

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - *CAMPUS FELIZ*

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PAULA PATRÍCIA SIQUEIRA SANTOS

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE CO-
EXTRUSÃO EM FILMES DE POLIETILENO

FELIZ

2024

Paula Patrícia Siqueira Santos

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE CO-
EXTRUSÃO EM FILMES DE POLIETILENO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso Superior de
Engenharia Química do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Rio
Grande do Sul, como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química.

Orientadora: Prof.^a Dra. Daiane Romanzini

FELIZ

2024

PAULA PATRÍCIA SIQUEIRA SANTOS

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS NO PROCESSO DE CO-
EXTRUSÃO EM FILMES DE POLIETILENO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel(a) em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Flávia Dagostim

Prof. Dr. André Zimmer

ORIENTADOR

Prof.^a Dra. Daiane Romanzini

Feliz, 22 de novembro de 2024.

Dedico esse trabalho à Deus, por sua graça e misericórdia. Aos meus pais e tios, por serem meu apoio incondicional durante essa trajetória.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sua bondade, graça e misericórdia durante esse trabalho de conclusão. Agradeço por toda porta aberta e fechada nesse ciclo e por toda oportunidade que Deus em sua infinita graça me proporcionou.

Agradeço infinitamente aos meus pais, Pedro e Cida por esse tempo de sustento, amor, carinho e suporte, sem vocês com certeza não haveria acontecido esse momento.

Agradeço de coração aos meus queridos tios em especial, Andreia e Daivid, por me acolherem e abriram as portas para que pudesse realizar esse momento, muito obrigada por todo tempo, esforço e auxílio nessa jornada.

Agradeço a minha querida orientadora, prof. Dra. Daiane Romanzini, pela disponibilidade, orientação, agilidade e dedicação para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho que me acompanharam nessa jornada, por todo suporte, ânimo e alegria.

E agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para esse trabalho e me acompanharam ao longo do curso.

RESUMO

O polietileno é um dos polímeros mais aplicados nos setores industriais na forma de embalagens flexíveis. É um polímero termoplástico, sendo um dos mais reciclados atualmente. A reciclagem dá origem ao polietileno pós-consumo, que possui variadas aplicações, como por exemplo seu uso em filmes. Sendo que, um dos processos de produção mais utilizados para esses filmes é a extrusão por sopro. A extrusão pode ser feita em multicamadas, a qual é conhecida como co-extrusão, produzindo filmes com propriedades diferenciadas. Dessa forma, o objetivo do estudo é analisar os parâmetros operacionais da co-extrusão por sopro de filmes de polietilenos reciclados e a sua influência na produtividade baseada na vazão de filme extrusado, tal como as causas prévias que levaram os parâmetros serem limitantes. Os parâmetros analisados foram: temperatura de fusão nas roscas, resfriamento interno do balão (IBC), velocidade de rotação das roscas e pressão da massa nas roscas (A, B e C). O estudo foi realizado em uma co-extrusora de três camadas (três roscas), e os dados foram analisados para dois filmes (P1 e P2) que possuíam em sua formulação uma mistura de polietileno pós-consumo e virgem, de mesma formulação, com diferença na espessura e largura do balão. A metodologia aplicada foi a coleta dos dados realizada diretamente no equipamento e a compilação dos dados para a análise do comportamento das variáveis em função do aumento da vazão de filme extrusado. Foi estimada a vazão teórica que cada filme poderia alcançar, a variação entre o teórico e o real e o percentual de uso de cada rosca do equipamento. Após as análises dos comportamentos dos parâmetros operacionais nos filmes, observa-se um desgaste das roscas foi uma das causas encontradas devido as elevadas temperaturas e o fenômeno de refluxo presente. Além disso, a rosca B se mostrou a limitante dentre as três roscas na temperatura e na velocidade das roscas estudadas. Os desvios experimentais obtidos indicaram uma perda de capacidade real considerável em quase todas as vazões analisadas. As roscas A e C não foram limitantes na velocidade das roscas, mas tiveram pontos de altos e baixos de temperaturas e altas pressões. O IBC de saída se mostrou limitante, com destaque para o filme P2. Conclui-se, portanto, que dentre os parâmetros analisados, a temperatura das roscas e a velocidade das roscas possuíam maior influência como limitantes.

Palavras-chave: Polietileno, co-extrusão, parâmetros operacionais, limitantes.

ABSTRACT

Polyethylene is one of the most widely used polymers in the industrial sector, primarily in the form of flexible packaging. It is a thermoplastic polymer and one of the most recycled materials today. Recycling generates post-consumer polyethylene, which has various applications, such as in films. One of the primary methods for producing films is blown extrusion. This process can be carried out in multiple layers, known as co-extrusion, to produce films with varied properties. Thus, the objective of this study is to analyze the operating parameters in the blown co-extrusion of post-consumer polyethylene and their influence on the throughput of films. The parameters analyzed included screw temperature, internal bubble cooling (IBC), screw rotation speed, and screw pressure (A, B and C). The study was conducted on a three-layer co-extruder, and data were analyzed for two films (P1 and P2) that had in their formulation a blend of post-consumer polyethylene and virgin polyethylene, with differences in the thickness and width of the bubble. The methodology applied involved collecting data directly from the equipment and compiling it to analyze the behavior of the variables as a function of the increase in film throughput. In addition, the theoretical throughput that each film could achieve was estimated, along with the experimental deviation and the utilization percentage of each screw. After analyzing the behavior of the operating parameters in the films, it was observed that the screws were wearing due to high temperature and screw rotation, and the reflux phenomenon was present. Moreover, screw B was the one among the three screws that limited the process in terms of temperature and rotation speed. The experimental deviation obtained indicates a considerable loss in actual capacity across almost all throughput levels analyzed. Screws A and C were not limited in rotation speed but showed fluctuations in temperature and high pressures. The outlet IBC proved to be limited, especially for P2. In conclusion, among the parameters analyzed, screw temperature and rotation speed were the two factors with the greatest influence as limiting parameters.

Keywords: Polyethylene, co-extrusion, operating parameters, limiting parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema da derivação do polietileno.	16
Figura 2- Reação de formação do polietileno a partir do eteno.....	16
Figura 3 – Esquema ilustrativo dos cinco sistemas de composição de uma extrusora.	20
Figura 4 - Esquema de rosca na extrusora.	22
Figura 5 - Esquema da montagem da matriz.	22
Figura 6- Esquema dos parâmetros operacionais de uma extrusão por sopro.	27
Figura 7 - Tipos de balão na extrusão por sopro.....	28
Figura 8 - Esquema do funcionamento dos parâmetros operacionais na co-extrusora américa.....	35
Figura 9 - Fluxograma do método aplicado para o estudo dos parâmetros de processo da co-extrusão.	36
Figura 10 – Gráfico da vazão em função da velocidade de rotação das roscas A, B e C para os filmes P1 (a) e P2 (b).	45
Figura 11 - Gráfico dos desvios das vazões experimentais obtidas pela (a) velocidade de rotação (b) vazão real.	49
Figura 12 – Variação da vazão em função da pressão para o filme P1 (a) e P2 (b).	51
Figura 13 – Variação da vazão em função do sistema de resfriamento interno para o filme P1 (a) e P2 (b)	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vazões de filmes extrusados que serão analisadas.....	35
Tabela 2 - Valores das temperaturas nas roscas com as vazões dos filmes extrusados.	37
Tabela 3 - Valores das velocidades de rotação das roscas com as vazões dos filmes extrusados.....	38
Tabela 4 - Valores de pressões das roscas com as vazões dos filmes extrusados. .	38
Tabela 5 - Valores de IBC com as vazões dos filmes extrusados.....	39
Tabela 6 - Valores de porcentagem de uso das roscas A, B e C para P1 e P2.	47
Tabela 7 - Valores para a vazão teórica para os filmes P1 e P2.....	48
Tabela 8 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 550 kg/h.....	62
Tabela 9 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 590 kg/h.....	62
Tabela 10 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 610 kg/h.....	63
Tabela 11 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 480 kg/h.....	63
Tabela 12 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 520 kg/h.....	64
Tabela 13 - Temperaturas de setup e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 540 kg/h.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição das zonas de temperaturas, nas roscas A, B e C.....	37
Quadro 2 -Resultados obtidos da variação das temperaturas nos filmes P1 e P2, nas vazões analisadas.	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.1	Objetivo Geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	14
2.1	POLÍMEROS.....	14
2.2	POLIETILENO	15
1.1.1	Poliétileno de alta densidade (PEAD).....	17
1.1.2	Poliétileno de baixa densidade (PEBD).....	17
1.1.3	Poliétileno linear de baixa densidade (PELBD)	18
2.3	POLIETILENO RECICLADO.....	18
2.4	FILME DE POLIETILENO	19
2.5	EXTRUSÃO DE FILMES POR SOPRO.....	20
2.6	CO-EXTRUSÃO POR SOPRO PARA FILMES DE POLIETILENO	24
2.7	PARÂMETROS OPERACIONAIS DA CO-EXTRUSÃO POR SOPRO.....	26
2.7.1	Velocidade de gás e resfriamento interno do balão.....	27
2.7.2	Zonas de temperatura de fusão nas roscas.....	29
2.7.3	Velocidade de rotação das roscas.....	30
2.7.4	Pressão da massa fundida nas roscas.....	32
2.8	ESTUDOS NA ÁREA DE CO-EXTRUSÃO E PARÂMETROS OPERACIONAIS.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1	MATERIAIS.....	34
3.2	MÉTODOS.....	34
3.3	CÁLCULO PRODUTIVIDADE IDEAL DOS FILMES BASEADA NAS VAZÕES	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO AUMENTO DA VAZÃO NOS FILMES E SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DO BALÃO.....	41
4.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DAS ROSCAS NO AUMENTO DA PRODUTIVIDADE	44
4.3	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DAS ROSCAS NO AUMENTO DA CAPACIDADE PRODUTIVA	50
4.4	INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO INTERNO DO BALÃO (IBC) NO AUMENTO DA VAZÃO DE FILME EXTRUSADO.....	53
	CONCLUSÃO	56
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS.....	58
	APÊNDICE A.....	62

1 INTRODUÇÃO

Um polímero pode ser definido como sendo uma macromolécula contendo repetições de vários monômeros, formando extensas cadeias carbônicas com alta massa molecular (Dziadowiec, *et al.*, 2023). Dentre os polímeros existem vários grupos classificados de acordo com sua estrutura e origem, por exemplo as olefinas, que são derivadas do petróleo. O polietileno (PE), por exemplo, é formado a partir de reações de polimerização do etileno (Belle, *et al.*, 2020; Rabello, 2021; Kutz, 2011). Esse polímero é um termoplástico, podendo ser reprocessado novamente, sendo assim muito utilizado para embalagens devido às suas características e propriedades como resistências mecânicas e químicas, flexibilidade e impermeabilidade (Dziadowiec, *et al.*, 2023).

Uma das aplicações para o PE é a produção de filmes, e um dos métodos mais importantes e utilizados é a extrusão, pois permite processar polímeros em uma ou mais camadas, utilizada para diversas aplicações, como exemplo filmes multicamadas para embalar alimentos (Dziadowiec, *et al.*, 2023). Um dos setores industriais que mais utiliza filmes é a indústrias de embalagens, e são utilizados em sacolas, filmes agrícolas, sacos e embalagens flexíveis (Cantor, 2006; Horodytska, *et al.*, 2018). No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Plásticos, em 2022, 51,7% da produção total de plásticos foi de extrusão de filmes e entre as resinas mais utilizadas está o PE, com 39,6% de consumo (Abiplast, 2022).

O processo de extrusão se baseia na elevação da temperatura e fusão do PE. Na extrusão por sopro, o molde está na conformação de balão vertical (Kutz, 2011; Cantor, 2006). Nesse processo as características do grão de PE influenciam a estabilidade do balão e conseqüentemente das propriedades do produto (Kutz, 2011). Podem-se citar três variações de PE, sendo eles: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno linear de baixa densidade (PELBD), as quais influenciam nos parâmetros de estabilidade do balão e de processo, principalmente na vazão de filme, que é o principal parâmetro de produtividade (Cantor, 2006; Ming *et al.*, 2019).

O processo de extrusão é realizado por um equipamento conhecido como extrusora, que pode ser monocamada ou multicamada. As co-extrusoras podem processar filmes com mais de uma camada, acelerando o processo e obtendo uma

capacidade maior de produzir filmes e com propriedades melhoradas. A extrusão ocorre de forma simultânea de dois ou mais componentes em duas ou mais roscas formando assim mais de uma camada e facilitam o processamento, aumentando a produtividade e garantindo maior precisão na espessura do filme (Rauwendaal, 2014; Lira, 2017).

A grande diferença da extrusão por sopro para as outras é o fato de que o filme de polietileno sairá verticalmente da matriz, que no final será comprimido através de rolos em forma de filme. Realizar filmes multicamadas em co-extrusoras é mais viável financeiramente e produtivamente, pelo fato de ser muito custoso financeiramente fazer em múltiplas etapas e em várias monoextrusoras (Cantor, 2006; Hopmann e Michaeli, 2016).

Com isso, existem vários parâmetros operacionais que influenciam na estabilidade e na vazão de filme extrusado e conseqüentemente na produtividade do equipamento para extrusar o filme de PE. Essas variáveis que influenciam na produtividade e estabilidade são: temperaturas (roscas), pressão (roscas), velocidade de rotação das roscas, e vazão de gás (ar) na parte interna do balão (Cantor, 2006; Thyashan *et al.*, 2023). Porém, algumas delas possuem mais influência no processo e são limitantes.

Alguns autores como Dyadichev *et al* (2019, 2021) e Thyashan *et al* (2023), avaliaram possibilidades de melhorias na temperatura (rosca e matriz) e velocidade de rotação das roscas. Sorroche (2013) também avaliou como as temperaturas durante o processo impactam na velocidade e homogeneidade das roscas, a fim de otimizar essas variáveis. Lee (2015) analisou o filme extrusado correlacionando os parâmetros operacionais com a estabilidade do balão. Georgantopoulos *et al* (2022) avaliaram os impactos dos parâmetros de processos nas instabilidades das temperaturas de extrusão, fluxo e pressão em amostras de PELBD e PEBD, considerando como as propriedades intrínsecas de cada estrutura influencia no processo e no filme.

Decorrente disso, a proposta deste trabalho é realizar um estudo de caso sobre os parâmetros que influenciam a produtividade de polietileno, baseadas na vazão de filme extrusado em uma co-extrusora. Pretende-se identificar os parâmetros operacionais limitantes, podendo prever ações, com foco no aumento da capacidade produtiva do processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência dos principais parâmetros operacionais do processo através da co-extrusora de balão na vazão de filmes polietileno.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a influência da temperatura das roscas na estabilidade do balão e sua influência na vazão de filme extrusado.
- Analisar como a variação do parâmetro de resfriamento interno do balão (IBC) influencia na estabilização do balão e vazão de filme produzido.
- Verificar como a velocidade e a pressão das roscas influenciam na vazão.
- Avaliar as causas que resultaram nas limitações do aumento da vazão através da análise do comportamento dos parâmetros operacionais estudados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 POLÍMEROS

Polímeros são definidos como macromoléculas, e são formadas a partir da repetição de pequenas unidades estruturais conhecidas como monômeros. Uma das características principais desta molécula são as cadeias carbônicas extensas e alta massa molecular (Dziadowiec, *et al.*, 2023). As cadeias são ligadas por forças intermoleculares, que podem variar de forças de dipolo, Van der Waals e ligações de hidrogênio (Canevarolo, 2006).

Os polímeros podem ser orgânicos, os quais derivam de fonte naturais, sendo sintetizados pela natureza, mas também podem ser sintéticos geralmente produzidos em laboratório ou em grande parte derivados do petróleo. Como exemplo, pode-se citar o polietileno (PE), que é um polímero pertencente ao grupo das poliolefinas, derivado do petróleo. Existem também outros polímeros como: naturais inorgânicos, sintéticos inorgânicos, artificiais, semi-inorgânicos sintéticos, biopolímeros (Canevarolo, 2006; Rabello, 2021).

