura do material em fluxo;
- A zona 3 é referente à temperatura da matriz.

Para o primeiro caso, as zonas configuradas foram de 180°C na zona 1, 190°C na zona 2 e 200°C na zona 3 (chamaremos de perfil de 190°C), conforme apresentado na Figura 18, e para o segundo caso foi configurado 210°C na zona 1, 220°C na zona 2 e 240°C na zona 3 (chamaremos de perfil de 220°C), conforme apresentado na Figura 19.

**Figura 18 - Temperaturas configuradas e reais em cada zona do perfil de 190°C.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 19 - Temperaturas configuradas e reais em cada zona do perfil de 220°C.**



Fonte: Autoria própria (2022).

A extrusão ocorreu na sequência apresentada na Tabela 3.

**Tabela 3 - Sequência de extrusão das amostras.**

Sequência de extrusão	Descrição
01	Extrusão no perfil de 190°C com 0% de aditivo
02	Extrusão no perfil de 190°C com 2% de aditivo
03	Extrusão no perfil de 190°C com 4% de aditivo
04	Extrusão no perfil de 220°C com 0% de aditivo
05	Extrusão no perfil de 220°C com 2% de aditivo
06	Extrusão no perfil de 220°C com 4% de aditivo

Fonte: Autoria própria (2022).

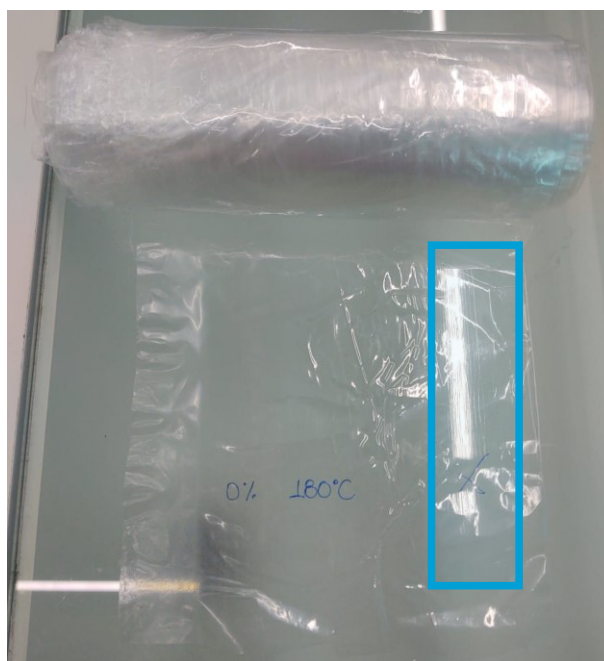
O material extrusado entre cada transição de concentração e temperatura foi descartado, ou seja, foram geradas seis bobinas independentes, extrusadas com concentrações e temperaturas diferentes.

Vale ressaltar que após os filmes serem extrusados, eles foram instantaneamente submetidos ao resfriamento em contato com rolos metálicos e corrente de ar, sendo na sequência embobinados pelo bobinador de filme AX Plásticos. Nessa etapa do embobinamento, parte do esforço mecânico foi realizado de forma manual.

### **3.3 Ensaio no goniômetro**

As seis bobinas de material para análise foram separadas, organizadas e cerca de 3 a 5 amostras de cada filme, de tamanho aproximado 1,5 x 1,5 cm, foram cortadas – com a ajuda de um estilete – de uma das laterais em que se observa menos defeitos (rugosidade, pontos-géis, entre outros) e no sentido de extrusão, conforme destacado na Figura 20.

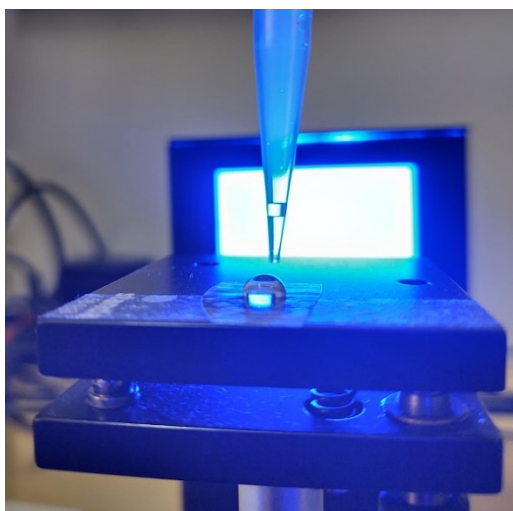
**Figura 20 - Diferença do aspecto entre as laterais do filme extrusado.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para garantir que o filme seja disposto de maneira 100% plana na base do goniômetro, uma fita dupla face foi colocada para melhorar a adesão e planicidade da amostra, conforme pode-se observar na Figura 21. Com isso, iniciou-se a caracterização do material pelo ensaio de ângulo de contato utilizando o método da gota séssil. No APÊNDICE A, é possível observar os dados individuais de cada medida obtidos.

