



**UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE ALAGOAS**

**INSTITUTO DE QUÍMICA E BIOTECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM QUÍMICA BACHARELADO**

MARCELA RAYANE CORDEIRO

**O CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO COMO FERRAMENTA PARA  
VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESINA PET RECICLADA NA  
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

MACEIÓ - ALAGOAS

2024

**MARCELA RAYANE CORDEIRO**

**O CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO COMO FERRAMENTA PARA  
VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESINA PET RECICLADA NA  
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Instituto de Química e Biotecnologia da  
Universidade Federal de Alagoas-UFAL como  
requisito parcial para obtenção do grau de  
bacharel em Química.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana Ribeiro

Coorientador: Prof. Dr. Fred Nogueira

**MACEIÓ – ALAGOAS**

**2024**

**Catalogação na fonte  
Universidade Federal de Alagoas  
Biblioteca Central  
Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Helena Cristina Pimentel do Vale – CRB4/661

C974c	<p>Cordeiro, Marcela Rayane. O controle estatístico do processo como ferramenta para verificação do comportamento da resina PET reciclada na indústria alimentícia : uma revisão bibliográfica / Marcela Rayane Cordeiro. – 2025. 63 f : il.</p> <p>Orientadora: Adriana Ribeiro. Coorientador: Fred Nogueira. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Química : Licenciatura) – Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Química e Biotecnologia. Maceió, 2024.</p> <p>Bibliografia: f. 58-63.</p> <p>1. Poli tereftalato de etileno. 2. Resina PET. 3. Embalagens alimentícias. 4. Reciclagem – Controle estatístico do processo. I. Título.</p>
-------	---

CDU: 547.914-037.477

MARCELA RAYANE CORDEIRO

**O CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO COMO FERRAMENTA PARA  
VERIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA RESINA PET RECICLADA NA  
INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Professora Dra. Adriana Santos Ribeiro**

**Professora Dra. Jadriane de A. Xavier**

**Professora Dra. Rosanny Christinny da Silva**

**Defesa: 05 / 04 / 2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar ao meu lado e me dar forças para continuar acreditando nos meus sonhos e nunca me fazer desistir.

A minha família, especialmente aos meus pais Joci e Marcelo, a minha avó Maria Cristina e a minha irmã Mayara por todo apoio e incentivo.

A minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Adriana Ribeiro e ao meu Coorientador: Prof. Dr. Fred Nogueira, por aceitarem e transmitirem seus conhecimentos, pela paciência e compreensão em todos os momentos.

A todos os professores que fizeram parte dessa jornada e contribuíram para minha formação.

Aos meus colegas de turma que foram de extrema importância durante toda essa jornada, compartilhando sonhos e sempre incentivando, em especial a Rosylene Portela e Gustavo Brandão. E aos colegas do laboratório de Ressonância Magnética Nuclear ao qual fiz parte.

E a todos que colaboraram para o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

A crescente evolução do uso de plásticos nos diversos segmentos industriais nos últimos anos acabou gerando algumas preocupações, sendo uma delas o impacto negativo que causa no meio ambiente. Visando a redução desses danos, se faz necessário uma correta aplicação mundial da coleta seletiva, que visa combater esses impactos gerados pelo descarte incorreto dos plásticos. Como forma de solucionar os problemas gerados pelo consumo do plástico no meio ambiente, diversas indústrias alimentícias têm investido na utilização da resina reciclada como embalagem plástica devido as suas boas propriedades mecânicas e geração de economia circular. No entanto, existem alguns desafios que podem dificultar o uso dessa embalagem reciclada, como a alteração na viscosidade intrínseca do material, presença de contaminantes, alteração das propriedades óticas e mecânicas. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em realizar um levantamento dos principais problemas enfrentados pela utilização da resina PET reciclada em embalagens alimentícias na indústria, bem como mostrar meios que podem ser utilizados para amenizar esses impactos, como a ferramenta do controle estatístico do processo que realiza a medição e o controle de um processo de fabricação.

**Palavras-chave:** Poli tereftalato de etileno, Reciclagem, Controle estatístico do processo

## ABSTRACT

The increasing evolution of the use of plastics in several industrial segments in recent years has led to some concerns, one of which is the negative impact it causes on the environment. In order to reduce this damage, an appropriate global application of selective collection is necessary, which aims to combat these impacts generated by the incorrect disposal of plastics. As a way of solving the problems generated by the consumption of plastic in the environment, several food industries have invested in the use of recycled resin as plastic packaging due to its good mechanical properties and generation of circular economy. However, there are some challenges that can hinder the use of this recycled packaging, such as changes in the intrinsic characteristics of the material, presence of contaminants, changes in optical and mechanical properties. In this context, the objective of this work is to carry out a survey of the main problems faced by the use of recycled PET resin in food packaging in the industry, as well as to show means that can be used to mitigate these impacts, as a statistical process control tool that performs the measurement and control of a manufacturing process.