Os polímeros são resultantes de reações de polimerização, podendo ser por adição, radicais livres e diversas outras. Na polimerização por adição, a cadeia polimérica é obtida pela adição de um monômero “C” que vai reagir com um outro monômero “C” sucessivamente até formar uma macromolécula. Já a polimerização via radicais livres é feita pelo uso de iniciadores termicamente instáveis que irão iniciar o processo da reação gerando um sítio ativo que se propaga, levando ao crescimento da cadeia em alta velocidade, até que esse crescimento estabilize e ocorre o término da reação, ocorrendo por combinação de macro radicais formados, desproporcionamento, transferência de cadeia e transferência para o solvente gerando uma cadeia morta (polímero) (Canevarolo, 2006).

Outra reação de polimerização que é utilizada é a de coordenação, que possui o intuito de formar cadeias de polímeros lineares. Essa reação ocorre utilizando catalisadores metálicos de transição no meio. É uma síntese diferente da polimerização iônica, pois na coordenação a espécie ativa que garante o sítio de coordenação tem uma carga catiônica com estrutura coordenativamente insaturada. Diferentemente da polimerização iônica, em que a espécie ativa possui ligação

covalente. Essa característica da síntese por coordenação garante uma alta polimerização específica, devido a simetria do catalisador (Tanaka, 2023; Osakada, 2014).

Além das diferentes formas de síntese, os polímeros podem ser classificados como termoplásticos ou termofixos derivados do tipo de processamento que esses polímeros podem sofrer. Os termofixos, são polímeros que não são reversíveis, logo não são recicláveis, devido a sua estrutura molecular possuir cadeias com ligações cruzadas e reticulações, tornando a estrutura muito rígida (Canevarolo, 2006; Kutz, 2011). Já os termoplásticos, como é o caso do polietileno, são os polímeros mais utilizados e em diversos segmentos, principalmente na indústria de embalagens, pois podem ser reprocessados, reciclados e remoldados, uma vez que ao elevar a temperatura o polímero se torna moldável novamente devido ao amolecimento de suas cadeias a altas temperaturas e pressão.

Decorrente disso, o grande uso de termoplásticos nesse ramo ocorre devido a sua flexibilidade no processamento, resistência mecânica e reuso, tendo sua aplicação nas formas de filmes, sacolas e outras embalagens flexíveis. O reprocessamento ocorre em polímeros termoplásticos devido as suas ligações secundárias (entre cadeias) que possuem efeitos importantes nesse reprocessamento com o aumento da temperatura. Isso torna essas ligações mais maleáveis, comparado às ligações primárias (ao longo da cadeia), que não irão influenciar significativamente (Horodytska, *et al.*, 2018).

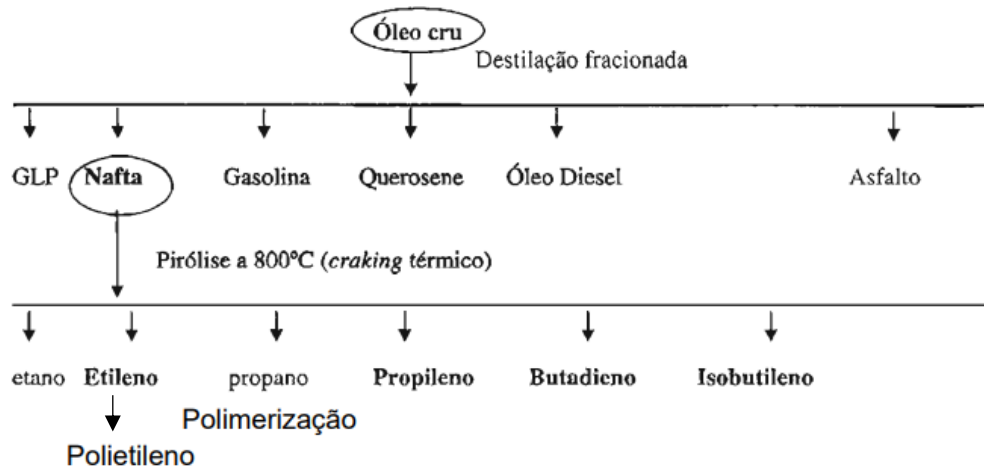
A natureza química e estrutural do polímero é influenciada pelo tipo de polimerização que conseqüentemente influenciará no reprocessamento desse polímero. No entanto, não retira a sua característica de termoplástico. As ramificações advindas de aditivações podem restringir movimentos molecular elevando a transição vítrea, maior modulo de elasticidade, maior dureza e resistência térmica (Canevarolo, 2006; Rabello, 2021; Kutz, 2011).

2.2 POLIETILENO

O polietileno (PE) é o polímero termoplástico de estrutura química mais simples, faz parte do grupo das olefinas, que são polímeros derivados do petróleo, como é visto na Figura 1. Possui uma estrutura parcialmente cristalina e flexível, o qual irá se alterar conforme suas variações de PE. Uma característica deste polímero

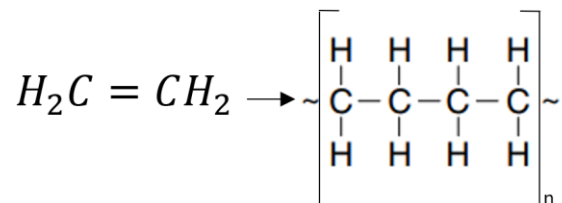
é que ele é inerte a maioria dos produtos químicos comuns, devido à natureza do seu grupo que provém de petrolatos. Além disso, possui características como resistência a tração, dureza e impermeabilidade, fazendo com que seu uso na indústria de embalagens seja atraente (Canevarolo, 2006; Cantor, 2006; Belle, *et al.*, 2020).

Figura 1- Esquema da derivação do polietileno.



Fonte: Adaptado, Canevarolo (2006).

Figura 2- Reação de formação do polietileno a partir do eteno.



Fonte: Adaptado, Cantor (2006).

Uma característica deste polímero é que ele é inerte a maioria dos produtos químicos comuns, devido à natureza do seu grupo e sua estrutura química (Figura 2). O PE possui ligações covalente carbono-carbono. Esse polímero pode ser formado pela polimerização de adição no monômero de etileno, por radicais livres formando o polietileno linear de baixa densidade (PELBD) e por coordenação formando o polietileno de alta densidade (PEAD), dessa maneira apresentando uma variada possibilidade de propriedades que dependem em grande parte do seu peso molecular e da forma de polimerização, constando assim, em estruturas diferentes (Kutz, 2011).

1.1.1 Polietileno de alta densidade (PEAD)

O polietileno de alta densidade (PEAD) é polimerizado por coordenação, o que resulta em cadeias poliméricas lineares. Possui maior grau de cristalinidade, e temperatura de fusão entre 130 °C e 135 °C e densidade em torno de 0,93 e 0,96 g/cm³ (Cantor, 2006). Apesar dessas características, seu processamento na extrusão de filmes é mais difícil, pois requer uma potência maior do motor e das roscas para uma boa homogeneização dos sólidos, além disso sua estabilidade é mais difícil comparado ao PEBD, já que tem uma resistência a fusão menor que o PEBD (Cantor, 2006; Rabello, 2021).

1.1.2 Polietileno de baixa densidade (PEBD)

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é obtido em condições de alta temperatura e pressão, através da polimerização por radicais livres (Canevarolo, 2016). Desta forma, cadeias ramificadas curtas e longas são formadas. Nesse tipo de PE o grau de cristalinidade do polímero diminui, além disso a temperatura de fusão de aproximadamente 105 a 115 °C. O PEBD possui maior rigidez nas cadeias devido as altas ramificações elevando na temperatura de transição vítrea (T_g), no entanto uma maior rigidez na cadeia não indica necessariamente a rigidez no produto, pois a rigidez do filme também depende do grau de cristalinidade, isso afeta no modulo de elasticidade, dessa maneira o filme de PEAD apresenta maior rigidez (Rabello, 2021; Cantor, 2006).

O nível mais baixo de cristalinidade se reflete em uma densidade menor entre 0,91 e 0,93 g/cm³, comparado ao PEAD. A tendência desse polímero é de ser facilmente processado comparando com outros PE, devido a sua temperatura de fusão ser mais baixa e não necessitando dessa maneira grande potência do motor da extrusora, no entanto possui uma elevada viscosidade, mas, as grandes ramificações permitem um processamento de filmes por extrusão com elevada resistência. (Cantor, 2006, Georgantopoulos *et.al*, 2022).

1.1.3 Polietileno linear de baixa densidade (PELBD)

O polietileno linear de baixa densidade (PELBD) é uma variação do PEBD, sua polimerização é feita de forma semelhante, no entanto o PELBD possui um teor de copolímeros maior que o PEBD, levando a uma estrutura diferente. A incorporação de copolímeros na cadeia leva a formação de ramificações que podem ser de cadeias curtas, dessa forma é possível controlar o grau de cristalinidade e densidade. Ainda há subdivisões do PELBD em ultra baixa densidade (ULDPE) e densidade muito baixa (*very low density*, VLDPE), e em geral a densidade do PELBD varia entre 0,88 a 0,93 g/cm³ (Canevarolo, 2006; Cantor, 2006).

A temperatura de fusão do PELBD varia entre 115 e 125 °C, no interior da extrusora seu comportamento é semelhante ao PEAD, necessitando de uma maior potência do motor. No entanto, na matriz da extrusora, que gera o molde do filme na conformação de balão, seu comportamento é semelhante ao PEBD, apesar de ter uma resistência a fusão menor. O PELBD possui características combinadas entre PEAD e PEBD, como por exemplo, a sua resistência é superior que o PEBD e semelhante ao PEAD, no entanto o seu toque é mais suave como o PEBD, porém menos rígido (Cantor, 2006).

2.3 POLIETILENO RECICLADO

Devido ao fato de o polietileno ser termoplástico, ele pode ser reprocessado, sendo assim, é um dos polímeros mais reciclados e reutilizados. A reciclagem do PE vem como uma alternativa para o ciclo de vida do polímero, após isso o polímero ganha valor industrial e comercial novamente, podendo ser utilizado para produção de embalagens na forma de filmes. A maior parte dos resíduos de PE reprocessados vem de embalagens plásticas virgens (não sofreram o processo de reciclagem). Esse processamento resulta na circularidade do material e reduz os resíduos de plásticos no ambiente (Ragaert, *et.al.*, 2017).

O reprocessamento do PE se dá de diferentes formas, sendo as duas principais formas: mecânicas e químicas. A mais utilizada é a reciclagem mecânica, por degradar menos a estrutura do PE, também conhecida como reciclagem secundária, utilizada para recuperação de resíduos plásticos, sendo utilizada somente com

monopolímero como é o caso do PE. A etapa inicia com a coleta e classificação do material. Após esse passo inicial, segue-se para a etapa da lavagem e moagem, a fim de produzir um material limpo e com maior qualidade. O material que sai da moagem é extrusado em forma de grãos, para ser usado em filmes (Ragaert, *et.al.*, 2017; Salem, 2009).

Com iniciativas ambientalmente amigáveis e visando o ciclo de vida maior para o PE, essa resina pós-consumo (PCR) começou a ser utilizada em embalagens flexíveis, e uma das variações de PE reciclado é o PEBD (Ragaert, *et.al.*, 2017). Existem filmes com diversos percentuais de PCR, os quais influenciam diretamente nas propriedades da embalagem, por isso dependendo da aplicação tem-se PCRs utilizadas juntamente com resinas virgens (que não foram reprocessadas), essa mistura garante propriedades características para o produto, logo além da circularidade garante propriedades intrínsecas ao produto (Martín, *et.al.*, 2022).

2.4 FILME DE POLIETILENO

O filme é o produto resultante da extrusão de um polímero, para ser considerado como tal, é necessário que ele tenha espessura abaixo de 500 µm. Um dos polímeros mais utilizados é o polietileno, pois possui alta resistência a tração, flexibilidade, impermeabilidade e outras propriedades que são características do tipo de PE que é empregado. Esses filmes são utilizados em vários setores, sendo o que mais emprega esse produto é o setor de embalagens na forma de filmes agrícolas, filmes multicamada para alimentos e embalagens para o setor moveleiro (Rabello, 2021; Rauwendaal, 2014; Horodytska, *et al.*, 2018).

A estrutura e as propriedades, como tensão, espessura, opacidade e largura do filme são influenciadas pelo tipo de extrusão, que pode ser do tipo *casting* e *blown* (Sopro). Outro fator que influencia é os tipos de PE utilizados na formulação juntamente com os aditivos. A extrusão por sopro conforma o filme em formato de balão, o qual sairá da matriz de forma vertical na extrusora. Após, percorre uma distância até que os rolos compressores comprimem o balão e formam o filme (Cantor, 2006; Dziadowiec e Matykiewicz, 2023).

O filme irá possuir as características do tipo de PE utilizado, ou seja, filmes de PEAD tem alta resistência e rigidez, como consequência há redução da espessura dos filmes devido ao seu elevado grau de cristalinidade. Para o PEBD o filme é mais

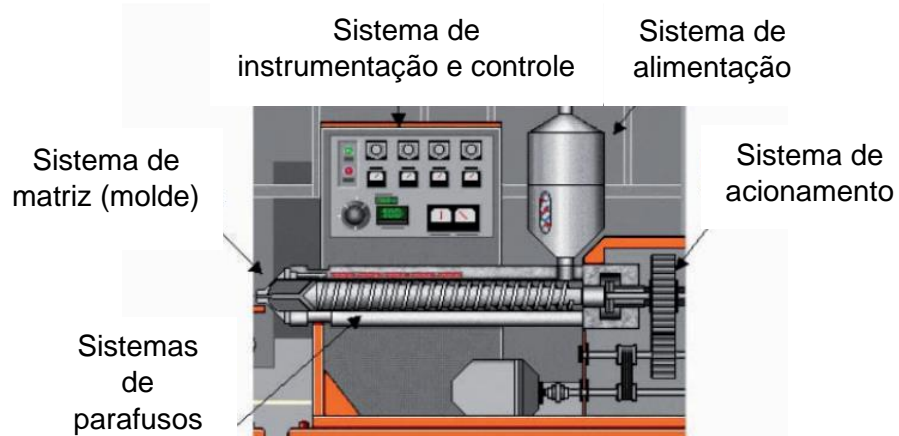
flexível, no entanto não tão resistente quanto o PEAD, e o PELBD possui um filme com características combinadas de ambos (Cantor, 2006).

2.5 EXTRUSÃO DE FILMES POR SOPRO

A extrusão é o processo que utiliza uma fonte de calor para elevar a temperatura e causar a fusão dos materiais. Esse processo é realizado por um equipamento conhecido como extrusora, que possui roscas internas com objetivo de elevar a temperatura causando uma fusão do material, além de transportá-lo até a matriz e evitar a degradação do material. É necessário que as roscas estejam em boas condições para evitar a má homogeneização, degradação, aumento de pressão e outros problemas. Como exemplo, pode afetar a espessura do filme, sendo menor que o valor especificado, e a produtividade do processo (Kutz, 2011; Cantor, 2006).

Existem três funções principais que a extrusora deve cumprir, sendo elas: homogeneizar os componentes, minimizar a variação de temperatura ao decorrer da rosca e minimizar a variação de pressão de fusão, com objetivo de garantir a qualidade do produto. A extrusora possui cinco componentes, conforme apresentado na Figura 3, que são: acionamento, alimentação, parafuso, matriz e instrumentação e controle (Cantor, 2006; Kutz, 2011).

Figura 3 – Esquema ilustrativo dos cinco sistemas de composição de uma extrusora.



Fonte: Adaptado, Cantor (2006).

O sistema de acionamento fornece a energia mecânica ao material através da rotação dos parafusos, e esse sistema é composto por motor, redutor de velocidade

e um impulso. O motor é a fonte de energia que faz rodar o parafuso e dá energia ao sistema, as três fontes de consumo de energia são: fusão de sólidos pela fricção e alta temperatura, transporte do polietileno fundido, que possui alta viscosidade, e o bombeamento do fluido até a matriz (Cantor, 2006).

O sistema de alimentação é responsável por introduzir na extrusora o material sólido a ser extrusado. Seus principais componentes são a tremonha e a garganta de alimentação. O transporte dos silos que armazenam o material para a tremonha pode ocorrer por carregadores a vácuo, além disso, a tremonha é responsável por reter os sólidos antes de entrarem na rosca (Cantor, 2006; Kutz, 2011; Chung 2019).

A tremonha deve ser circular a fim de minimizar o atrito do material alimentado na abertura da rosca que pode ser circular ou quadrada. É importante ressaltar que a zona de temperatura de alimentação não é tão alta como outras zonas ao decorrer da rosca, mas deve ser o suficiente para começar a amolecer o material (Cantor, 2006; White 2003). Instabilidades na tremonha de alimentação causam problemas no fluxo de material que está sendo alimentado para as roscas, logo gera sinais nos filmes devido à má alimentação, como marcas e arranhões (Rauwendaal, 2014).