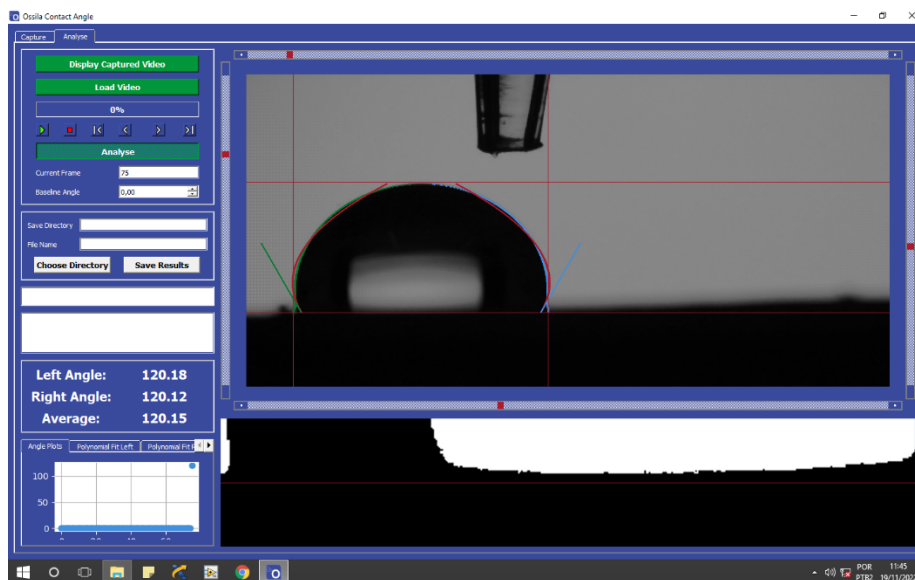
**Figura 21 – Exemplo de disposição da fita dupla face, da amostra e da micropipeta em relação a base do goniômetro.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Para o ensaio de ângulo de contato, foi utilizado água destilada, disponível no laboratório. Para controle do tamanho da gota, foi ajustado na micropipeta o volume de 0,05 mililitros, ou seja, 50 microlitros.

**Figura 22 - Resultado no goniômetro da amostra 3 com 0% de aditivo extrusada a 220°C.**



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.4 Espessura

Para entender a variação de espessura dos filmes extrusados, foi feita a medição em 10 pontos diferentes da amostra, distantes 1 cm entre eles (é possível observar a marcação feita para auxiliar nas medições na Figura 16, no sentido de puxamento dos filmes (conforme mostrado na Figura 20). No APÊNDICE B, é possível observar a medida obtida em cada um dos pontos das amostras.

### 3.5 Ensaio no interfaceamento para cálculo de COF

As amostras para o ensaio de coeficiente de atrito foram cortadas no sentido de extrusão, conforme já apresentado na Figura 20. Para isso, foi utilizado um estilete auto retrátil e dois gabaritos de corte, como mostrado na Figura 23. Como base para esse ensaio, foi utilizada a norma ASTM D1894.

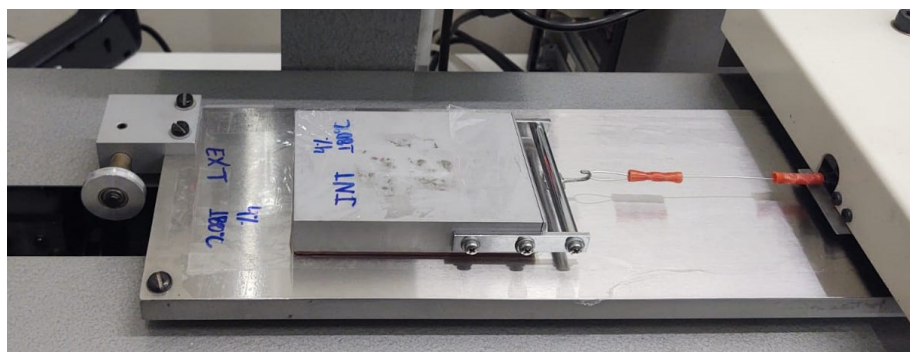
**Figura 23 - Gabaritos e estilete utilizados para cortar amostras para COF.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A amostra maior, de tamanho 47 x 10 cm, foi fixada na base do equipamento de interfaceamento com fita adesiva pelas laterais, com a face externa do filme para fora. A amostra menor, de tamanho 20 x 7 cm, foi fixada no *sled* (comumente chamado de carrinho ou trenó) com fita adesiva também pelas laterais, com a face interna do filme voltada para fora, deixando o meio da amostra livre. Em ambos os casos, evitou-se tocar no meio das amostras para que a gordura da própria mão não interferisse nos resultados. Cada amostra foi fixada conforme mostrado na Figura 24.

**Figura 24 - Fixação da amostra no Interfaceamento.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

No APÊNDICE C, é possível observar os resultados obtidos de COF em 10 pontos diferentes de cada amostra.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados no goniômetro

De forma resumida, temos os resultados de ângulo de contato calculados por média aritmética simples para cada formulação, apresentados na Tabela 4 e, na Figura 22, é possível observar como a informação de ângulo de contato é fornecida pelo *software* para cada amostra analisada.