**Palavras-chave:** Polyethylene terephthalate, Recycling, Statistical process control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mudança de estado vítreo para um estado elastomérico.....	16
Figura 2: Estado de conformação de um polímero.....	21
Figura 3: Representação estrutural do PET.....	23
Figura 4: Síntese de formação do PET.....	25
Figura 5: Fluxograma do processo de formação do PET.....	26
Figura 6: Processo de fabricação da pré-forma.....	27
Figura 7: Esquema da máquina injetora de polímeros.....	28
Figura 8: Processo de Sopro.....	29
Figura 9: Orientação das moléculas.....	30
Figura 10: Estrutura de um gráfico de controle.....	36
Figura 11: Representação gráfica da carta de controle.....	36
Figura 12: Tipos de danos identificados após o teste de ESC. Da esquerda para a direita: vazamento (furo ou pequena ruptura), estouro quando o fundo se parte ao meio e estouro completo.....	44
Figura 13: Aumento na contaminação durante um ciclo de reciclagem de garrafas de tereftalato de polietileno (PET).....	45
Figura 14: Princípio de funcionamento na engarrafadora de água mineral.....	49
Figura 15: Sequencial de caixas a ser utilizado para melhoria do processo.....	50
Figura 16: Garrafas com variação na coloração.....	51
Figura 17: Pontos pretos presente nas pré-formas/garrafas.....	51
Figura 18: Furos nas pré-formas/garrafas.....	52
Figura 19: Áreas da garrafa que são realizadas as análises dimensionais no sopro	53
Figura 20: Histograma disponibilizado no software DataMyte.....	54
Figura 21: Carta de controle disponibilizada no software DataMyte.....	54

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Principais fatores que interferem na Tg.....	18
Quadro 2: Propriedades do PET.....	24
Quadro 3: Percentual de agentes executores da coleta seletiva.....	35

## **LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1: Comparativo de produção de Resina Pós-Consumo (PCR) 2021 x 2022 - Por região e estado da federação.....	31
Gráfico 2: Estimativa de PET pós-consumo (em kton/ano).....	32
Gráfico 3: Coleta seletiva por região.....	34
Gráfico 4: Trabalhos publicados nas bases ScienceDirect e Scopus durante os anos de 2018 até 2023, com a palavra chave VII.....	41
Gráfico 5: Trabalhos publicados nas bases ScienceDirect e Scopus durante os anos de 2018 até 2023, com a palavra chave VIII.....	42
Gráfico 6: Quantidade de garrafas testadas nos testes ESC, quantidade de garrafas estouradas nos primeiros 5 min, entre 5 e 10 min, e após 10 min.....	44

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Limites de controle das cartas X e R.....	38
Tabela 2: Quantitativo de artigos e de patentes por grupo de palavras-chave empregado na pesquisa.....	40
Tabela 3: Viscosidade intrínseca em g/dL medida de acordo com ASTM D4603-03 para pellets, frascos contendo 100 % do pellet e frascos contendo 25% dos pellets rPET correspondentes.....	43

## SUMÁRIO

1. Introdução.....	2
2. Objetivos.....	4
2.1. Objetivo principal.....	4
2.2. Objetivos específicos.....	4
3. Fundamentação Teórica.....	5
3.1. Histórico.....	5
3.2. Transição Vítreo (Tg).....	6
3.2.1. Fatores que podem influenciar no valor da temperatura de transição vítreo... ..	7
3.3. Cristalinidade.....	19
3.3.1. Fatores que alteram a cristalinidade.....	21
3.4. Viscosidade Intrínseca.....	23
3.5. Poli (Tereftalato de etileno) – PET.....	23
3.5.1. Estrutura e síntese do PET.....	24
3.6. Aplicação industrial do PET.....	27
3.6.1. Injeção.....	27
3.6.2. Sopro.....	28
3.7. PET – PCR.....	30
3.8. Reciclagem do PET.....	32
3.8.1. Funcionamento da cadeia produtiva de reciclagem de material PET.....	33
3.9. Controle Estatístico do Processo.....	35
4. Materiais e Métodos.....	39
4.1. Tipo de Estudo.....	39
4.2. Metodologia.....	39
5. Resultados e Discussão.....	40
5.1. Avaliação da situação mundial das pesquisas com as palavras-chave.....	40
5.2. Estudos de casos.....	42
6. Conclusão.....	56