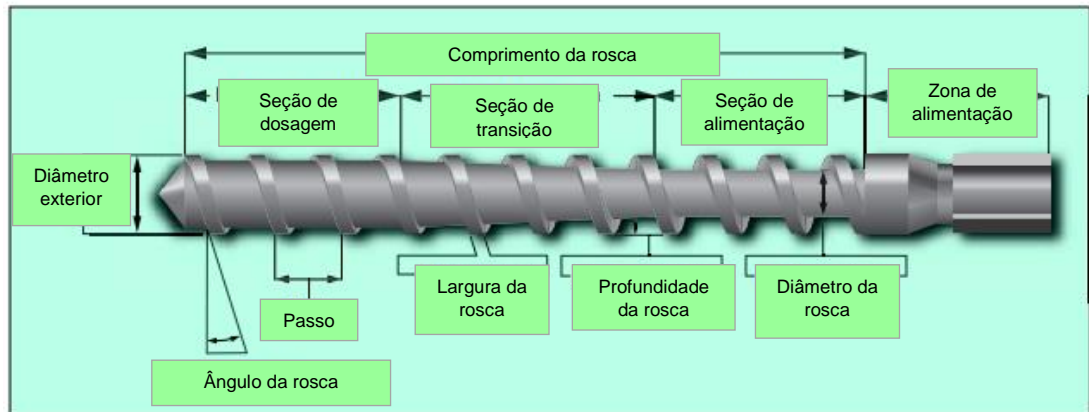
O sistema de roscas (parafusos) é o principal sistema da extrusora, pois não somente funde os sólidos, como também transporta o material fundido pela rosca até a matriz. O parâmetro de processo que controla o transporte é a velocidade de rotação da rosca. Na verdade, é um dos principais parâmetros operacionais que influenciam na vazão de filme extrusado. A rosca precisa estar bem conservada a fim de conseguir atingir uma boa velocidade de rotação (Rauwendaal, 2014; White 2003).

É extremamente necessário que a fusão seja homogênea e a temperatura e pressão sejam constantes, podendo resultar em variações no produto caso ocorra algum desvio significativo nesse sistema. A rosca é definida como uma haste longa (Figura 4), e é possível observar que existem três seções principais: a alimentação, a transição e a dosagem. Também é notável que o espaço entre as roscas é o que contribuiu para a compressão da rosca, geralmente essa profundidade é maior na seção da alimentação, cuja pressão é considerável, no entanto vai diminuindo ao longo da seção de transição (Cantor, 2006).

O sistema de matriz, também conhecido como sistema de molde (Figura 5), recebe o material fundido nas roscas e forma o balão com injeção de ar. Para que isso ocorra, há um conjunto de peças essenciais que são: o adaptador, o separador, o filtro e o cabeçote (Cantor, 2006). A saída da rosca está ligada com a entrada do sistema

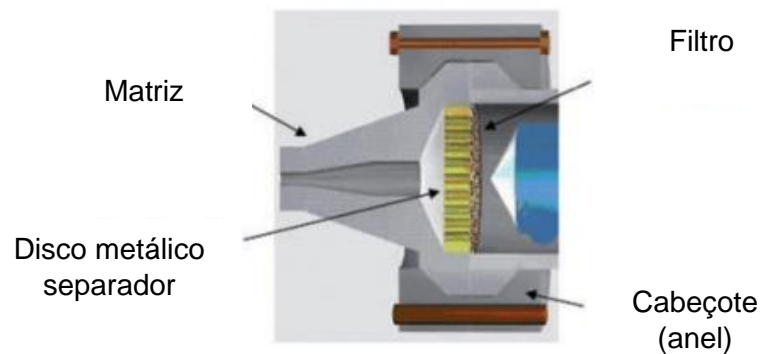
de matriz, com isso um adaptador é necessário para suportar e direcionar o fluxo do material fundido até a entrada no molde. Esse adaptador também é necessário para controlar a temperatura que sai da rosca e está entrando na matriz (Rauwendaal, 2014).

Figura 4 - Esquema de rosca na extrusora.



Fonte: Adaptado, Cantor (2006).

Figura 5 - Esquema da montagem da matriz.



Fonte: Adaptado, Cantor (2006).

Outro componente desse sistema é o disco metálico separador, que se encontra perpendicularmente ao fluxo do fluido na saída da rosca, e tem por objetivo selar a extremidade da rosca e segurar o conjunto de filtros que está disposto na entrada da matriz e endireitar o fluxo de massa. Com isso, é importante que o disco esteja alinhado, pois um desalinhamento leva a fugas de material, além de ser mais um componente que auxilia na mistura para que o fluido continue homogêneo (Rauwendaal, 2014; Cantor,2006).

Já o filtro tem como principal função remover os contaminantes presentes da massa fundida, que podem ser originados por detritos que entram na alimentação ou desgastes do equipamento devido ao atrito com a massa ao decorrer do tempo. Existem três tipos principais de filtros: trocadores de tela descontínuos, pacotes de tela e trocadores de telas contínuos (Cantor, 2006).

Como visto na Figura 5, a massa fundida passa por esse filtro, logo é necessário verificar a pressão que a massa gera no filtro da rosca, pois quando o filtro começa a ficar com vários acúmulos a pressão aumenta significativamente. Logo o rendimento da filtragem diminui e há uma elevação da pressão na rosca. Isso implica em uma diminuição da vazão de filme, afetando diretamente na produtividade (Cantor, 2006; Agassant, 2017).

No sistema de matriz, a massa fundida é levada a formar o balão. Existem vários tipos de matrizes, no entanto é comum uma geometria interna que direciona o fluxo. Caso não haja uma conexão correta do fluxo com o orifício do molde, o filme irá sair diferente das especificações, alterando as suas características e propriedades, podendo causar marcas e degradação do produto (Cantor, 2006).

Além disso, o cabeçote presente na matriz possui arrefecimento térmico, a fim de auxiliar na solidificação da massa fundida que sai pela matriz. Outro ponto é que geralmente essa área pode ser isolada com intuito de reduzir a perda de calor para o ambiente devido a sensibilidade da temperatura da matriz devido a influência da temperatura ambiente (Cantor, 2006).

O sistema de instrumentação e controle é de extrema importância, a fim de controlar e mensurar as temperaturas (rosca, massa, matriz e cabeçote), a pressão (roscas e cabeçote), a velocidade das roscas e vazão (produtividade da máquina). É importante ressaltar que possui outras variáveis que afetam o processo, no entanto, essas são as principais (Cantor, 2006).

Com o devido controle e bons instrumentos que permitam medir os fatores que possuem maior influência no processo, é possível identificar os problemas ao decorrer da extrusão e evitar que o processo se torne instável. Esse controle é feito através de um painel contendo todos os dados (Rauwendaal, 2014).

Existem dois tipos de extrusores para realizar a extrusão por sopro, o primeiro tipo é a monocamada, que possui somente uma rosca e produz somente uma camada, devido a isso é um equipamento menor, e não suporta vazões tão elevadas como as co-extrusoras. Essas, por sua vez, possuem duas, três ou mais roscas, podendo

misturar mais de dois componentes e realizar mais de uma camada (Cantor, 2006), além de resultar em produtividades de filmes maiores que as extrusoras monocamada. A eficiência e a qualidade do produto são diretamente dependentes dos parâmetros e de cada equipamento que possui características peculiares de processamento, no entanto variáveis como temperatura, pressão e vazão de gás são parâmetros gerais (Cantor, 2006; Chung, 2019).

A extrusão por sopro possui certa complexidade, pois é um processo que envolve cristalização e resfriamento do material enquanto ele é inflado e esticado para adquirir a conformação de filmes. Logo é necessário um controle nas temperaturas e pressão, principalmente na parte de solidificação do material que sai na conformação de balão, a fim de garantir a estabilidade do balão e do processo, sem perder produtividade (Agassant, 2017).

2.6 CO-EXTRUSÃO POR SOPRO PARA FILMES DE POLIETILENO

A co-extrusão é utilizada com finalidade de produzir filme multicamadas, e permite a combinação de dois ou mais componentes diferentes, com o intuito de obter filmes com propriedades específicas (Lira, 2017). A mais utilizada é a extrusão por sopro, em que o seu molde forma um balão de PE para produção de filmes (Cantor, 2006).

As camadas formadas contribuem para propriedades mecânicas, físicas e químicas, como por exemplo, aumento da resistência mecânica e baixa permeabilidade a gases (Cantor, 2006; Lira, 2017). Com isso, o filme extrusado é utilizado em diversas áreas industriais como embalagens, atendendo as indústrias diversas como, alimentos, moveleira e agrícolas.

Esse processo é mais complexo, no entanto mais econômico no ponto de vista que o filme não passa por mais de uma etapa de processo, caso fosse realizado em monoextrusoras. Como a co-extrusão é um processo mais completo, há maior necessidade de controle da linha de filme soprado, que aumentam o desempenho do processo e produto (Cantor, 2006; Hopmann e Michaeli, 2016).

Se comparada a uma extrusora monoroscas, as principais diferenças estão na organização do equipamento e na utilização de mais roscas. Com isso, a alimentação do processo é similar à de uma extrusão de uma monocamada, no entanto há um alimentador para cada rosca, e cada uma pode conter um material diferente. Isso gera

no mínimo dois fluxos, pois irá depender da quantidade de material disposto em cada rosca. Cada rosca apresenta um sistema para elevar a temperatura, fundir o material e levá-los até a matriz (Chung, 2019).

A matriz de uma co-extrusora é o ponto de junção dos fluxos de cada roscas formando múltiplas camadas em um único filme. (Hopmann e Michaeli, 2016; Chung, 2019). Devido a isso, a matriz, o cabeçote e o sistema de molde da co-extrusora são um pouco diferenciados, devido a maior quantidade de roscas envolvidas. Um ponto extremamente importante para esse processo é a boa adesão entre os componentes, ou seja, eles precisam ser compatíveis para formar as camadas e atingir as propriedades necessárias para a aplicação dos filmes (Hopmann e Michaeli, 2016; Lira, 2017).

As matrizes utilizadas para esses processos de co-extrusão são comumente fabricadas com fendas de saídas, em que o polímero fundido flui através da matriz em canais separados, os canais seguem separados até saírem pelo orifício formando duas camadas em um único filme (Hopmann e Michaeli, 2016; Chung, 2019).

A mais comum e utilizada no processo de co-extrusão por sopro é a matriz de mandril em espiral, nesse molde o polímero é dividido em canais na forma espiral, e a profundidade dos canais é reduzida na direção do fluxo (Rauwendaal, 2014). Diferente da matriz de mandril, também existe a matriz empilhada, conhecida como panquecas devido ao seu formato, em que o polímero escoar entre os espirais na empilhadeira (Cantor, 2006).

Outro modelo que é utilizado para a produção de filmes de três camadas é uma matriz mista. A vantagem desse modelo é que não produz somente filmes com três camadas, mas também com camadas superiores, pois é equipada com mecanismo rotativo e com resfriamento interno (Hopmann e Michaeli, 2016).

Existem três variáveis que afetam a distribuição do fluxo em matrizes do tipo mandril em espiral, sendo elas: número de aberturas (ranhuras), folga inicial e ângulo de hélice da abertura. Esses fatores afetam a distribuição e uniformidade do fluxo, sendo que um aumento no número de ranhuras reduz a queda de pressão, uma folga diferente de zero melhora a distribuição e reduz a queda de pressão, e pequenos ângulos de hélice melhoram a distribuição, mas aumentam a perda de carga (Rauwendaal, 2014).

Os valores de ranhura variam entre 1 e 2 polegadas e os ângulos entre 1° e 3°. A uniformidade da distribuição é influenciada pela profundidade das aberturas, e

outras variações podem decorrer devido as variações de consistência no polímero fundido e não uniformidades de temperatura ou tempo de misturas insuficientes, além de que o fluxo é afetado por variações mecânicas tanto das roscas quanto do molde, conseqüentemente tudo afeta na boa qualidade do filme e nas suas propriedades (Rauwendaal, 2014).

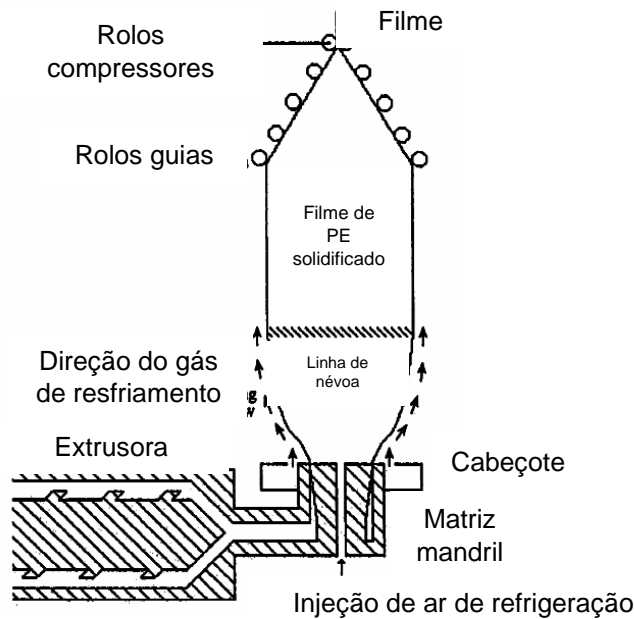
2.7 PARÂMETROS OPERACIONAIS DA CO-EXTRUSÃO POR SOPRO

Os parâmetros operacionais são aqueles que influenciam diretamente no processo e são essenciais para que a extrusão ocorra. Os principais parâmetros são: temperatura, pressão, velocidade das roscas e vazão de gás. No entanto, além dessas variáveis a temperatura ambiente também pode influenciar na produtividade e intervir em outros parâmetros como as temperaturas das matrizes, cabeçote e roscas, além disso a fluidez do material aplicado no processo possui bastante influência (Cantor, 2006; Vlachopoulos 2003; Chung, 2019).

Esses parâmetros alteram a estabilidade dimensional do balão, sendo um dos parâmetros mais influentes a vazão de gás injetado na matriz, temperatura e fluidez dos materiais utilizados. A estabilidade é importante, pois é ela que limita o processo para o aumento da capacidade produtiva nas condições operacionais, pois é a garantia de segurança do processo. Na Figura 6 é possível observar como ocorre a extrusão, em que o polímero fundido na rosca é levado até a matriz (Cantor, 2006; Chung 2019).

No cabeçote da matriz há um sistema de refrigeração, para auxiliar na solidificação do material que está entrando na matriz e saindo por ela. Nessa etapa também possui o sistema conhecido como IBC (sistema de refrigeração interno do balão), facilitando a rapidez de resfriamento e solidificação na parte interna do filme, esse refrigeração é realizado através de um gás resfriado, que é inserido na matriz. A refrigeração interna facilita a troca térmica do balão que sai aquecido da matriz. Ao longo do balão, há uma estrutura guia e sustentação garantindo a direção e estabilidade do balão, e no final há rolos compressores seguido por vários rolamentos que esticam o filme (Cantor, 2006; Vlachopoulos 2003; Chung 2019).

Figura 6- Esquema dos parâmetros operacionais de uma extrusão por sopra.



Fonte: Adaptado, Vlachopoulos (2003).

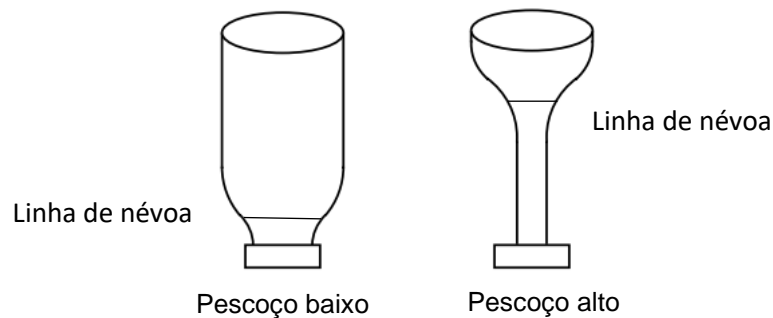
2.7.1 Velocidade de gás e resfriamento interno do balão

A velocidade da injeção de gás (ar) auxilia na troca térmica e no resfriamento interno do balão, além de ter relação com a estabilidade do balão, influenciando também na vazão de filme extrusado. Uma instabilidade no balão não garante a espessura necessária do filme e nem a continuidade do processo, afetando a vazão de filme extrusado (Hopmann e Michaeli, 2016). Alguns fatores que influenciam a instabilidade do balão são a temperatura da matriz e das roscas. A temperatura dessas regiões está elevada devido à fusão do material, além disso a temperatura do cabeçote também pode influenciar, caso o sistema de refrigeração não esteja adequado (Kolarik, 2012). Além delas, a velocidade do gás de refrigeração, temperatura externa e umidade do ar influenciam na eficiência do resfriamento do balão (Cantor, 2006).