**Tabela 4 - Resultados obtidos no ensaio de ângulo de contato.**

Temperatura	% de aditivo	Ângulo de Contato (°)
190°C	0%	114,96
	2%	114,19
	4%	113,48
220°C	0%	119,23
	2%	115,85
	4%	115,64

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Observando os resultados obtidos pela análise de ângulo de contato pelo método da gota séssil através do APÊNDICE A e da Tabela 4, comprovamos a característica apolar do PP sendo este um material altamente hidrofóbico, com ângulo médio (entre todas as amostras analisadas) de 115.56°. Percebe-se também que mesmo de forma sutil, há uma diminuição do ângulo de contato conforme adiciona-se agente deslizante ao PP, sendo esse fenômeno mais expressivo quando o filme foi extrusado a 220°C, ou seja, é possível verificar que o aditivo e a temperatura possuem influência no estudo. É provável que a migração do agente deslizante para a superfície tenha se intensificado em temperaturas maiores, uma vez que se aumenta a energia do sistema facilitando-se assim a exsudação dos grupamentos amida. A presença de grupamentos amida na superfície dos filmes pode ter levado à queda observada nos valores de ângulo de contato, uma vez que se trata de grupamentos polares.

É importante ressaltar que a migração do agente deslizante para a superfície é um processo termodinâmico e, portanto, também depende do tempo. Os valores obtidos para estas medidas de ângulo de contato e de COF foram decorrentes de três dias após a extrusão.

## 4.2 Resultados de espessura

De forma resumida, temos os resultados de espessura calculados por média aritmética simples para cada formulação, apresentados na Tabela 5.

Vale ressaltar que o erro de medida do medidor de espessura utilizado é de 0,005  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 5 - Resultados obtidos através da medição de espessura.**

Temperatura	% de aditivo	Espessura ( $\mu\text{m}$ )
190 °C	0%	0,097
	2%	0,082
	4%	0,068
220 °C	0%	0,043
	2%	0,052
	4%	0,038

**Fonte: Autoria própria (2022).**

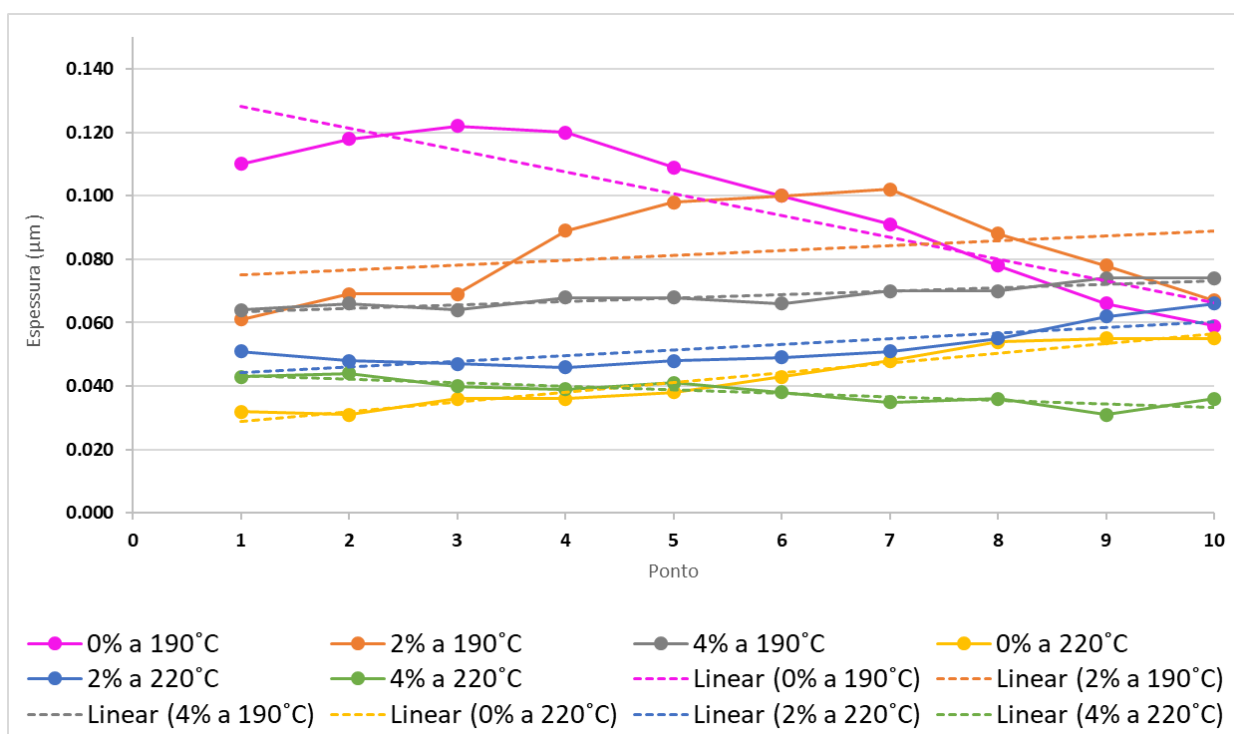
Conforme explícito pela Figura 20, a variação de espessura e textura no sentido transversal (largura) dos filmes é nítida e significativa, o que influenciou que as amostras fossem coletadas em apenas de um lado dos filmes, no sentido longitudinal (sentido da máquina), no qual observou-se menos alterações.