7. Perspectivas futuras.....	57
8. Referências.....	58

## 1. INTRODUÇÃO

Os polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, por sua estrutura química e pelas interações intramoleculares e intermoleculares e representam, no desenvolvimento industrial, a contribuição da química. (Mano e Mendes, 2004)

De acordo com a fonte de origem, os polímeros são classificados em naturais e sintéticos. Os polímeros naturais são aqueles encontrados na natureza, desde a borracha, polissacarídeos, celuloses e outros (Conde, 2011). Os polímeros sintéticos, são produzidos em laboratório, geralmente consistem de cadeias lineares de polímeros, com esqueleto C—C. (Mano e Mendes, 2013)

Os polímeros são classificados, de acordo com suas características de fusão e amolecimento, em termoplásticos e termorrígidos. O que difere os dois é que, ao aquecer, o termoplástico irá amolecer, e o mesmo pode passar pelo processo de reciclagem, e o termorrígido não sofrerá essa interferência, impossibilitando sua reutilização. (Recicloteca, 2020)

Dentre uma variedade de termoplásticos, o PET apresenta um dos maiores índices de crescimento de consumo no Brasil, onde os principais termoplásticos foram utilizados em embalagens primárias (31%) e descartáveis (22%). Isso implica diretamente na problemática da quantidade de resíduos gerados, colocando o PET em segundo lugar no *ranking* dos termoplásticos mais encontrados no resíduo sólido urbano brasileiro. (Spinacé e De Paoli, 2005)

O uso ubíquo do plástico, juntamente com sua resistência à decomposição, resultou em sérias consequências para os ecossistemas terrestres e aquáticos. Segundo a Fundação Ellen MacArthur em parceria com o Fórum Econômico Mundial (2016), se a poluição por plásticos continuar no ritmo atual, os oceanos poderão conter mais plástico do que peixes até 2050.

Além dos oceanos, o plástico também afeta os ambientes terrestres. Pesquisas conduzidas por Rillig et al. (2017) indicam que a presença de microplásticos no solo pode impactar a flora, a fauna e a qualidade do solo, comprometendo a saúde dos ecossistemas terrestres.

O aumento da população mundial e do consumo acarretou na elevação do uso de materiais plásticos, dessa forma, são procuradas alternativas que viabilizem a diminuição da poluição através desses materiais. Dentre elas, estão a reciclagem e o desenvolvimento de novos produtos (Oliveira e Borges, 2020).

Segundo Forlin e Faria (2002), a caracterização e a separação de contaminantes no processo de reciclagem é importante, de acordo com a classificação desse material. Os materiais utilizados de forma indiscriminada podem acarretar problemas de saúde, principalmente se a utilização for em embalagens alimentícias, pois esses contaminantes podem migrar para o alimento que está contido na embalagem. (UNIVASF, 2019)

Para garantia desse processo se faz necessário investir em tecnologias de reciclagem avançadas, na garantia da qualidade do material reciclado, conscientização da população sobre a importância da reciclagem, criando assim, um sistema eficaz de coleta, triagem e reutilização do material.

A utilização de embalagens recicladas na indústria é uma estratégia que visa reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade. No entanto, esse processo não está isento de desafios significativos que afetam a eficácia e a viabilidade dessa abordagem, ou seja, existe uma certa dificuldade com relação a qualidade variável do material reciclado na indústria.

Uma forma de reduzir esses impactos está na utilização de ferramentas, como o controle estatístico do processo (CEP), que visa uma melhoria no controle de qualidade do processo produtivo e vem contribuindo de forma positiva na minimização de produtos não conformes. (Queiroga, 2021)

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do estudo foi realizar o aprofundamento dos desafios encontrados na utilização da garrafa PET reciclada na indústria alimentícia, bem como verificar a eficácia da utilização do controle estatístico do processo como forma de contornar possíveis limitações.