Logo para que o balão estabilize é necessário que o material fundido solidifique, sendo necessário a injeção de ar e resfriamento no cabeçote que irá agilizar esse processo. Como visto na Figura 6, o balão se estende verticalmente por uma determinada distância necessária para que ocorra a reordenação das cadeias poliméricas e para que haja a solidificação do material corretamente (Hopmann e Michaeli, 2016).

Além disso, outro fator que afeta o balão é a composição da mistura e o tipo de PE que está sendo extrusado, logo o tipo de PE irá contribuir para a forma do balão. Na Figura 7 é possível observar dois tipos de balão, um com “pescoço” baixo e outro alto. Isso influencia na linha de névoa, que é uma marcação de transição do fluido fundido para a solidificação. Uma linha mais baixa indica um pescoço menor, levando a uma estabilidade balão (Cantor, 2006; Agassant, 2017; Almeida, 2016).

Figura 7 - Tipos de balão na extrusão por sopro.



Fonte: Adaptado, Cantor (2006).

É notável que quanto maior for o pescoço menor será a capacidade de aumentar a vazão e a produtividade do processo, pois mais difícil será a estabilidade. (Cantor, 2006; Lee, 2015, Agassant, 2017). A linha de névoa é afetada pela velocidade de rotação das roscas e na velocidade do gás inserido, parâmetros diretamente influentes na vazão de filme extrusado e na taxa de gás inserida no balão.

Cantor (2006), Butler (2000) e Waller (2002), analisaram que o sistema de troca de ar, conhecido como resfriamento interno do balão (IBC), aumenta a eficiência de resfriamento e solidificação do balão. Consequentemente há impactos no aumento da vazão de filme. O sistema de IBC em conjunto com o anel de ar convencional (cabeçote) da máquina, fornecem arrefecimento na parte interior e exterior do balão, mas além disso efetua um controle de circuito fechado do diâmetro necessário do balão, garantindo sua estabilidade e ajustes necessários nas vazões de gás de entrada e saída (Cantor, 2006).

No entanto, problemas nas válvulas de arrefecimentos causam instabilidades no balão, tendo como solução a diminuição da temperatura de fusão na saída da extrusora. Portanto a vazão de gás é importante para a solidificação do material que sai da matriz, e esse material deve ser solidificado rapidamente para que sua forma e estrutura sejam mantidas (Ferreira, 2015).

A temperatura vai decaindo conforme a altura do balão e a viscosidade do polímero aumentam, passando pela transição vítrea para o estado sólido. Portanto uma maior velocidade de gás na entrada e na saída, aumenta a troca térmica e a velocidade de solidificação (Francis, 2016). A instabilidade nestes parâmetros é prejudicial e não desejada, pois alteram características, propriedades visuais e mecânicas dos filmes.

2.7.2 Zonas de temperatura de fusão nas roscas

As zonas de temperaturas de fusão nas roscas, é um dos parâmetros operacionais essenciais, pois influenciam na vazão, segurança e qualidade do processo. Basicamente existem duas fontes de calor utilizadas para a elevação da temperatura para fusão, sendo elas, calor advindo de energia mecânica que é gerada pelo atrito viscoso do material com a rosca e aquecedores externos, comumente utilizados resistores elétricos. Geralmente a segunda fonte de energia é dominante para garantir a fusão do material, ficando na faixa entre 80 e 90%, e os outros 20-10% são provenientes do atrito do material com a rosca (Rauwendaal, 2014).

A temperatura nas roscas é caracterizada por zonas, a fim de garantir a fusão adequada, de forma que não haja degradação do material, cada zona indica uma etapa de fusão do material dentro da rosca, logo cada parte da rosca apresenta faixas de temperaturas de *setup* geralmente diferentes e tendem a aumentar conforme aumenta o comprimento da rosca. Os parâmetros de temperatura e velocidade de rotação nas roscas podem ser correlacionados entre si, pois uma alteração em alguma dessas três propriedades leva a sutis ou bruscas alterações nas demais, afetando a produtividade do processo e a estabilidade do balão (Agassant, *et.al.* 2017).

A temperatura é muito influenciada pela taxa de resfriamento e pelas tensões exercidas no polímero durante a fusão e cristalização, logo a temperatura é um parâmetro amplamente estudado, no entanto existem infinitas possibilidades relacionadas a influência da temperatura no processo (Agassant, *et.al.* 2017). Em extrusoras monocamada essas zonas variam entre 5 a 8 (Sorroche, 2015). No entanto, em co-extrusoras essas roscas têm maiores zonas de temperatura de acordo com o tamanho de cada rosca utilizada e de cada equipamento.

Essa subdivisão de zonas de temperatura ocorre devido à necessidade de uma boa homogeneização do material sem degradá-lo, normalmente são subdivididas em

três categorias sendo elas: temperatura da zona de alimentação, de fusão, e de homogeneização do polímero fundido que irá para a matriz (White, 2003).

Além disso é necessário ter um controle para que as temperaturas de *setup* (ideal), não estejam com grande discrepância em relação à real (no processamento). Isso pode causar dois tipos de problemas iniciais, o primeiro ocorre se a temperatura real for muito abaixo da estimada, levando a má homogeneização, e conseqüentemente, a um filme com falhas e baixa resistência, fluidez e em alguns casos falhas visuais, como manchas. Já em altas temperaturas, o material pode degradar e causar problemas de resistência mecânica no filme (Sorroche 2013, White, 2003).

Além das temperaturas das roscas, uma outra zona de temperatura é relatada para a matriz, ou seja, na parte em que o molde do filme extrusado é formado. Nessa zona além da alta temperatura necessária para a fusão do PE, é necessária uma corrente de água fria no cabeçote, responsável pela refrigeração da matriz, a qual auxilia no processo da solidificação do filme e estabilização do balão, juntamente com a saída e entrada do fluxo de gás (Rauwendaal, 2014).

Segundo Cantor (2006), Butler (2000) e Waller (2002), é necessário diminuir a vazão de filme que está sendo extrusado, pois a alta temperatura da matriz causa uma instabilidade do tipo respiração da bolha. Esse fenômeno é explicado devido a variação de volume de ar dentro do balão periodicamente e afeta a espessura do filme.

Escobar (2019), também evidenciou que problemas de acionamento de aquecimento, nas roscas e na matriz, podem gerar instabilidades de alta frequência, as quais estão associadas ao fluxo de material que deixa a matriz. Essa instabilidade pode se manifestar de forma que a superfície do filme fique distorcida, gerando dobras, além de afetar também na fratura de fusão.

2.7.3 Velocidade de rotação das roscas

O principal objetivo da velocidade de rotação das roscas é fornecer para a matriz a maior quantidade de PE fundido em um intervalo de tempo, diminuindo o tempo de residência do material na rosca. Além disso, tem como função gerar uma fusão adequada e homogênea do material. O aumento da produtividade do processo faz com que o tempo de mistura na rosca seja menor, logo o material tende a ser

menos homogêneo, afetando na estabilidade do balão, a qualidade do filme e suas propriedades visuais e mecânicas (Rauwendaal, 2014).

Sikora e Janusz (2001), constataram que a velocidade da rosca está diretamente ligada com a vazão de filmes extrusado, logo para que haja um aumento da capacidade produtiva é ideal que a velocidade de rotação não esteja tão elevada, mas que esteja no valor proporcional, a fim de obter a maior capacidade produtiva abaixo da velocidade de desarme do equipamento. Uma velocidade de rotação das roscas muito elevada pode comprometer a estabilidade do balão e a qualidade do produto. Aliado a esse parâmetro está a temperatura, a qual pode contribuir para uma desestabilidade e isso leva a uma diminuição da capacidade produtiva, pois o aumento da velocidade faz com que o atrito aumente, logo há uma parcela da fusão do material pelo atrito com a rosca, o qual libera calor (Sorroche, 2013).

É importante ressaltar que a velocidade de rotação é dependente do tipo de PE e com quais aditivos ele está sendo misturado. A fluidez e a temperatura de fusão interferem na velocidade de rotação, assim como a geometria das roscas e a composição da mistura que está presente em cada rosca influencia na velocidade rotação (Rauwendaal, 2014; White 2003; Thyashan, 2023).

A velocidade de rotação das roscas depende da capacidade do motor e do consumo energético. Normalmente encontram-se valores entre 300-600 rpm, para extrusoras monoroscas de pequeno porte, no entanto podem ser projetadas para maiores velocidades, a fim de aumentar a produtividade do processo. Um aumento na velocidade de rotação ocasiona um aumento no cisalhamento e na temperatura da massa, além de aumentar o consumo energético (Thyashan, 2023).

Além disso, o tipo de polímeros utilizados na formulação do filme influenciará na capacidade de maior rotação na rosca conseqüentemente influenciando na pressão da rosca que é exercida pela massa. A geometria da rosca utilizada também influencia no desempenho de fusão do material e no seu cisalhamento, logo as rotações máximas são controladas pelo sistema de acionamento do equipamento (Rauwendaal, 2014; Thyashan, 2023; White, 2003).

Segundo Thyashan (2023), para o PEBD, nota-se que o aumento de rotação pode elevar o calor viscoso e altas forças de cisalhamento na rosca, logo velocidades altas influenciam em propriedades mecânicas mais fracas. Em contraponto, não se deve analisar as velocidades de rotação sozinhas nas propriedades mecânicas e na fluidez do material, pois as temperaturas fixadas no processo influenciam

simultaneamente. É importante ressaltar que a velocidade de rotação contribui para a fusão do PE devido ao atrito que é gerado do material na rosca, logo a fusão do material se dá através de resistências elétricas e o atrito causado nas roscas.

2.7.4 Pressão da massa fundida nas roscas

A pressão da massa fundidas nas roscas, tal como a a temperatura é um parâmetro influenciado pelo polímero fundido que está sendo transportado na rosca. O fluxo de pressão surge devido ao gradiente de pressão que existe na rosca, impulsionado principalmente pelo fluxo de água utilizado para refrigeração, próximo da ligação entre rosca e matriz. Nesse ponto ocorre um fluxo de pressão pura, impactando as outras zonas das roscas (Rauwendaal, 2014).

O aumento da pressão também ocorre devido ao preenchimento de material entre os passos das roscas com o tempo, pois há formação de uma fina película do PE fundido no fundo das roscas, devido ao transporte dos grãos de PE fundidos, ao longo do comprimento da rosca. Originalmente a distância entre os passos tem a pressão nula, pois não há material entre eles, no entanto, quando o fluxo começa, a tendência é que após a fusão do PE, há formação de películas que se depositam na distância entre os parafusos e com o tempo aumentam a pressão na rosca (Agassant, 2017).

Assim como Agassant (2017), Rauwendaal (2014) também descreve que fluxo de pressão ocorre devido ao gradiente de pressão. Outro fator que gera esse diferencial são os depósitos de material no filtro que fica entre o final da rosca e o início da matriz. Com o acúmulo de material fundido e detritos, a pressão da rosca aumenta com conseqüente redução do rendimento produtivo.

A pressão é um parâmetro muito importante, pois além de afetar o fluxo de filme extrusado, afeta diretamente o aumento da velocidade das roscas. Sorroche (2015) constatou que, com uma elevada pressão, a velocidade tende a ser reduzida, tal como o rendimento produtivo.

A fim de garantir a estabilidade dimensional do balão e a segurança do processo a pressão é um dos parâmetros operacionais que estão ligados com a segurança do equipamento, logo é um parâmetro que exige seu controle cuidadoso, desta forma é importante delimitar uma faixa de operação ótima, que resulte em um bom rendimento produtivo. O sistema de instrumentação e controle do equipamento

garante que as pressões estejam controladas, através de estudos como o de Rauwendaal (2014), há uma relação quase linear entre a pressão e a vazão, mas nota-se que a variação de temperatura pode afetar a leitura dessa variável.

2.8 ESTUDOS NA ÁREA DE CO-EXTRUSÃO E PARÂMETROS OPERACIONAIS

Luo (2019) e Qu (2018), buscaram obter novas estratégias para produção do filme multicamadas de PE. Luo (2019) traz a utilização de uma co-extrusora com matriz rotativa, a fim de combinar a circulação de cisalhamento da resina na matriz e alterar o fluxo da pressão presente na matriz. Logo, nessa modalidade existe a velocidade de rotação do mandril que deve ser considerada como um parâmetro adicional, interessante observar que cada rosca possui a mesma vazão saída, a fim de analisar a qualidade do filme.

Qu (2018) retrata uma abordagem de fácil fabricação para escala industrial, desenvolvendo um novo método de co-extrusão de filmes por sopro, através da distribuição de homogeneização de rotação, em que os materiais estarão sujeitos a um único campo de fluxo que combina forças de cisalhamento e fluxo de pressão causando um fluxo laminar. Da mesma forma descrita por Luo (2019), há uma matriz rotativa e a velocidade da matriz entra como um parâmetro operacional.

Abeykoon (2014) estudou a possibilidade de correlação entre a demanda energética do processo e a estabilidade térmica necessária e constatou que a sua relação é complexa e dependente de parâmetros operacionais e das configurações do equipamento. Os sistemas de aquecimento e arrefecimento mostraram que nem sempre há uma redução com a diminuição da velocidade de rotação das roscas e que a vazão de filme extrusado aumenta com a velocidade das roscas, logo também as temperaturas tendem a aumentar.

Georgantopoulos (2022) avaliou as instabilidades geradas pelo fluxo de filme extrusado, um problema encontrado na estabilidade dimensional. Pode ser categorizado como variações de volume e geralmente o balão não suporta o aumento da vazão de filme, e acaba gerando instabilidade operacional. Logo, é importante como a instabilidade do fluxo de fusão pode impactar no processo, caracterizando com base no tempo e na sua periodicidade. Além disso, observou-se que o tipo de PE utilizado na mistura do filme impacta diretamente na análise e na modelagem do problema.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Uma blenda composta de dois tipos de polietileno, sendo eles pós-consumo reciclado (PCR) e polietileno virgem foi utilizada, na extrusão de dois filmes: P1 e P2. Além disso, foram acrescentados a blenda aditivos que conferem características específicas para o produto.

A fim de manter a confidencialidade dos processos e produtos, não foram divulgados detalhes específicos sobre composição da blenda e sua proporção. Com isso, para o estudo de caso do presente trabalho utilizou-se exclusivamente uma única formulação, de modo que ela não interferiu nos parâmetros operacionais que foram avaliados, pois não houve variação na composição da mistura das blendas, sendo a espessura e a largura do balão as únicas diferenças entre os dois filmes.

3.2 MÉTODOS

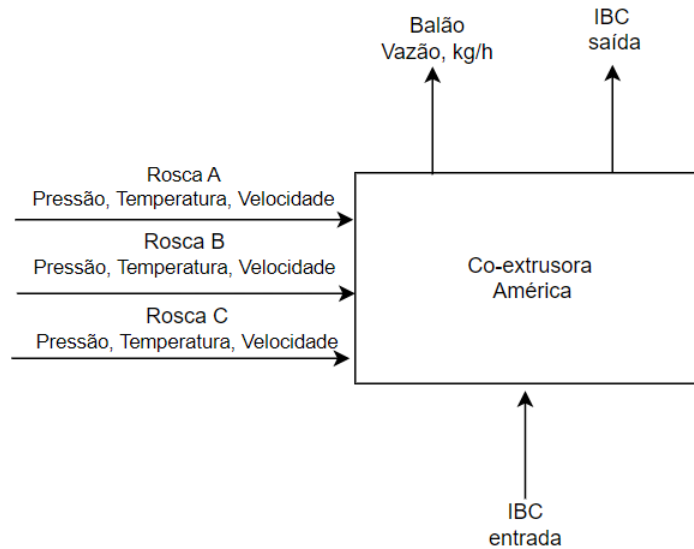
Os parâmetros operacionais foram estudados para os dados de filmes extrusados na co-extrusora de balão América – Mega Steel (Coex A), que possui roscas do modelo Maddock. O equipamento foi escolhido pois apresenta maior capacidade produtiva e por ser a mais completa em relação a parâmetros operacionais. Sua capacidade é de produzir filmes com três camadas, possuindo três roscas denominadas A, B e C. O equipamento é formado pelo sistema de instrumentação, alimentação, roscas, matriz e sistema de interno de resfriamento do balão (IBC) característico desse modelo.