Entretanto, mesmo trabalhando-se com amostras do lado do filme que apresenta menor variação, percebeu-se o mesmo comportamento no comprimento do filme, mostrando que a variabilidade do processo é alta e que o filme não apresenta espessura homogênea, podendo gerar pontos de maior ou menor concentração de aditivo. Essa variação pode ter sido causada por fatores diferentes, como a falta de precisão no embobinamento manual, a regulagem da velocidade dos rolos de tração iniciais, o resfriamento desproporcional na saída da extrusora e/ou desalinhamento da matriz plana, por exemplo.

No APÊNDICE B e no Gráfico 1, fica claro a variação de espessura, principalmente nas amostras com 0% de aditivo extrusada a 190 °C (sendo a menor espessura de 0,059  $\mu\text{m}$  e a maior 0,122  $\mu\text{m}$ , o que representa uma variação de 51%) e com 2% de aditivo também extrusada a 190 °C (sendo a menor espessura de 0,061  $\mu\text{m}$  e a maior 0,102  $\mu\text{m}$ , o que representa uma variação de 41%). Comparando apenas esses dois filmes, o que apresentou melhor resultado foi o filme com 2% de aditivo extrusado a 190 °C, então entende-se que a presença de aditivo deslizante influencia em uma extrusão mais homogênea, mesmo que de forma mínima.



Gráfico 1 - Variação de espessura em 10 pontos diferentes de cada amostra.



Fonte: Autoria própria (2022).

Outro fator interessante é que as amostras com maior uniformidade na medida de espessura foram os filmes extrusados com 4% de aditivo em ambas as temperaturas, o que mostra que a presença do agente deslizante (nesse caso, de forma concentrada) favorece para um melhor processamento e controle dimensional do filme.

A Tabela 6 corrobora as constatações feitas acima por meio do cálculo do desvio padrão das medidas realizadas, no qual desvios padrões próximos a zero significam dados condensados próximos da média (ou seja, são dados mais homogêneos).

**Tabela 6 - Desvio padrão da espessura das amostras.**

Amostra	Desvio Padrão ( $\mu\text{m}$ )
0% a 190°C	0,022
2% a 190°C	0,014
4% a 190°C	0,003
0% a 220°C	0,009
2% a 220°C	0,006
4% a 220°C	0,004

Fonte: Autoria própria (2022).

### 4.3 Resultados de COF

De forma resumida, temos os resultados de COF calculados por média aritmética simples para cada formulação, apresentados na Tabela 7 - Resultados obtidos no COF.

**Tabela 7 - Resultados obtidos no COF.**

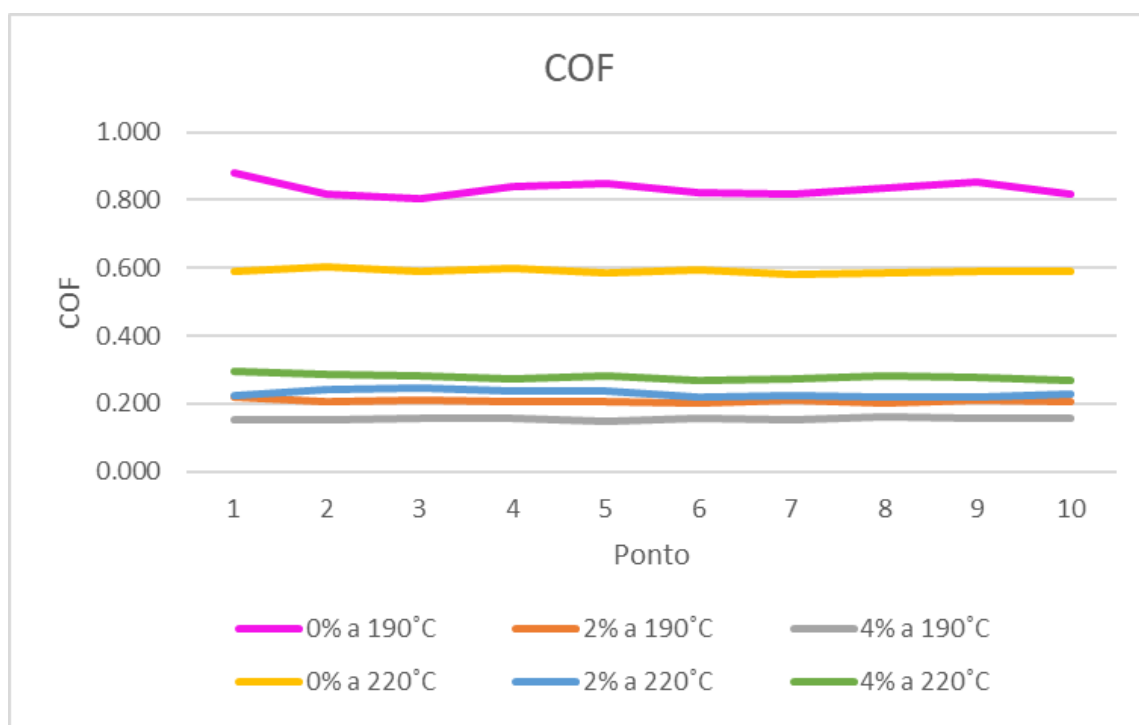
Temperatura	% de aditivo	Média
190°C	0%	0,834
	2%	0,207
	4%	0,155
220°C	0%	0,591
	2%	0,230
	4%	0,279