### 2.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico dos principais problemas ocasionados na utilização da resina reciclada.
- Utilizar estudos relacionados a utilização da ferramenta do controle estatístico do processo para evidenciar a importância da implementação dessa ferramenta em uma engarrafadora de água mineral que utiliza resina 100% reciclada em seu processo produtivo.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

#### **3.1 HISTÓRICO**

O marco inicial na história dos polímeros ocorreu no século XIX, quando o químico Charles Goodyear descobriu, em 1839, o processo de vulcanização da borracha, composta principalmente com enxofre para melhorar as propriedades do material. Esse processo deu origem a uma nova gama de materiais elastoméricos. (Canevarolo, 2006)

Contudo, foi somente no século XX que os polímeros sintéticos modernos começaram a ser desenvolvidos. Um dos pontos de partida mais notáveis foi a descoberta da baquelite em 1907 por Leo Baekeland, que só chegou a fazer sua revelação oficial quase dois anos depois. A baquelite foi o primeiro polímero sintético verdadeiramente comercializado e abriu as portas para a criação de outros materiais poliméricos. (Maia, 2018)

Em 1946, anos após primeiras pesquisas sobre a síntese de poliésteres, J.R Whinfield anunciou a síntese do poli(tereftalato de etileno), mais conhecido como PET, a síntese ocorreu através da condensação de etileno glicol e ácido tereftálico, produzindo um poliéster aromático com uma alta temperatura de fusão. (Hage, 1998)

Em 1970, o PET começou a ser utilizado na fabricação de embalagens. Por volta de 1989, chegou no Brasil para aplicações na Indústria têxtil, sendo utilizado na fabricação de embalagens para bebidas apenas em 1993, onde passou a ser mais benéfico que a garrafa de vidro retornável, muito utilizada naquela época. (UNIVASF, 2019)

As propriedades do PET e o custo benefício desse material tem grande relação com o sucesso que teve na substituição das garrafas de vidro. Outros pontos positivos são com relação a complexidade logística, a verticalização do processo de sopro e a fabricação das embalagens dentro da própria empresa. (Crispim e Borghi, 2008)

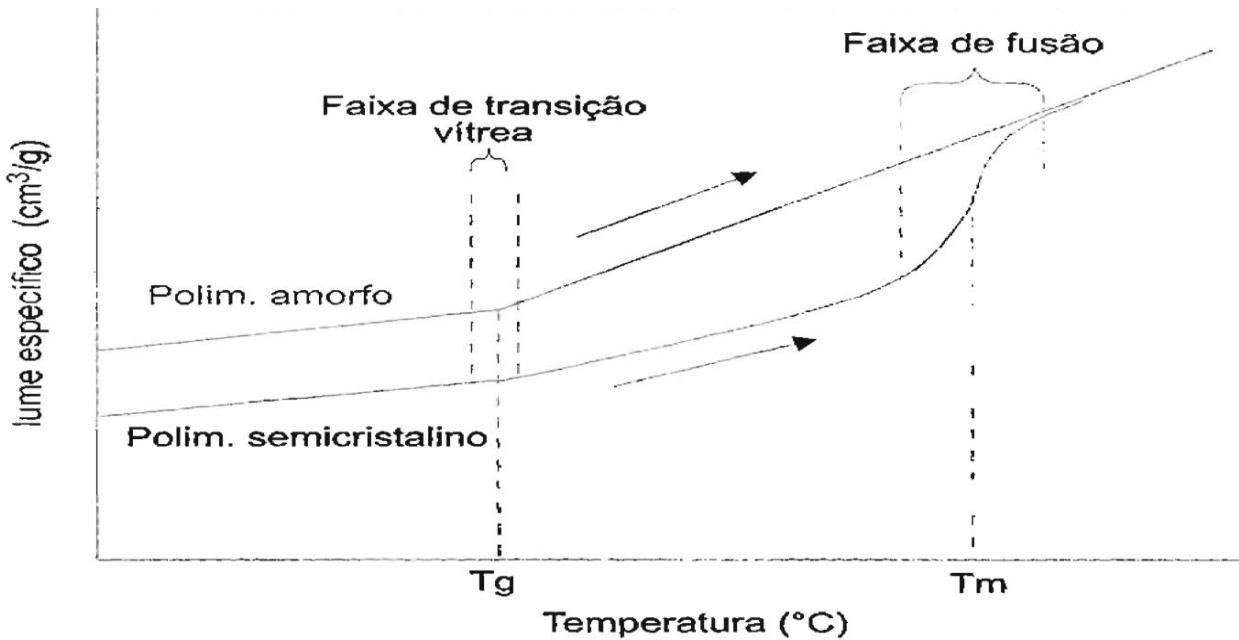
Para a seu processamento e utilização é de suma importância conhecer as propriedades que possuem nos materiais, dentre os mais importantes estão sua transição vítreia e o grau de cristalinidade. (Bannach et.al., 2011)

### 3.2 - TRANSIÇÃO VÍTREA (Tg)

Os polímeros são materiais sólidos com estrutura desordenada que, ao passar da fase sólida para a fase líquida, não sofrem fusão, como os materiais cristalinos, mas sim uma transição de fase chamada de transição vítreia. (Souza et. al., 2004)