Inicialmente foi realizada uma seleção de dois filmes (P1 e P2), com mesma proporção dos dois componentes na formulação, variando a espessura e a largura do filme. A coleta dos parâmetros operacionais foi realizada diretamente na co-extrusora pelo sistema de instrumentação do equipamento. Esses dados foram coletados e disponibilizados em uma ficha, com as seguintes variáveis: temperatura das roscas, pressão das roscas, IBC e velocidade de rotação.

Um esquema representando os parâmetros operacionais no equipamento é apresentado na Figura 8. Na sequência, foram realizadas quatro coletas de dados, em diferentes vazões de filme extrusado do processo, presentes na Tabela 1. Esses

valores foram utilizados para a análise do comportamento dos parâmetros operacionais limitantes no processo de extrusão dos filmes. Importante ressaltar que essas coletas foram realizadas em datas e horários diferentes.

Figura 8 - Esquema do funcionamento dos parâmetros operacionais na co-extrusora américa.



Fonte: autora (2024).

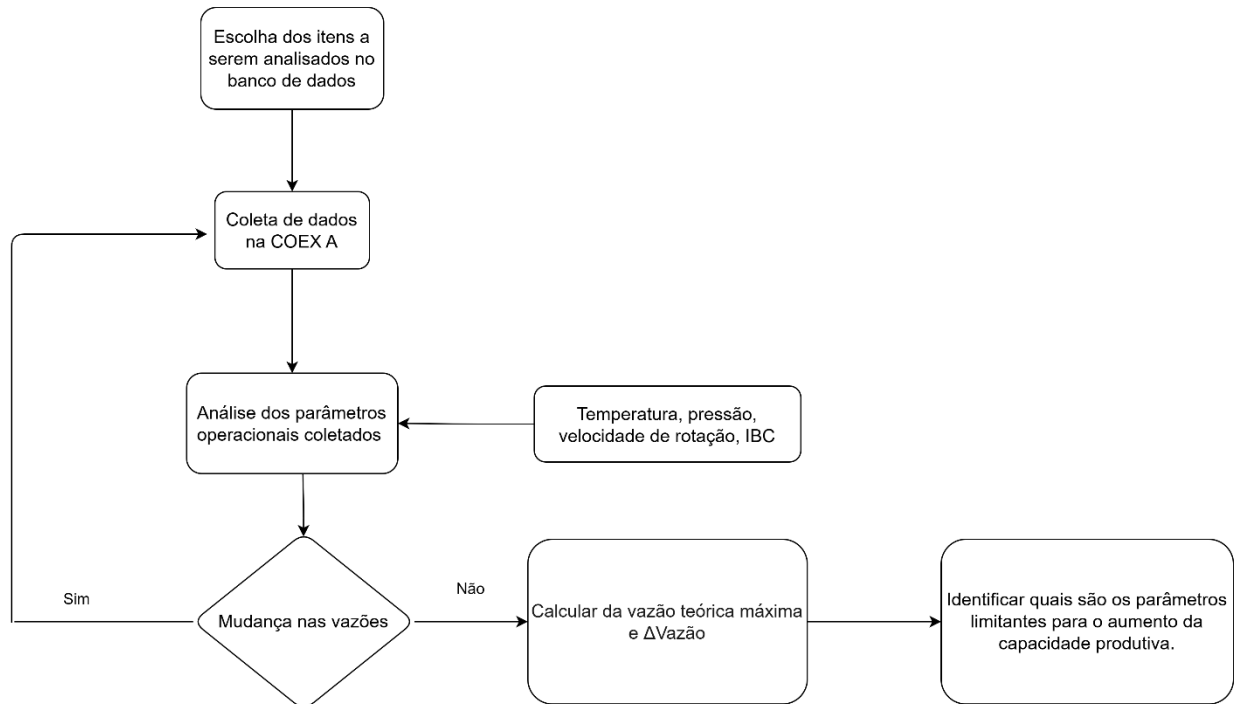
Tabela 1 - Vazões de filmes extrusados que serão analisadas

Filmes	Vazões, kg/h		
P1	550	590	610
P2	480	520	540

Fonte: autora (2024).

A produtividade foi determinada baseada nos resultados das vazões (Tabela 1). Além disso, foram calculados desvios experimentais, entre os valores de vazões ideais e os experimentais. O desvio foi calculado a partir da estimativa da vazão teórica que poderia ser obtida com esses parâmetros operacionais, caso não houvesse fatores limitantes. Por fim, foi feita a identificação de quais parâmetros de processos foram limitantes para o aumento da capacidade produtiva e da estabilidade dimensional do balão e conseqüentemente do processo. As etapas da metodologia estão representadas no fluxograma da Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma do método aplicado para o estudo dos parâmetros de processo da co-extrusão.



Fonte: autora (2024).

Os valores das temperaturas foram obtidos no painel de controle do equipamento, esses valores são obtidos através de sensores elétricos nas roscas que repassam o sinal do valor da temperatura em cada uma das roscas. As roscas A e C possuem 13 zonas de temperaturas, enquanto a rosca B possui somente 9 zonas. Essa diferença se dá pelo tamanho das roscas e posição de cada uma, e a descrição de cada posição das zonas de temperaturas consta no Quadro 1, sendo que as zonas e 1-6 são zonas de alimentação, fusão e transição do material, as demais são zonas que interligam a rosca com a matriz.

A temperatura de fusão mínima fixada no equipamento foi de 180 °C, garantindo que haja realmente a fusão dos componentes da formulação aplicada ao estudo. Essa temperatura deve ser mais alta que a temperatura de fusão do PE, pois além dele também são utilizados aditivos, os quais podem elevar a temperatura de fusão necessária. De acordo com a literatura (Canevarolo, 2006, Cantor, 2006 e Rabello, 2021) a temperatura de fusão do PE varia entre 105 °C e 135 °C.

Quadro 1 - Descrição das zonas de temperaturas, nas roscas A, B e C.

Zonas	Descrição
Z1	Roscas
Z2	
Z3	
Z4	
Z5	
Z6	
Z7	Troca tela
Z8	
Z9	Intermediário
Z10	Cotovelo
Z11	Intermediário
Z12	Cotovelo
Z13	Intermediário

Fonte: autora (2024).

Os valores dos parâmetros operacionais analisados são apresentados nas Tabelas de 2 a 5. Algumas considerações devem ser pontuadas, sendo elas, a temperatura da matriz foi fixada na faixa de 220 – 240 °C e a temperatura do cabeçote na faixa de 16 – 19 °C. Os parâmetros foram analisados para a extrusão dos dois filmes em três vazões diferentes. A extrusora, possui três roscas (A, B, C), logo para cada vazão tem três faixas de temperatura, velocidade de rotação e pressão.

Tabela 2 - Valores das temperaturas nas roscas com as vazões dos filmes extrusados.

Filmes	Vazões, kg/h	Faixas de Temperatura, °C		
P1	550	180-220	190-230	180-220
	590	180-220	190-230	180-220
	610	180-220	190-230	180-220
P2	480	180-220	190-220	180-220
	520	180-220	190-220	180-220
	540	180-220	200-230	180-220
Roscas		A	B	C

Fonte: autora (2024).

Tabela 3 - Valores das velocidades de rotação das roscas com as vazões dos filmes extrusados.

Filmes	Vazões, kg/h	Velocidade das roscas, rpm		
P1	550	781	1906	757
	590	844	2016	832
	610	973	1764	813
P2	480	651	1429	577
	520	703	1632	649
	540	800	1657	688
Roscas		A	B	C

Fonte: autora (2024).

Tabela 4 - Valores de pressões das roscas com as vazões dos filmes extrusados.

Filmes	Vazões, kg/h	Pressão das roscas, bar		
P1	550	497	422	441
	590	503	447	439
	610	501	415	502
P2	480	450	455	414
	520	465	435	431
	540	481	487	418
Roscas		A	B	C

Fonte: autora (2024).

Tabela 5 - Valores de IBC com as vazões dos filmes extrusados.

Filmes	Vazões, kg/h	IBC	
P1	550	700	2322
	590	960	2640
	610	1000	3132
P2	480	1160	3468
	520	1001	2884
	540	1250	3950
		Entrada	Saída

Fonte: autora (2024)

3.3 CÁLCULO PRODUTIVIDADE IDEAL DOS FILMES BASEADA NAS VAZÕES

Depois da coleta de dados do processo de extrusão dos dois filmes, foi realizado o cálculo da porcentagem de efetividade das três roscas estudadas, a fim de saber a relação entre como seria a produtividade se a rosca fosse 100% ideal se comparado com o que foi reportado experimentalmente.

Para isso, os dados das Tabelas 1 e 3 foram compilados de forma separada para a rosca B, que foi usada como base para estimativa de vazão teórica ideal. Considera-se que a velocidade de rotação máxima das roscas é 2100 rpm, com isso foi realizado uma relação entre a velocidade das roscas obtidas, com a velocidade limite da rosca, a fim de saber o percentual de utilização da rosca e como ela se comporta com o aumento da vazão. O cálculo de utilização da rosca foi realizado através da Equação (1), em que relaciona a velocidade da rosca B em uma dada vazão, pela velocidade de rotação máxima.

$$\% \text{ uso da rosca} = \frac{\text{rpm da rosca}}{2100} \cdot 100 \quad \text{eq. (1)}$$

Também foi estimado o percentual de uso da capacidade total do sistema de resfriamento interno (IBC), sabendo que a velocidade do gás refrigerado na entrada e na saída é de 4000 rpm a Equação (2) e (3) mostram essa relação para o IBC de entrada e saída, que estão presentes na Tabela 5.

$$\% \text{ uso IBC entrada} = \frac{\text{Velocidade do gás entrada, rpm}}{4000} \cdot 100 \quad \text{eq. (2)}$$

$$\% \text{ uso IBC saída} = \frac{\text{Velocidade do gás saída, rpm}}{4000} \cdot 100 \quad \text{eq. (3)}$$

Após, foi realizado o cálculo para estimar uma vazão teórica baseada na vazão de filme extrusado coletada, considerando a rosca B como base de cálculo, pois ela é a limitante para o aumento da capacidade produtiva. Essa rosca foi tomada como base, pois as frações de componentes nas roscas foram de 20/60/20, em massa, para roscas A, B e C, respectivamente. Logo a rosca B comporta a maior quantidade de matéria prima, sendo a limitante do processo. Também foi calculada o Δ Vazão, que é a diferença entre a vazão real coletada e a teórica máxima estimada.

Para obter a vazão máxima e teórica de cada filme, foi considerada a relação, vista na Equação (4), a qual relaciona as vazões obtidas na Tabela 1, que é coletada diretamente na máquina, pelas velocidades de rotação (Tabela 2), também coletada no equipamento, multiplicando pela velocidade de rotação máxima do equipamento (2100 rpm). Dessa forma pode-se estimar a velocidade ideal alcançada, com os parâmetros operacionais coletados nas condições de processamento dos filmes.

$$\text{Vazão máxima teórica} = \frac{\text{Vazão real} \cdot 2100}{\text{rpm da rosca B}} \quad \text{eq. (4)}$$

Após os cálculos, foi estudado através desses resultados das coletas, o parâmetro que foi limitante para a capacidade produtiva e quais as suas causas para que eles obtivessem essa influência limitante no processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO AUMENTO DA VAZÃO NOS FILMES E SUA INFLUÊNCIA NA ESTABILIDADE DO BALÃO

O Quadro 2 apresenta os valores resumidos das temperaturas coletadas na co-extrusora, dos processos de extrusão dos filmes P1 e P2, para cada vazão obtida em cada filme. Esses valores foram retirados das Tabelas de 8 a 13, presentes no Apêndice A. Essas temperaturas são apresentadas para as três roscas, sendo que as roscas A e C possuem 13 zonas de temperatura e a rosca B possui 9 zonas de temperatura. Os valores obtidos são divididos em temperaturas de *setup* (SET) e temperaturas do processamento (REAL).

Observou-se que as temperaturas reais ao longo do tempo nas roscas apresentaram variação em relação as temperaturas fixadas na máquina. Com isso, foi considerada como sendo uma faixa ideal a variação de ± 5 °C entre a temperatura de *setup* e a real. Valores fora dessa faixa são considerados como apresentando uma variação considerável, e essa variação foi pré-determinada ao fazer a análise do estudo considerando temperaturas que não degradem o material e levando em consideração o tamanho da rosca.

De acordo com o Quadro 2, as temperaturas de P1 nas vazões analisadas mostram que a rosca B apresentou consideráveis elevações de temperaturas, comparada as roscas A e C. As maiores elevações de variação das temperaturas em relação ao SET encontradas em P1 foram de 55 °C (550 kg/h), 42°C (590 kg/h) e 41 °C (610 kg/h). Interessante pontuar que a faixa de *setup* para essas vazões eram de 190 – 230 °C, indicando que essas temperaturas estão elevadas, e próximas da temperatura de degradação do material (240 °C).

Já as roscas A e C em P1 apresentaram algumas zonas consideráveis de temperaturas abaixo do SET, indicando falhas de aquecimento da rosca. Os pontos com menores variações de temperaturas encontradas foram na rosca C, em 550 kg/h (14 °C) e em 590 kg/h (17 °C). Além disso, a rosca C nas três vazões apresentou pelo menos uma zona com elevada temperatura, e o maior valor foi encontrado na zona 2, a qual é uma zona próxima da alimentação.

Analisando o Quadro 2 para P2, observa-se que a rosca B também possui zonas com temperaturas elevadas, e as variações mais altas encontradas foram de

10 °C (480 kg/h), 20 °C (520 kg/h) e 12 °C (540 kg/h) acima do *setup*. A faixa de *setup* para essas vazões também foram de 190 – 230 °C, no entanto em 520 kg/h encontra-se uma zona (Z8) com 40 °C abaixo do *setup*, indicando uma falha considerável de aquecimento da rosca.

A rosca C, na produção do filme P2, apresentou algumas zonas consideráveis de temperaturas abaixo do SET, indicando falhas de aquecimento da rosca. Os pontos com menores variações temperaturas encontradas foram em 520 kg/h (11 °C). No entanto, em 540 kg/h a rosca C apresentou uma zona (Z2) com elevada variação de temperatura de 18 °C. Já a rosca A em 480 kg/h apresentou duas zonas com altas variações temperaturas de 6 °C em ambas, mas ao aumentar a vazão, essa rosca apresentou zonas com variações de temperaturas abaixo do SET, de 7 °C (520 kg/h) e 13 °C (540 kg/h).

Analisando P1 e P2, nota-se que em ambos os filmes e nas seis vazões analisadas, a rosca B foi a que apresentou a maior quantidade de zonas de temperatura com temperaturas altas consideráveis, sendo que P1 teve menos zonas de altas temperaturas que P2, no entanto com temperaturas mais elevadas, com possibilidade de causar a degradação do material.

Outro ponto é que a rosca A em P1 apresentou predominância para temperaturas mais elevadas, diferentemente de P2, que mostrou similares quantidades de temperaturas mais altas e mais baixas. Já na rosca C, as três vazões do filme P1 apresentaram zonas com elevação e declínio de temperatura, mas P2 só demonstrou esse comportamento em duas vazões (520 e 540 kg/h). Além disso, a rosca C apresentou zonas com temperaturas com valores mais altos que a rosca A nos dois filmes.

O aumento de temperatura que foi observado em P1 e P2, localiza-se nas zonas Z1 a Z6, próximas da alimentação, indicando a ocorrência do refluxo. O fenômeno de refluxo ocorre devido ao desgaste das roscas.

Esse desgaste se dá pela degradação da rosca devido ao tempo de uso, ao calor e ao atrito na rosca. O desgaste gera espaços entre as roscas e o cilindro que recobre a rosca, e o fluido que está sendo arrastado pela rosca tende a voltar por esses espaços livres. Esse movimento ocorre nas zonas em que há a transição do material sólido para a massa fluida fundida, de modo que ocorra o refluxo de material ocasionando um aumento considerável de temperatura.