Fonte: Autoria própria (2022).

Como apresentado no referencial teórico, o valor do coeficiente de atrito não deve ser nem baixo e nem alto, e sim um valor intermediário que garanta que o efeito deslizante esteja sendo propiciado a estrutura sem prejudicar outras características e o processamento do filme.

Conforme é possível observar no Gráfico 2, as quatro amostras aditivadas apresentaram resultados constantes e lineares, o que demonstra uma boa distribuição e homogeneização entre o aditivo deslizante e a resina PP.

Gráfico 2 - Resultados obtidos no ensaio de COF.



Fonte: Autoria própria (2022).

Considerando as amostras que apresentaram maior coeficiente de atrito, ou seja, as amostras de referência sem adição de agente deslizante, temos que para a amostra extrusada a 190°C notou-se alguns pontos não tão lineares quanto observado nos outros filmes, o que endossa que a baixa temperatura de extrusão pode aumentar a dificuldade de deslizamento entre o filme e outra superfície, que é exatamente o comportamento que queremos minimizar com a aditivação com agente deslizante. Percebeu-se também que a amostra extrusada a 220°C sem aditivação apresentou resultados mais lineares e COF menor, dando a entender que a temperatura ajuda a diminuir o atrito superficial do filme e que o PP utilizado neste estudo provavelmente possui algum grau de agente deslizante, que migra para a superfície do filme em temperaturas maiores.

As amostras que apresentaram menor coeficiente de atrito são as amostras extrusadas a 190°C com 2% e 4% de agente deslizante, o que nos mostra que neste perfil de temperaturas de extrusão houve uma efetiva exsudação do mesmo, reduzindo o COF conforme aumenta-se a concentração deste na mistura.

No perfil de temperaturas a 220°C, também foi possível observar uma redução nos valores de COF conforme aumenta-se a incorporação de agente deslizante na formulação, entretanto, esta queda não foi tão pronunciada quanto a que se observa

nos filmes processados no perfil de temperaturas a 190°C. Isto pode ser atribuído à uma possível degradação do agente deslizante em decorrência da temperatura aplicada à matriz plana (240°C) para o processamento dos filmes no perfil de temperaturas a 220°C.

#### 4.4 Análise do aspecto visual

Na análise visual, o aspecto dos filmes processados no perfil de temperaturas a 220°C aparentavam estar com a superfície “molhada” em algumas regiões, conforme mostram as Figura 25 e Figura 26.

**Figura 25 - Manchas de aspecto “molhado” logo após a saída do material da matriz.**



**Fonte: Aatoria própria (2022).**

O datasheet do fornecedor do agente deslizante aponta para uma estabilidade térmica até 220°C, o que pode ser um indicativo de degradação térmica, uma vez que neste perfil de temperaturas mais altas observou-se algumas manchas na superfície dos filmes.