Quadro 2 - Resultados obtidos da variação das temperaturas nos filmes P1 e P2, nas vazões analisadas.

Filme	Vazão de 550 kg/h			Vazão de 590 kg/h			Vazão de 610 kg/h		
	Rosca A	Rosca B	Rosca C	Rosca A	Rosca B	Rosca C	Rosca A	Rosca B	Rosca C
P1	Z6 (↑ 10 °C)	Z1 (↑ 42 °C) Z2 (↑ 55 °C) Z3 (↑ 45 °C) Z5 (↑ 17 °C) Z6 (↑ 24 °C)	Z2 (↑ 25 °C) Z9 (↑ 8 °C) Z12 (↓ 13 °C) Z13 (↓ 14 °C)	Z6 (↑ 13 °C) Z13 (↓ 15 °C)	Z1 (↑ 33 °C) Z2 (↑ 42 °C) Z3 (↑ 34 °C) Z5 (↑ 17 °C) Z6 (↑ 26 °C)	Z2 (↑ 27 °C) Z12 (↓ 15 °C) Z13 (↓ 17 °C)	Z3 (↑ 10 °C) Z4 (↑ 10 °C) Z5 (↑ 9 °C) Z6 (↑ 19 °C)	Z1 (↑ 27 °C) Z2 (↑ 34 °C) Z3 (↑ 41 °C) Z5 (↑ 15 °C) Z6 (↑ 23 °C)	Z2 (↑ 20 °C) Z11 (↑ 7 °C)
Filme	Vazão de 480 kg/h			Vazão de 520 kg/h			Vazão de 540 kg/h		
	Rosca A	Rosca B	Rosca C	Rosca A	Rosca B	Rosca C	Rosca A	Rosca B	Rosca C
P2	Z9 (↑ 6 °C) Z11 (↑ 6 °C)	Z1 (↑ 10 °C) Z2 (↑ 6 °C) Z5 (↑ 5 °C)	-	Z12 (↓ 7 °C)	Z1 (↑ 20 °C) Z2 (↑ 15 °C) Z3 (↑ 10 °C) Z4 (↑ 9 °C) Z5 (↑ 10 °C) Z6 (↑ 7 °C) Z7 (↑ 7 °C) Z8 (↓ 40 °C)	Z13 (↓ 11 °C)	Z12 (↓ 13 °C)	Z1 (↑ 10 °C) Z2 (↑ 12 °C) Z3 (↑ 11 °C) Z6 (↑ 10 °C)	Z2 (↑ 18 °C)

Legenda:

↑ - Temperaturas elevadas.

↓ - Temperaturas abaixo do SET.

Z – zonas de temperaturas conforme Quadro 1.

A rosca B é a menor rosca dentre as três, devido a sua posição na extrusora, localizada entre as outras duas roscas que possuem um comprimento maior. Além disso, as frações de componentes nas roscas foram 20/60/20 para as roscas A, B e C. Desta forma, a rosca B é a que possui maior fração de material passando nela. Logo, as temperaturas na rosca B tendem a estar mais elevadas do que as do *setup* do equipamento.

No entanto, a possibilidade de desgaste na rosca não é descartada, além disso o tempo de residência do material nela é menor do que em outras roscas também, devido ao menor comprimento. Outro fator que contribui para o desgaste é a velocidade de rotação das roscas, pois ela influencia no aumento do atrito do material na extrusora. Além disso a qualidade do grão e a quantidade de impurezas no meio podem ser fatores influenciadores.

Essas temperaturas altas podem influenciar tanto as propriedades mecânicas e físicas dos materiais, quanto a instabilidade dimensional. A alta temperatura influencia nas propriedades mecânicas e físicas do material, podendo degradá-lo. E a instabilidade dimensional ocorre devido a temperaturas de fusão muito elevadas que podem causar variação de volume de ar dentro do balão, conforme reportado por Cantor (2006), Butler (2000) e Waller (2002). Além disso, Escobar (2019) pontua que as altas temperaturas dificultam o arrefecimento do balão, dificultando o controle da espessura do filme, comprometendo a qualidade do produto.

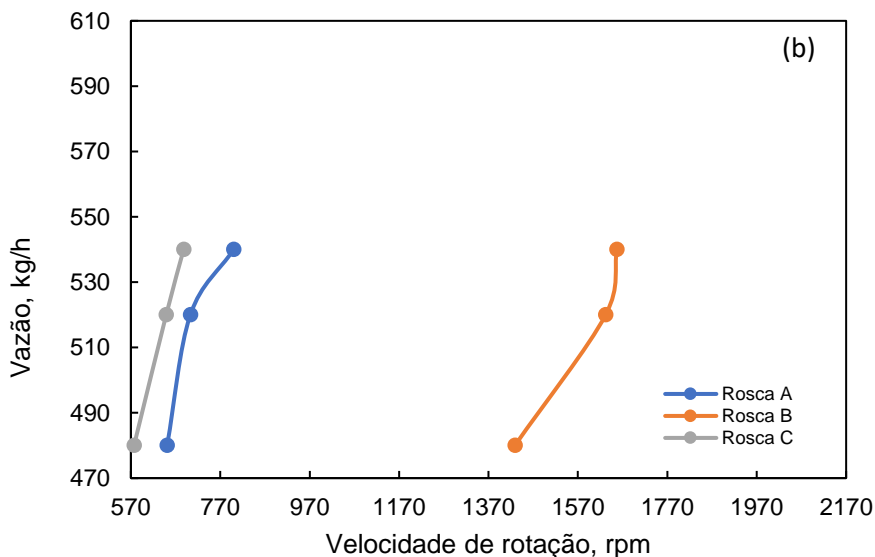
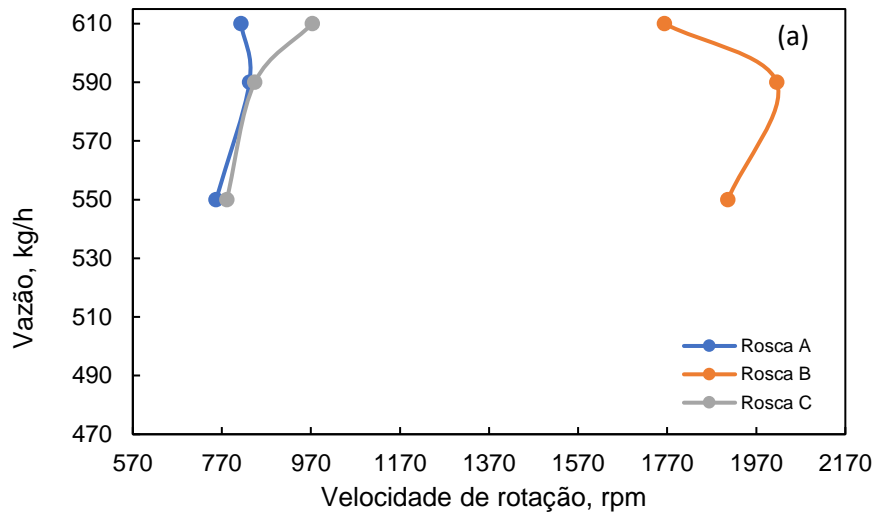
Rauwendaal (2014), observou que há relação entre o comportamento da velocidade de rotação das roscas e a temperatura, sendo que o aumento da velocidade leva a um aumento da temperatura, pois a fluidez do material passa a interferir, limitando a estabilidade térmica. Logo, tem-se um menor tempo de residência da massa fundida na rosca e o volume do polímero diminui com o aumento da velocidade que impacta diretamente na vazão. O estudo foi realizado em uma extrusora de única rosca de alta velocidade, com vazões máximas de 2200 kg/h, velocidades de rotação de 1500 rpm e temperaturas de fusão de 200 a 250 °C.

4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DAS ROSCAS NO AUMENTO DA PRODUTIVIDADE

Os gráficos da Figura 10 apresentam os resultados experimentais para a vazão em função das velocidades de rotação das roscas A, B e C. Neles é possível observar

a relação entre a velocidade de rotação das roscas em função da capacidade produtiva, além de observar quais das roscas é mais influente e limitante no processo.

Figura 10 – Gráfico da vazão em função da velocidade de rotação das roscas A, B e C para os filmes P1 (a) e P2 (b).



Pela Figura 10a foi possível observar que as maiores velocidades foram reportadas para a rosca B. Observando as vazões de 550 kg/h a 590 kg/h, foi possível notar que o aumento da velocidade das roscas está relacionado com o aumento da vazão, nas três roscas. A coleta da vazão de 590 kg/h (P1), demonstrou que a velocidade de rotação da rosca B se encontrava em 2016 rpm, quase no limite máximo

operacional, indicando que esse parâmetro foi o limitante produtivo para o aumento da capacidade produtiva nessa coleta.

Analisando a vazão de 590 e 610 kg/h (P1), nota-se uma redução da velocidade das roscas B e A com o aumento da capacidade produtiva, mas a rosca C continuou com a mesma tendência de aumento de velocidade de rosca. Os fatores que podem contribuir para que houvesse um aumento da capacidade produtiva com a diminuição das velocidades de rosca são a temperatura tanto das roscas como a do sistema de refrigeração e do ambiente, que podem ter influenciado, e a pressão das roscas.

A Figura 10b apresenta a variação da vazão em função da velocidade de rotação para o filme P2. Pode-se observar um aumento de vazão em função do aumento de velocidade de rotação, conforme reportado por Escobar (2019), em seu estudo, com destaque para a rosca C, que apresentou um aumento linear.

Em todos os gráficos obtidos, o comportamento da rosca B foi a que apresentou maiores valores de velocidade de rotação, indicando que é a rosca que possui maior influência no aumento da capacidade produtiva, logo indica ser a limitante. Observa-se que a velocidade das roscas é um parâmetro operacional que impacta diretamente no aumento da capacidade produtiva dos filmes estudados.

O filme P1 alcançou maiores valores de vazão que P2 devido a características físicas dos filmes, como a largura e a espessura, que são maiores em P1. Logo suportando maiores vazões, pois P2 é limitado pela largura do balão e pela sua espessura. Uma espessura menor é mais sensível ao aumento da vazão, e podem alterar a variação de espessura final do produto.

Escobar (2019), mostra que conforme há um aumento da capacidade produtiva (vazão), é necessário que haja uma maior velocidade de rotação, para que seja capaz de comportar o fluxo de saída do filme. Esse fato foi reportado pelo autor nas roscas A e C, e tendem a apresentar maiores valores de velocidade de rotação. Neste estudo, um comportamento semelhante foi reportado para a rosca B.

A partir disso foi realizada a análise do percentual de uso da rosca B, a fim de observar se é possível aumentar a velocidade das roscas para que haja o aumento da vazão. Foi considerando uma margem de 95% de uso máximo, pois a velocidade excessiva pode aumentar o desgaste da rosca e a temperatura por atrito e comprometer o processo e a qualidade do produto.

A Tabela 6 apresenta os percentuais de uso das roscas, e foram calculadas com base na Eq. (1). Os percentuais são obtidos a partir de valores das vazões

coletadas na máquina, e dos valores de vazões máximas que a rosca poderia alcançar se o processo acontecesse de maneira ideal, utilizando a rosca na velocidade máxima de 2100 rpm.

Através desses resultados, observa-se que a rosca B foi a limitante nos filmes analisados, e as demais roscas (A e C) não chegaram a 50% de uso. Para a vazão de 590 kg/h (P1), o percentual de uso da rosca B foi 96%, limitando o processo. Nas demais vazões, tanto para P1 quanto para P2, os valores reportados foram inferiores ao limite máximo de 95%.

Tabela 6 - Valores de porcentagem de uso das roscas A, B e C para P1 e P2.

Filme	Vazão da co-extrusora, kg/h	% Uso Rosca A	% Uso Rosca B	% Uso Rosca C
P1	550	37,2	90,8	36,0
	590	40,2	96,0	39,6
	610	46,3	84,0	38,7
P2	480	31,0	68,0	27,5
	520	33,5	77,7	30,9
	540	38,1	78,9	32,8

Após o cálculo do percentual de uso, se concluiu que a rosca B é a limitante. Desta forma, foi estimada a vazão máxima teórica (Tabela 7) baseada na vazão obtida no equipamento e na velocidade de rotação da rosca B, calculada pela Eq. (4). Esse cálculo é uma estimativa da vazão que poderia ser alcançada com esses parâmetros operacionais nas condições ideais, caso não houvesse nenhuma condição limitante. Também foi estimado a variação entre as vazões teóricas e reais (Δ Vazão) em percentuais, para observar a perda de vazão.

Tabela 7 - Valores para a vazão teórica para os filmes P1 e P2 e o delta entre as vazões.

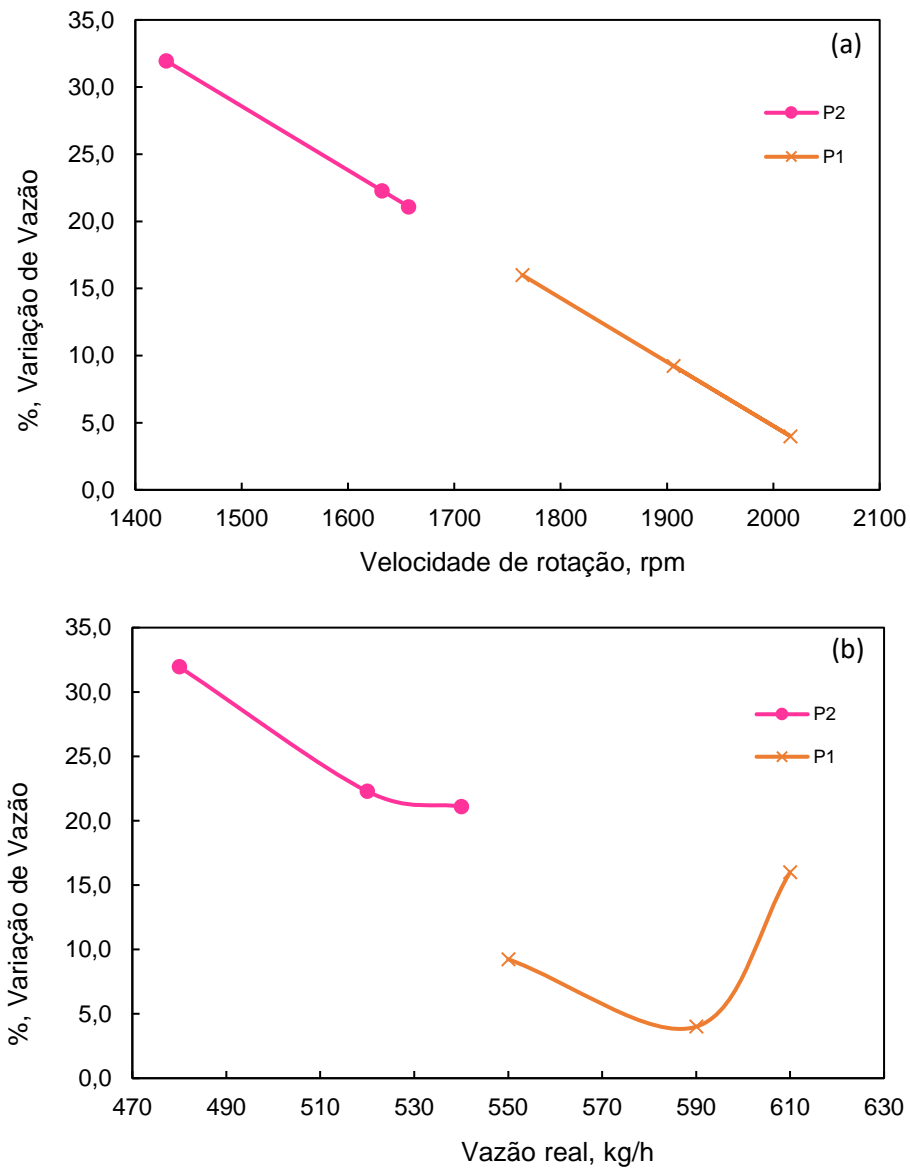
Filme	Vazão da co-extrusora, kg/h	Vazão teórica, kg/h	ΔVazão, %
P1	550	606	9,2
	590	615	4,0
	610	726	16,0
P2	480	705	32,0
	520	669	22,3
	540	684	21,1

Pode-se observar que o filme P1 apresentou a maior vazão teórica calculada, de 726 kg/h para uma vazão real de 610 kg/h. Analisando a Tabela 6, a rosca B, nestas condições, está sendo usada em um percentual de 84% (abaixo de 95%), logo não é limitante como a vazão de 590 kg/h em que o percentual de uso estava acima do recomendado.

Para o filme P2, a maior vazão teórica obtida foi de 705 kg/h, para a vazão real de 480 kg/h. Neste caso, o porcentual de uso foi de 68%, podendo-se observar que conforme aumentou a vazão coletada na co-extrusora, houve o aumento do percentual de uso da rosca B, logo a vazão teórica foi baixando, pois o desvio experimental tende a ser menor.

Os valores do Δ Vazão são apresentados na Tabela 7 e o seu comportamento gráfico é visto na Figura 11a, e indicam a diferença entre a capacidade produtiva teórica e a real alcançada nas condições operacionais do processo, para a velocidade da rosca B. Para esta análise, será considerado um desvio entre experimental e teóricos acima de 5%, pois indicam uma redução na capacidade produtiva real alcançada.

Figura 11 - Gráfico dos desvios das vazões experimentais obtidas pela (a) velocidade de rotação (b) vazão real.



O filme P1, na vazão de 590 kg/h, apresentou uma variação de 4,0%, sendo o menor alcançado nas vazões e nos dois filmes analisados, mostrando que não há diferença considerável entre as capacidades obtidas e estimadas. Já as outras duas vazões (550 kg/h e 610 kg/h), apresentaram variações de 9,2% e 16,0%, logo mostrando uma considerável perda produtiva.

Já o filme P2 (480 kg/h) apresentou maior Δ Vazão com um percentual de 32,0% entre as vazões teóricas e reais. Já nas outras vazões as variações obtidos foram de 22,3 % (520 kg/h) e 21,1% (540 kg/h), sendo desvios consideráveis, mostrando que a velocidade da rosca foi limitante. Para ambos os filmes se observa que o aumento da

velocidade das roscas impacta diretamente na diminuição do desvio experimental (Figura 11a).

Analisando o comportamento do gráfico 11b, observa-se que, em P2 conforme há o aumento da vazão, há uma redução no desvio experimental, da mesma forma vista na Figura 11 (a). No entanto, ainda há uma perda considerável na produtividade baseada na vazão, já que a velocidade das roscas não foi limitante. Entretanto, em P1 esse comportamento é mais oscilatório, pois a menor variação (4,0%) é na vazão de 590 kg/h e não na maior vazão coletada e a velocidade de rotação se demonstrou ser mais limitante.

Esse comportamento oscilatório ocorreu porque, na vazão de 610 kg/h (que apresentou uma variação de 16%), não tinha sinais de desgastes da rosca como vistos nas vazões de 550 kg/h e 590 kg/h. Essas duas coletas foram realizadas posteriormente a coleta de 610 kg/h, e apresentaram sinais de desgastes na rosca. Logo, limitando a sua capacidade de aumentar a vazão, por isso, o filme P1 apresentou comportamento oposto ao filme P2, em que o aumento da vazão diminuiu o desvio experimental.

Os dados da Tabela 7 e dos gráficos presentes na Figura 12 nos mostram que a velocidade das roscas foi mais limitante em P1 do que em P2, e mais precisamente na coleta de 590 kg/h (P1). Apesar de apresentar o menor desvio experimental, encontrou-se superior ao limite de uso máximo, além de apresentar altas temperaturas observadas no Quadro 2. Essas duas variáveis, juntamente com a pressão foram limitantes para o aumento da vazão. Esse aumento só ocorreu quando a velocidade de rotação diminuiu. Um fato interessante de analisar é que o IBC também foi um fator que influenciou no aumento da vazão.

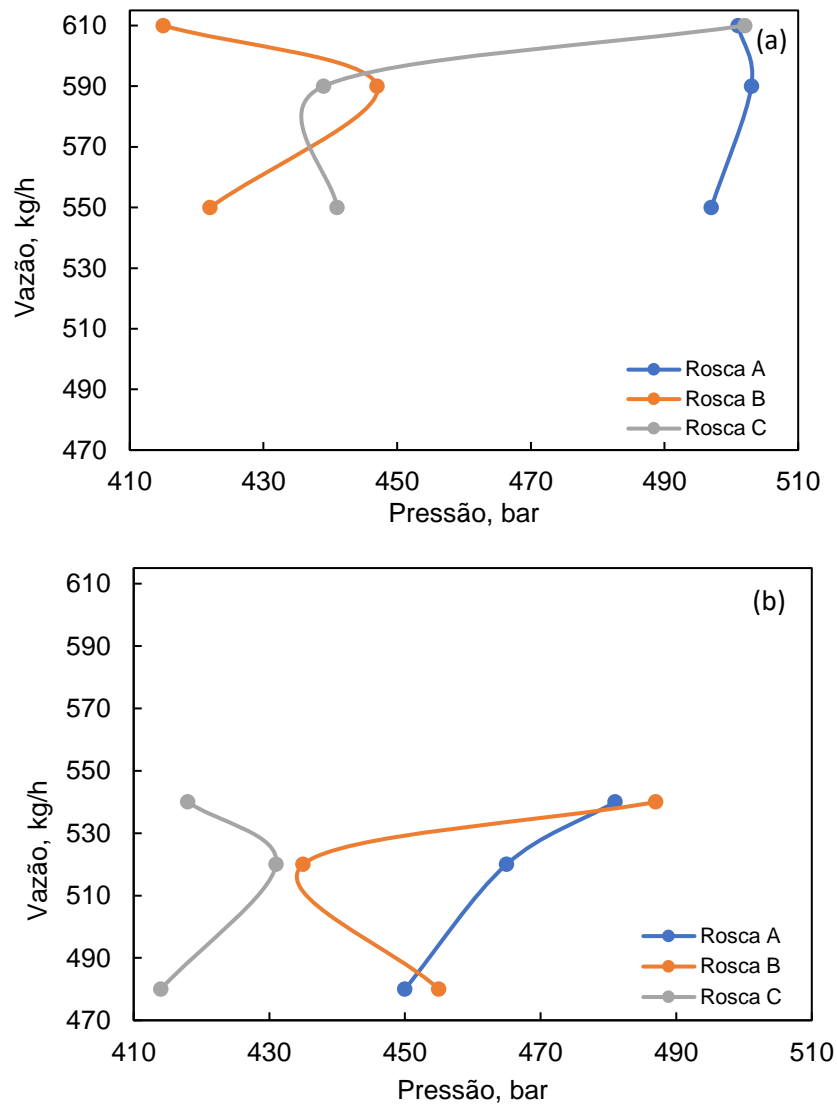
4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DAS ROSCAS NO AUMENTO DA CAPACIDADE PRODUTIVA

A Figura 12 apresenta os resultados para a variação da vazão em função da pressão das roscas, para os filmes P1 e P2. A pressão das roscas é um parâmetro que possui influência direta no aumento da produtividade, sendo o seu comportamento muito importante, pois pode se tornar um fator limitante de processo.

O comportamento ideal esperado é que ocorra um aumento da vazão, com aumento da pressão das roscas, pois o aumento da pressão resulta em um aumento

na quantidade de material sendo processado, aumentando conseqüentemente a capacidade produtiva expressa pela vazão. Como visto nos outros dois parâmetros anteriores, a rosca B é a que possui maior influência limitante para o processo.

Figura 12 – Variação da vazão em função da pressão para o filme P1 (a) e P2 (b).



Na Figura 12a, analisando as três roscas, percebeu-se que as pressões apresentaram um comportamento bem oscilatório, causado provavelmente pelas trocas de telas que ocorre quando a pressão está próxima ao programado para desarme do equipamento (550 bar). A pressão tende a aumentar conforme aumenta a vazão de filme, pois o fluxo de material é maior, no entanto esses desvios podem ser causados por causa da alta obstrução do filtro que é causado geralmente por impurezas que estão no grão e detritos oriundos do atrito do material e das roscas.

Observa-se que dentre as três roscas analisadas, nas três vazões, a rosca A foi a que apresentou maiores pressões, sendo a maior encontrada em 590 kg/h com 503 bar.

A Figura 12b mostra o mesmo comportamento oscilatório para o filme P2, as pressões da rosca B e C foram mais oscilatórias do que a rosca A, a qual obteve um comportamento mais próximo do esperado, que é o aumento dos valores da pressão com o aumento da vazão. Os pontos de oscilação observados são encontrados na vazão de 520 kg/h, tanto para a rosca B quanto a rosca C. Nelas a rosca B possui um decréscimo da pressão, enquanto a C possui um pico de pressão, comparado as outras duas vazões.

Alguns fatores responsáveis por esse comportamento são: uma menor pressão pode ocorrer devido ao filtro estar desobstruído, ou seja, a tela que está conectada entre a saída da rosca para a entrada da matriz está mais desimpedida. Desta forma, mesmo com uma produtividade alta a sua pressão não aumenta proporcionalmente, pois ela suporta mais material. Isso é um indicativo de que houve a troca de tela neste processamento.

A obstrução da tela ocorreu devido a massa acumulada com o tempo e as impurezas presentes. Ela se manifesta quando a pressão está entre 510 e 520 bar, valores que indicam atenção, pois a pressão de desarme do equipamento é de 550 bar. Desta forma, com uma pressão elevada não é possível aumentar a capacidade produtiva nessas condições, sendo necessária a parada do processo e a troca de tela. Geralmente com um aumento da pressão para 520 – 530 bar, há uma redução de vazão de 30 a 60 kg/h ou mais em alguns casos, pois quanto mais aumenta a pressão, maior será a redução da vazão.

A partir dos dados, observou-se que a pressão é um parâmetro pouco limitante, na verdade se torna um fator limitante decorrente de outros fatores, como desgaste, formulação, filmes que antecessores e que causaram uma desobstrução no filme maior que o próprio filme, tempo de residência e a pureza do material utilizado, além disso, é um fator limitante temporário. Esses fatores levam ao aumento de pressão que por conseguinte possam limitar a produtividade, nesses casos é necessário que haja a limpeza e troca das telas, processo que não ocorre diariamente.

4.4 INFLUÊNCIA DO RESFRIAMENTO INTERNO DO BALÃO (IBC) NO AUMENTO DA VAZÃO DE FILME EXTRUSADO

A Figura 13 apresenta os gráficos da influência de três diferentes valores de vazão no resfriamento interno do balão (IBC), para os dois filmes estudados. Esse parâmetro de resfriamento ocorre através de um gás, no caso o ar, que foi resfriado e inserido na matriz para que ocorresse o resfriamento da parte interna do balão.

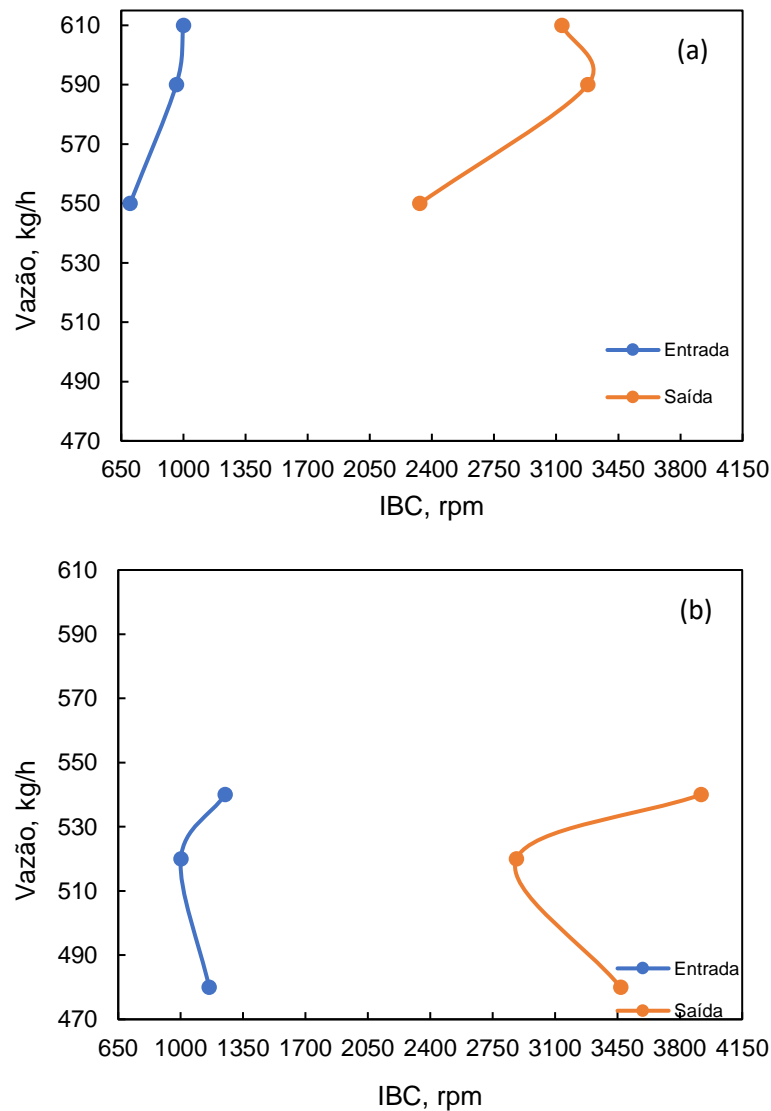
A velocidade do ar de refrigeração que é inserido na matriz é responsável por inflar e resfriar internamente o balão, com isso pode se tornar um fator operacional limitante para o aumento da capacidade produtiva, pois esse refrigeração aumenta a taxa de cristalização e troca térmica do material que está saindo pela matriz.

O comportamento do IBC presente na Figura 13 apresenta oscilações em função do aumento da capacidade produtiva, tanto para P1 (Figura 13a) quanto para P2 (Figura 13b). Para P2 essa oscilação é vista no IBC de entrada e saída, já para P1 somente na saída. Esperava-se um comportamento proporcional, em que o aumento da vazão exigiria um aumento do IBC tanto na entrada como na saída, no entanto essa proporcionalidade só é vista em P1 para o IBC de entrada.

Observando o percentual de uso da capacidade máxima do resfriamento do equipamento, da mesma forma que foi calculado pelas Eq. (2) e (3), de forma semelhante a velocidade de rotação das roscas, só que agora considerando uma capacidade máxima de 4000 rpm, para a velocidade do gás. O IBC de entrada não se mostrou ser um fator limitante, pois a maior velocidade de gás alcançada foi utilizando 31% (P2) do total disponível do equipamento. Mas diferentemente da entrada o IBC de saída se mostrou mais limitante tendo um ponto em P1 de 82% de uso e em P2 98%, mas interessante analisar que esse valor foi alcançado na sua capacidade máxima obtida, já em P1 foi na vazão de 590 kg/h.

O ideal para os valores de IBC para os filmes é estarem no máximo de potência na entrada e na saída, esse valor máximo é de 4000 rpm. No entanto, devido às limitações do equipamento esses valores não foram alcançados, pois qualquer problema na refrigeração influencia na velocidade do gás de refrigeração. A diferença observada entre o IBC de entrada e saída reais e a máxima ocorre devido a possíveis detritos e impurezas que se localizam entre o filtro, ou algum problema mecânico na tubulação que o ar passa.

Figura 13 – Variação da vazão em função do sistema de resfriamento interno para o filme P1 (a) e P2 (b)



De uma maneira geral, o aumento da vazão requer um aumento da taxa de resfriamento interno do balão, logo o IBC tem esse intuito de auxiliar na velocidade de resfriamento e solidificação do filme. O parâmetro de identificação da relação entre a vazão e a solidificação, é a linha de névoa do balão, pois é a altura da linha de congelamento, ou seja, o ponto em que o material fundido começa a solidificar. Como é sensível a qualquer alteração no processo, é considerado um parâmetro de estabilidade durante o processo. A linha de névoa também é sensível a velocidade de rotação das roscas, a qual influencia diretamente na vazão de filme extrusado.

As linhas de névoas muito altas podem gerar filmes manchados ou marcados, então uma das soluções é aumentar a taxa de resfriamento interno, aumentando a

velocidade do ar resfriado, inflar mais o balão, diminuir a temperatura do processo e do ambiente (Cantor, 2006). Essa linha de nevoa varia dependendo do tipo de PE utilizado na formulação, mas geralmente é indicado que ela esteja o mais baixo possível e próximo da saída da matriz, pois garante mais estabilidade do balão.