**Figura 26 - Manchas com aspecto "molhado" ao longo do embobinamento do filme.**



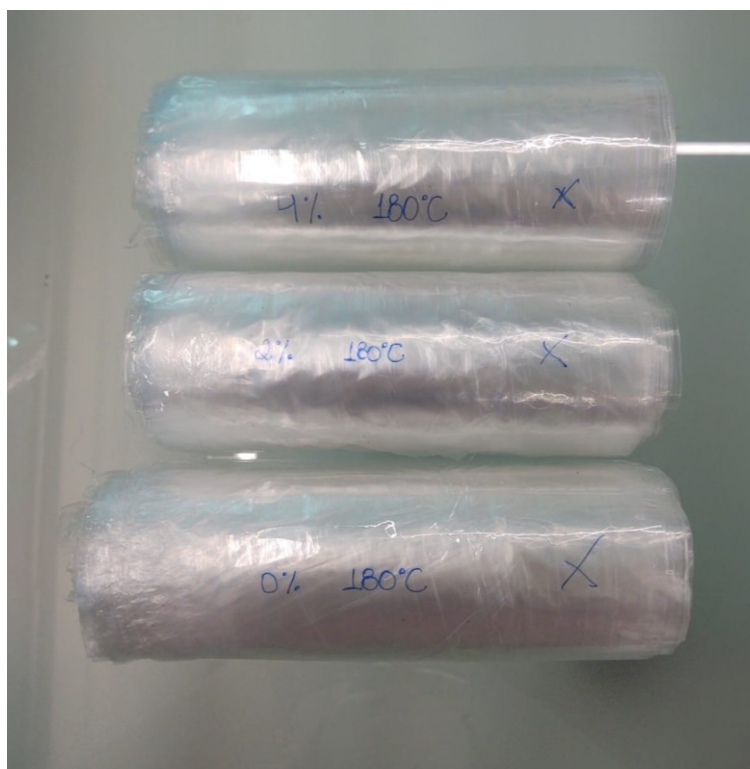
**Fonte: Autoria própria (2022).**

Outra análise feita foi referente ao alinhamento do filme na bobina. Na Figura 27, observa-se as bobinas das três dosagens extrusadas com perfil de temperatura de 190°C e na Figura 28 as bobinas das três dosagens extrusadas com perfil de temperatura de 220°C. Para essa análise, todas as bobinas foram alinhadas à direita, sendo possível observar se há ou não linearidade pelo lado esquerdo da bobina.

O material extrusado com 2% e 4% de aditivo a 190°C apresentaram resultado similar entre si e superior em relação a amostra controle também extrusada a 190°C, dando a entender que o aditivo influenciou positivamente na melhor distribuição do filme no embobinamento.

Já para as bobinas dos materiais extrusados a 220°C, é nítida a discrepância do material com 4% de aditivo deslizante, que correu excessivamente ao longo da bobina. O melhor resultado observado, dentre esses, foi o material com 2% de aditivo, que apresentou a melhor linearidade.

**Figura 27 - Aspecto visual das bobinas extrusadas com perfil de temperatura de 190°C.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 28 - Aspecto visual das bobinas extrusadas com perfil de temperatura de 220°C.**



Fonte: Autoria própria (2022).

Comparando as duas bobinas com material aditivado a 2%, conforme mostrado na Figura 29, observa-se que a extrusão realizada a 220°C apresentou

melhor alinhamento do filme, o que pode ser entendido como um processo mais estável.

**Figura 29 - Comparação entre bobinas dos materiais aditivados com 2% de agente deslizante.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Vale destacar que parte do embobinamento foi realizado com a ajuda de força manual, portanto, essas observações referentes ao aspecto visual da bobina não podem ser consideradas isoladamente para se obter uma conclusão.

## 5 CONCLUSÕES

Com este trabalho, no qual realizou-se a extrusão de filmes poliméricos flexíveis em três diferentes concentrações (0%, 2% e 4%) e duas diferentes temperaturas (190°C e 220°C), foi possível compreender a influência da temperatura e aditivação em alguns parâmetros do filme através da realização de três testes ensaios para analisar o ângulo de contato, espessura e atrito das amostras.

No teste de ângulo de contato, observou-se que no geral, podemos dizer que as amostras não apresentaram mudança de afinidade com água, independente da temperatura de extrusão e da porcentagem de aditivação, pois em todos os casos a superfície é majoritariamente hidrofóbica. O que se observou foi que, conforme ocorre aumento do aditivo deslizante na mistura, há uma diminuição sutil no ângulo de contato, sendo este mais pronunciado para o processamento no perfil de temperaturas a 220°C.

No caso da espessura, para as combinações estudadas, foi possível concluir que o alto grau de concentração de aditivo influenciou positivamente o filme, uma vez que as medições que apresentaram menor variabilidade foram aditivadas com 4% de agente deslizante, com destaque para a amostra extrusada a 190°C, entretanto, observou-se que – no geral – amostras com maior temperatura apresentaram menor desvio padrão.

Para avaliar o atrito, foi realizado o teste de COF e verificou-se que, desconsiderando a aditivação, ou seja, analisando as duas amostras controle sem agente deslizante, a amostra com maior temperatura de extrusão apresentou menor coeficiente de atrito superficial, podendo-se inferir que o PP em análise possivelmente apresenta algum teor de agente deslizante que migra em maiores temperaturas para a superfície. Porém, após aditivar os filmes, notou-se uma queda significativa nos valores de COF, o que mostra que em ambas as temperaturas ocorre o fenômeno de exsudação do agente deslizante, sendo esta mais significativa para as amostras processadas a 190°C.

Outra observação feita foi durante a análise visual das amostras processadas no perfil de temperatura de 220°C, onde percebeu-se a presença de manchas na superfície dos filmes. É um possível indicativo de degradação térmica do agente deslizante na superfície do material, devido a temperatura mais elevada da matriz, o que corrobora com a menor queda no COF das amostras processadas a maiores



temperaturas em relação às extrudadas a 190°C. Entretanto, observa-se que a 2% de aditivação, os valores de COF tanto a 190°C quanto a 220°C são similares, podendo-se inferir que nesta concentração existe um valor próximo do ótimo para a aditivação dos filmes de PP. Desta forma, pode-se trabalhar com uma janela de processamento maior, para uma concentração menor de aditivo (quando comparado à 4%). Soma-se a isto o melhor alinhamento dos filmes nas bobinas para as formulações a 2% de agente deslizante, conforme análise visual, indicando uma melhor maquinabilidade nesta concentração.