Também existem outras condições operacionais que afetam a estabilidade do balão, e influenciam esses valores de IBC. Essas condições principais são a temperatura, e a má homogeneização, que torna a linha mais escura. Sendo assim, aumentando a vazão do filme, há um aumento nessa linha de névoa, causando manchas no filme. Como consequência, é necessário diminuir a capacidade produtiva do processo e ajustar as temperaturas das roscas. Além disso, a qualidade dos grãos de PE utilizados no processo também influenciam muito.

A temperatura se mostrou um parâmetro influente na troca térmica interna do balão, sendo as temperaturas do anel e a externa as mais interferentes. A temperatura do anel pode ser um indicativo de como está a temperatura do ar de refrigeração, pois ambos possuem o mesmo sistema de refrigeração. Se essa temperatura estiver alta, o sistema de refrigeração pode não estar sendo adequado, logo a troca térmica não será tão eficiente.

Não foi possível medir diretamente a temperatura do gás de refrigeração, mas com base na faixa de temperatura do anel encontrada entre 16 °C a 19 °C, pode-se inferir que o sistema de refrigeração estava funcionando adequadamente. No entanto, a temperatura externa pode ter influenciado para que os valores máximos não fossem alcançados.

Observou-se que condições externas, como temperatura do ambiente, influenciam a estabilidade do balão e a troca térmica, pois altas temperaturas externas podem diminuir a capacidade de refrigeração, caso o refrigerador apresente problemas ou limitações. Dentre os valores de IBC, o mais limitante observado nos dois filmes é o de saída comparado ao de entrada.

CONCLUSÃO

Com esse estudo foi possível concluir que os parâmetros operacionais possuem influência direta na vazão de uma co-extrusão de filmes de polietileno. A modificação dos parâmetros operacionais pode aumentar a capacidade produtiva ou limitá-las. As conclusões dos parâmetros estudados foram.

A temperatura de fusão nas roscas mostrou-se o parâmetro mais influente no aumento da vazão. Constatou-se a presença do fenômeno de refluxo, como causa limitante do aumento da vazão, devido a temperaturas extremamente elevadas, principalmente na rosca B, a qual se mostrou a limitante e com mais zonas de temperaturas altas, sendo as maiores nas zonas 2 e 3 com variações de 42 °C (P1 em 590 kg/h), 55 °C (P1 550 kg/h) e 41 °C (P1 610 kg/h) acima do *setup*.

O IBC também se mostrou um parâmetro limitante secundário, nota-se que as variações de comportamento observadas ocorreram devido a limitações mecânicas do equipamento. Sendo que o IBC de saída foi o limitante desse parâmetro, pois seu valor máximo é praticamente atingindo, tanto em P1 quanto em P2 limitando a velocidade de gás máxima na entrada.

A velocidade de rotação está diretamente relacionada com o aumento da vazão dos filmes, sendo que uma maior velocidade de rotação garante uma maior quantidade de filme extrusado. Constatou-se que a velocidade da rosca B é a limitante em todos os processos de extrusão. Uma maior a velocidade da rosca gera uma menor variação entre as vazões reais e teóricas, como por exemplo o ponto em P1 com Δ Vazão de 4,0% (590 kg/h). No entanto, para as outras cinco vazões a variação foram consideráveis.

Pressão da massa fundida nas roscas é o único parâmetro que possui limitação temporária no processo. Essa limitação é decorrente de vários fatores, qualidade do grão e impurezas do processo. Os pontos de desvios observados ocorreram devido a estes fatores citados anteriormente e podem ser facilmente solucionados trocando as telas.

Portanto, conclui-se que os parâmetros operacionais analisados são influentes na vazão e estabilidade do processo. O estudo desses parâmetros possibilita conhecer o comportamento do processo nas condições operacionais reais. Os parâmetros que mais limitaram a produtividade foram a temperatura, IBC e a velocidade das roscas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados do comportamento dos parâmetros operacionais obtidos do processo de co-extrusão em filmes de polietileno, algumas sugestões de trabalhos futuros são propostas:

- Avaliar diferentes frações de formulação nas roscas no aumento de produtividade do processo.
- Avaliar o índice de fluidez durante o processo de co-extrusão, e a sua influência na estabilidade do balão.
- Avaliar o consumo energético com o aumento da produtividade e a relação custo-benefício.
- Estudar a influência do sistema gravimétrico do equipamento no aumento da produtividade.
- Analisar a influência da temperatura externa no aumento da capacidade produtiva e no sistema de refrigeração do cabeçote.
- Avaliar a influência do sistema de ventilação na produtividade de filme extrusado.
- Estudar a influência da pressão do cabeçote como limitante do aumento da vazão.
- Avaliar a variação da altura do anel em função do aumento da produtividade.

REFERÊNCIAS

ABEYKOON, C. ADRIAN, L. *et. al.* **Process efficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy demand and melt thermal stability.** Applied Energy. v.135. p. 560-571. Dez. 2014. ISSN 0306-2619

ABIPLAST - Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Brasil). **Perfil 2022: ABIPLAST apresenta dados atualizados sobre a indústria do plástico no Brasil.** São Paulo: Abiplast, 2023. p22. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2022/10/Perfil-2021-PT-vs2.pdf>>. Acesso em: 13 mar. 2024.

AGASSANT, F.J. AVENAS, P. *et. al.* **Polymer processing: Principles and modeling.** Editora. Hanser. ed.2. Munique, 2017. ISN 9781569906057.

ALMEIDA, O.S.M. **Estudo comparativo do efeito dos auxiliares de processamento em extrusão de filmes de poliolefinas.** Dissertação. Universidade de Lisboa. Portugal, Junho, 2016.

BELLE, V. DEMETS, R. *et. al.* **Microstructural contributions of different polyolefins to the deformation mechanisms of their binary blends.** no. 5. 1171. Polymer. Bélgica, 2020.

BUTLER, T.I. **Blown Film Bubble Instability Induced by Fabrication Conditions.** Technical papers of the annual technical conference-society of plastics engineers incorporated. p. 156-164. 2000.

CANEVAROLO, J, V, S. **Ciência dos polimeros: texto básico para tecnólogos e engenheiros.** Editora Artliber. ed . 2. São Paulo, 2006.

CANTOR, K. **Blown film extrusion an introduction.** Editora Hanser. ed. 1. Munique, 2006. ISBN 103446227515.

CHUNG, I. C. **Extrusion of polymers: theory and practice.** Editora Hanser. ed.3. Munique, 2019. ISBN 9781569907382.

DYADICHEV, V.V. KOLESNIKOV, V.A. *et.al.* **Improvement of extrusion equipment and technologies for processing secondary combined polymer materials and mixtures.** Journal of Physics. Russia, 2019.

DYADICHEV, V.V. KOLESNIKOV, V.A. *et.al.* **Analysis of the properties of the mixture's componenets on the basis of construction and polymeric materials waste.** Journal of Physics. Russia, 2021.

DZIADOWIEC, D. MATYKIEWICZ, D. *et. al.* **Overview of the Cast Polyolefin Film Extrusion Technology for Multi-Layer Packaging Applications.** v. 16. No. 3. Materials. Polônia, 2023.

ESCOBAR, N.P.M. RAUWENDAAL, C. **Troubleshooting the extrusion process: a systematic approach to solving plastic extrusion problems.** Editora. Hanser. ed. 3. Alemanha. 2019. ISBN 9781569907757.

FERREIRA, R.L.R, SANTANA, R.M.C. **Comparative study of the influence of blow-up ratio in the properties of HPE and LDPE extruded blow films.** Polímeros, Ciência e tecnologia. Brasil, 2015.

FRANCIS, L.F. STADLER, J.H.B. ROBERTS, C.C. **Materials processing: a unified approach of metals, ceramics and polymers.** Editora: Elsevier. ed.1. Londres, 2016. ISBN 9780123851321.

GEORGANTOPOULOS, K. C. ESFAHANI, K.M. *et.al.* **Role of molecular architecture and temperature on extrusion melt flow instabilities of two industrial LLDPE and LDPE polyethylenes investigated by capillary rheology, high-pressure sensitivity slit die and optical analysis..** v.140. Journal of Applied Polymer Science. Alemanha, 2022.

HOPMANN, C. MICHAELI, W. **Extrusion Dies for plastics and rubber design and engineering computations.** Editora Hanser. ed. 4. Munique, 2016. ISBN 9781569906231.

HORODYTSKA, O. VALDÉS, F.J. FULLANA, A. **Plastic flexible films waste management – A state of art review.** Waste Management. v. 77. p. 413-425. Espanha, 2018. ISSN 0956-053X.

KOLARIK, R. ZATLOUKAL, M. TZOGANAKIS, C. **Stability analysis of non-isothermal film blowing process for non-Newtonian fluids using variational principles.** Chemical Engineering Science. v. 73. República Tcheca, 2012. p. 439-453. ISSN 0009-2509.

KUTZ, M. **Applied plastics engineering handbook.** Elsevier. ed. 1. Estados Unidos, 2011. ISBN 9781437735147.

LEE, F.C. SUE, J.H. **Effect of processing parameters on essential work of fracture toughness of LLDPE blown films.** Polymer Engineering & Science. v.55. p.2403-2413. Jun. 2015.

LIRA, V.M. **Princípios dos processos de fabricação utilizando metais e polímeros.** 1. ed. São Paulo: Blücher, 2017. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>. Acesso 13 mar. 2024.

LUO, Y. CHANG, D.X. QU, J.P. **Improved heat shrinkage and mechanical performances of polyethylene trilayer blown film prepared via novel multilayer coextrusion method.** Packaging Technology and Science. v. 32. Issue.6. Abr. 2019.

MARTÍN, M.A. MORENO, J.A. *et.al.* **Life cycle assessment of mechanical recycling of post-consumer polyethylene flexible films based on a real case in Spain.** Journal of cleaner production. v.365. Espanha, 2022.

MING, L. WENBIN, Z. XIUQING, M. **Interface analysis of three-layer co-extrusion blown film.** AIP conference proceedings. China, 2019.

PIRKLE, J.C. BRAATZ, D.R. **Dynamic modeling of blown fil extrusion.** Polymer Engineering and Science. v. 42. no.2. Universidade de Illinois. Estados Unidos, fev. 2003.

OSAKADA, K. **Organometallic reactions and polymerization.** v. 85. Springer. Berlim, 2014. ISSN 21926603.

QU, P.J. LUO, Y. **A novel method for industrial manufacturing of thermoplastic multilayer films: processing, microstructure and properties.** Polymer Engineering and science. v. 59. p. E339 – E349. Ago. 2018.

RABELLO, S. M. **Estrutura e propriedades de polímeros.** *e-guide.* Campina Grande. 2021. ISBN 9786500193541

RAGAERT, K. DELVA, L. *et.al.* **Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste.** Waste management. v.69. p.24-58. Bélgica, 2017. DOI: [https://doi-org.ez348.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.wasman.2017.07.044](https://doi.org.ez348.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.wasman.2017.07.044).

RAUWENDAAL, C. **Polymer Extrusion.** Editora Hanser. ed. 5. Munique. 2014. ISBN 9781569905166.

SALEM, M.S. LETTIERI, P. BAEYENS, J. **Recycling and recovery routes of plastics solid waste (PSW): a review.** Waste management. v.29. issue 10. p.2625-2643. Londres, 2009.

SIKORA, A. JANUSZ, W. **Experimental research on the blown film extrusion process of polyethylene.** v.17. p.307-319. Journal of Plastic film e sheeting. Polônia, 2001. ISSN 87560879.

SORROCHE, V. J. KELLY, A. *et.al.* **Thermal optimization of polymer extrusion using in-process monitoring techniques.** v.53. p. 405-413. Applied Thermal Engineering. Inglaterra, 2013. ISSN 1359-4311.

TANAKA, R. ADEREMI, O. *et.al.* **Control of coordination polymerization behavior by counter – anionic effects.** v.142. Progress in Polymer science. Japão, 2023. ISSN 101690.

THYASHAN, N. PERERA, Y.S. *et.al.* **Investigation of the effect of materials and processing conditions in twin-screw extrusion.** v.7. p. 353-361. International Journal in Lightweight materials and manufacture. Inglaterra, 2023.

VLACHOPOULOS, J. STRUTT, D. **Polymer processing.** Materials Science and Technology. v.19. Set. 2003.

WALLER, P. **What to do when the bubble won't behave.** Plastic Technol. p. 36-37, 2002.

WHITE, L.J. POTENTE.H. Screw extrusion: science and technology. Editora:
Hanser. ed. 1. Munique, 2003. ISBN 3446196242

APÊNDICE A

Aqui estão presentes os valores de todas as faixas por zonas das temperaturas, para os filmes P1 e P2. Indicados por roscas A, B e C, esses valores são utilizados para a discussão de resultados na sessão 4.1.

Tabela 8 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 550 kg/h.

P1								
Vazão 550 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	183	1	190	232	1	180	184	1
185	188	2	200	255	2	180	205	2
190	193	3	200	245	3	200	203	3
190	194	4	210	210	4	200	202	4
190	193	5	210	227	5	210	213	5
200	210	6	210	234	6	210	213	6
200	200	7	220	221	7	215	214	7
200	200	8	230	232	8	215	215	8
210	209	9	230	230	9	215	223	9
220	219	10				215	220	10
220	222	11				220	217	11
220	218	12				220	207	12
220	220	13				220	206	13

Tabela 9 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 590 kg/h.

P1								
Vazão 590 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	183	1	190	223	1	180	183	1
185	188	2	200	242	2	180	207	2
190	193	3	200	234	3	200	202	3
190	193	4	210	214	4	200	203	4
190	195	5	210	227	5	210	212	5
200	213	6	210	236	6	210	213	6
200	200	7	220	219	7	215	215	7
200	200	8	230	230	8	215	215	8
210	209	9	230	230	9	215	214	9
220	218	10				215	213	10
220	223	11				220	225	11
220	204	12				220	205	12
220	205	13				220	203	13

Tabela 10 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P1, para vazão de 610 kg/h.

P1								
Vazão 610 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	183	1	190	217	1	180	183	1
185	187	2	200	234	2	180	200	2
190	200	3	200	241	3	200	201	3
190	200	4	210	212	4	200	203	4
190	199	5	210	225	5	210	213	5
200	219	6	210	233	6	210	213	6
200	200	7	220	219	7	215	216	7
200	200	8	230	230	8	215	215	8
210	211	9	230	235	9	215	215	9
220	220	10				215	213	10
220	220	11				220	227	11
220	220	12				220	221	12
220	221	13				220	221	13

Tabela 11 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 480 kg/h.

P2								
Vazão 480 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	183	1	190	200	1	180	179	1
190	190	2	205	211	2	190	190	2
200	202	3	215	219	3	200	201	3
205	207	4	220	224	4	205	207	4
215	215	5	220	225	5	215	214	5
220	222	6	220	223	6	220	222	6
220	218	7	220	221	7	220	218	7
220	222	8	220	219	8	220	222	8
220	226	9	220	221	9	220	223	9
220	219	10				220	224	10
220	226	11				220	221	11
220	216	12				220	220	12
220	217	13				220	220	13

Tabela 12 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 520 kg/h.

P2								
Vazão 520 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	182	1	190	210	1	180	182	1
190	190	2	205	220	2	190	193	2
200	202	3	215	225	3	200	201	3
205	207	4	220	229	4	205	206	4
215	217	5	220	230	5	215	215	5
220	223	6	220	227	6	220	222	6
220	220	7	220	227	7	220	224	7
220	220	8	220	180	8	220	220	8
220	220	9	220	219	9	220	220	9
220	219	10				220	224	10
220	220	11				220	218	11
220	213	12				220	212	12
220	216	13				220	209	13

Tabela 13 - Temperaturas de *setup* e reais obtidas no processo de co-extrusão para P2, para vazão de 540 kg/h.

P2								
Vazão 540 kg/h								
Rosca A			Rosca B			Rosca C		
SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS	SET	REAL	ZONAS
180	183	1	200	210	1	180	182	1
180	181	2	210	222	2	180	198	2
190	193	3	215	226	3	190	192	3
200	203	4	220	224	4	200	203	4
210	213	5	230	233	5	210	213	5
220	223	6	230	240	6	220	222	6
220	219	7	230	231	7	220	224	7
220	220	8	230	231	8	220	220	8
220	224	9	230	234	9	220	223	9
220	220	10				220	223	10
220	216	11				220	217	11
220	207	12				220	219	12
220	217	13				220	220	13