Com essas análises, conclui-se que ao trabalhar com um perfil de temperaturas de extrusão um pouco mais elevado e com uma concentração maior de agente deslizante, podemos obter um filme com maior estabilidade dimensional, uma vez que o agente deslizante pode também auxiliar no fluxo durante o processamento, melhorando a processabilidade de filmes planos. Entretanto, em termos de redução de custo, observa-se que mesmo com uma aditivação de 2% de agente deslizante, é possível obter valores de COF relativamente baixos, podendo-se aumentar tanto a janela de processamento por extrusão quanto a maquinabilidade de filmes flexíveis.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Apesar do trabalho ter sido estruturado de forma bastante robusta, ainda há muitas oportunidades para trabalhos futuros, como a realização de ensaio de termogravimetria (TGA) no PP, no aditivo utilizado e na extrusão afim de se obter uma melhor caracterização das resinas, melhorar o controle de espessura durante a extrusão e o embobinamento do filme extrusado de forma a torná-lo mais homogêneo, realizar análises de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para identificar a presença de grupos funcionais na estrutura e investigar sobre a degradação do agente deslizante a altas temperaturas e fazer a extrusão em uma terceira dosagem para verificar tendência de comportamento.

## REFERÊNCIAS

ABRE – Associação Brasileira de Embalagem. **Dados do Setor 2021**. Disponível em: <<https://www.abre.org.br/dados-do-setor/2021-2/>>. Acesso em: 16 abr. 2022.

BAIRRAL, J. R. D. S. **Ângulo de Contato e Energia de Superfície**. 2012. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Sorocaba.

BENK COMPANY – Benchmark Plastic Solution. **Plastic pipe Extrusion Machine**. Disponível em: <<https://www.benkpm.com/plastic-pipe-extrusion-machine/>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

BERGLER, E. R. **Processamento de Polímeros**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/111004083-Capitulo-2-processamento-de-polimeros.html>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

BRASKEM. **Tampas para bebidas: requisitos técnicos e aditivos deslizantes**. 2021. Disponível em: <<https://www.braskem.com.br/technical-service/tsd-detalhe-noticia/tampas-para-bebidas-requisitos-tecnicos-e-aditivos-deslizantes>>. Acesso em 22 mai. 2022.

DATIQUIM - Produtos Químicos Ltda. **Catálogo técnico de produto – Erucamida**. São Paulo, 2014. Disponível em: <[http://www.datiquim.com.br/site\\_novo/pdfs/ERUCAMIDA.pdf](http://www.datiquim.com.br/site_novo/pdfs/ERUCAMIDA.pdf)>. Acesso em: 22 mai. 2022.

FERREIRA, R. **Processo de Extrusão**. Instituto Federal Sul-Rio-Grandense, Campus Sapucaia do Sul. Disponível em: <<http://200.19.248.10:8002/professores/rferreira/Extrus%C3%A3o%20Teoria%20-%203P%203T/2.%20Processo%20de%20Extrus%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2022.

GONÇALVES, J. R. **Aumenta o faturamento da indústria de embalagens flexíveis**. Revista Plástico Industrial, São Paulo, 2022.

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry. **What are polymers?** Disponível em: <<https://iupac.org/polymer-edu/what-are-polymers/>>. Acesso em 16 abr. 2022.

LINO, G. C. D. L.; LINO, T. H. D. L. **Estudo comparativo de embalagens flexíveis laminadas versus coextrusadas**. 2015, 37 f. TCC (Graduação de Tecnologia em Alimentos). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes**. 2 ed. São Paulo: Editora Artliber, 2013. 485 p.

NUNES, E. de C. D.; LOPES, F. R. S. **Polímeros - Conceitos, Estrutura Molecular, Classificação e Propriedades**. 1. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2014. 121 p.

OLIANI, W. L. **Estudo da formação de nanogéis e microgéis de polipropileno modificado por radiação gama e incorporação de nanopartículas de prata visando à ação biocida**. 2013, 135 f. Tese (Doutorado em Ciências na área de tecnologia nuclear – Materiais. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

OLIVEIRA, J. P. M. **Compatibilização de Compósitos de PEBD Reforçados com o Bagaço da Cana-de-Açúcar**. 2019. 51 p. Trabalho de conclusão de curso – Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

ONOFRE, N. A. **Desenvolvimento e caracterização de filmes poliméricos a partir de ágar, agarose e kefirana com incorporação de nanopartículas de prata**. 2014, 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica). Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

OSSILA – Enabling Materials Science. **Contact Angle Measurements of Surface Wetting**. Disponível em: <<https://www.ossila.com/pages/contact-angle-measurements-surface-wetting>>. Acesso em: 24 mai. 2022.

PIVA, A. C. **Caracterização de aditivos em filmes flexíveis de polietileno**. 2014, 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

POLO FILMS. **6 motivos para escolher embalagens flexíveis**. Disponível em: <<https://polofilms.com.br/blog/6-motivos-para-escolher-embalagens-flexiveis/>>. Acesso em: 16 abr. 2022.

SARANTOPOULOS, C. I. G. L.; TEIXEIRA, F. G. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. 2. ed. Campinas: ITAL/CETEA, 2017. 432 p.

SARANTÓPOULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M.; PADULA, M.; COLTRO, L.; R. ALVES, M. V.; GARCIA, E. E. C. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. 1 ed. Campinas: CETEA/ITAL, 2002.

SHAW, D. J. **Introdução à Química de Coloides e Superfícies**. 1 ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher/Edusp, 1975. 185 p.

SINDIPLAST – Sindicato de Indústria de Material Plástico, Transformação e Reciclagem de Material Plástico do Estado de São Paulo. **Os Plásticos**. Disponível em: <<http://www.sindiplast.org.br/os-plasticos/>>. Acesso em: 16 abr. 2022.

SMITH, R. D. **Como melhorar o desempenho de bobinadoras de filmes**. Revista Plástico Industrial, São Paulo, 2003.

SOUZA, W. B. D.; ALMEIDA, G. S. G. D. **Processamento de Polímeros por Extrusão e Injeção - Conceitos, Equipamentos e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. 193 p.

SULZBACH, A. C.; BRAIBANTE, M. E.; & STORGATTO, G. A. **A Bioquímica do Glúten através de Oficinas Temáticas**. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 767-776, 2015.

TWEDE D.; GODDARD, R. **Materiais para embalagens**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2010. 203 p.

RABELLO, M. **Aditivação de Polímeros**. 1 ed. São Paulo: Editora Artliber, 2000. 247 p.

**APÊNDICE A - Resultados obtidos no ensaio de ângulo de contato.**

## RESULTADOS OBTIDOS NO ENSAIO DE ÂNGULO DE CONTATO

Temperatura	% de aditivo	Amostra	Ângulos (°)			Média geral
			Esquerdo	Direito	Média entre lados	
190°C	0%	1	114,06	112,14	113,10	114,96
		2	115,78	115,81	115,80	
		3	116,40	115,54	115,97	
	2%	1	113,12	114,18	113,65	114,19
		2	115,53	114,76	115,14	
		3	113,03	111,67	112,35	
		4	115,34	115,92	115,63	
	4%	1	114,39	115,12	114,75	113,48
		2	112,99	112,64	112,82	
		3	113,63	113,39	113,51	
		4	112,14	113,55	112,84	
	220°C	0%	1	120,88	150,54	120,71
2			120,11	119,65	119,88	
3			120,18	120,12	120,15	
4			117,14	116,78	116,96	
5			118,27	118,60	118,44	
2%		1	115,10	114,20	114,65	115,85
		2	116,18	115,80	115,99	
		3	117,83	115,54	116,69	
		4	116,03	115,93	115,98	
		5	115,93	115,99	115,96	
4%		1	116,27	116,34	116,31	115,64
		2	117,33	116,70	117,01	
		3	114,59	115,53	115,06	
		4	114,09	113,34	113,71	
		5	116,26	115,99	116,12	

**APÊNDICE B – Resultados obtidos na medição de espessura das amostras.**



## RESULTADOS OBTIDOS NA MEDIÇÃO DE ESPESSURA DAS AMOSTRAS

Tempe- ratura	% de aditivo	Amostras ( $\mu\text{m}$ )										Média
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
190°C	0%	0,110	0,118	0,122	0,120	0,109	0,100	0,091	0,078	0,066	0,059	0,097
	2%	0,061	0,069	0,069	0,089	0,098	0,100	0,102	0,088	0,078	0,067	0,082
	4%	0,064	0,066	0,064	0,068	0,068	0,066	0,070	0,070	0,074	0,074	0,068
220°C	0%	0,032	0,031	0,036	0,036	0,038	0,043	0,048	0,054	0,055	0,055	0,043
	2%	0,051	0,048	0,047	0,046	0,048	0,049	0,051	0,055	0,062	0,066	0,052
	4%	0,043	0,044	0,040	0,039	0,041	0,038	0,035	0,036	0,031	0,036	0,038

**APÊNDICE C - Resultados obtidos no COF.**

## RESULTADOS OBTIDOS NO COF

Tempe- ratura	% de aditivo	Amostras										Média
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
190°C	0%	0,878	0,817	0,803	0,840	0,851	0,823	0,817	0,835	0,852	0,820	0,834
	2%	0,218	0,208	0,209	0,204	0,207	0,200	0,210	0,200	0,212	0,204	0,207
	4%	0,151	0,152	0,155	0,158	0,15	0,156	0,152	0,161	0,159	0,158	0,155
220°C	0%	0,592	0,602	0,591	0,600	0,585	0,595	0,581	0,587	0,592	0,588	0,591
	2%	0,223	0,241	0,246	0,237	0,238	0,219	0,225	0,221	0,219	0,227	0,230
	4%	0,294	0,287	0,284	0,275	0,28	0,268	0,271	0,281	0,279	0,268	0,279