A transição vítreia (Tg) é característica de materiais amorfos, é considerada a passagem do estado vítreo para um estado elastomérico, ou seja, apresentará uma elasticidade. (Souza et. al., 2004). Isso acontece durante o aquecimento de um material polimérico, que vai de uma temperatura muito baixa, para uma temperatura mais elevada, permitindo assim, que as cadeias poliméricas da fase amorfa, tenham uma mobilidade permitindo a mudança de conformação, como mostra na figura 1. (Canevarolo, 2006)

Figura 1: Mudança de estado vítreo para um estado elastomérico



Fonte: (CANEVAROLO, 2006)

A partir da transição vítreia é possível determinar as temperaturas de uso e processamento destes materiais. O material é considerado rígido quando a mobilidade das cadeias moleculares é mínima, ou seja, a temperatura de uso está abaixo da transição vítreia. (Guzzo, 2010)

O valor de transição vítreia (Tg) varia de acordo com a taxa de resfriamento ou aquecimento. Isso se dá devido ao fato de que as cadeias poliméricas longas e complexas não respondem instantaneamente a mudança de temperatura, dificultando assim a realização de medições termodinâmicas em polímeros. (Brazel e Rosen, 1993)

Para entender a base molecular da transição vítreia, existem quatro classes que separam os inúmeros movimentos moleculares que ocorrem em uma massa polimérica amorfa. São exploradas a seguir, algumas dessas classes. (Brazel e Rosen, 1993)

- a) Possibilidade no fluxo devido a movimentação de translação das moléculas.
- b) Aumento da elasticidade, devido a flexão e desenrolamento das cadeias poliméricas quando ocorre a movimentação e conjunta e saltos envolvendo de 40 a 50 átomos.
- c) Movimentação de poucos átomos, em torno 5 ou 6, ao longo da cadeia principal ou de grupos laterais da cadeia principal.
- d) Oscilação dos átomos em torno de posições de equilíbrio como ocorrem nas redes cristalinas, exceto que o centro dos átomos não se localiza em um arranjo regular em um polímero amorfo.

### 3.2.1 FATORES QUE PODEM INFLUENCIAR NO VALOR DA TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO VÍTREA

A faixa máxima de variação da transição vítreia dos polímeros pode ser de -100 °C a 300 °C, e são coniventes devido ao fornecimento de polímeros para muitos tipos de aplicações industriais. (Canevarolo, 2006)

A transição vítreia do PET ocorre a uma temperatura (Tg) abaixo da temperatura de ebulição da água, em torno de 86 °C. Acima desta temperatura as moléculas vibram mais frequentemente ficando mole e elástico, sendo assim esticado. Após esfriar e ficar abaixo da sua Tg as moléculas ficam tensionadas, ou seja, totalmente imóveis, retornando a sua forma circular original ao ser reaquecido devido ao relaxamento das moléculas. (Manrich, 2021)

Existem diversos fatores que podem influenciar na variação dos valores da temperatura de transição vítreia apresentados pelos polímeros, sendo relacionados a fatores estruturais particulares. (Canevarolo, 2006). No quadro 1 estão os principais fatores.

Quadro 1: Principais fatores que interferem na Tg.

Características		Tg
<b>Fatores Estruturais</b>	<b>Cadeia Principal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1) Regularidade espacial             <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Linearidade</li> <li>b) Configuração</li> </ul> </li> <li>Encadeamento</li> <li>Isomeria</li> <li>Taticidade</li> <li>c) Copolimerização</li> <li>Sistemas isomorfos</li> <li>Sistemas não isomorfos</li> <li>Sistemas miscíveis</li> </ul>
	<b>Grupo Lateral: Tipos, forma espacial, tamanho, posição e quantidade</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2) Rigidez da cadeia</li> <li>3) Forças intermoleculares             <ul style="list-style-type: none"> <li>a) Polaridade</li> </ul> </li> </ul>
<b>Fatores Externos</b>	<b>Aditivos</b>	Tg ↓
	<b>Segunda fase (imiscíveis)</b>	Não afeta

Fonte: Adaptado de CANEVAROLO JR, 2006.

Segundo Canevarolo, 2006, os fatores mais importantes estão a seguir:

a) Rigidez

Existe um aumento da Tg quando se tem a presença de um agrupamento rígido dentro da cadeia principal, que é o caso do PET que apresenta uma Tg de 69 °C.

b) Polaridade

A presença de grupos polares causa o aumento no valor da Tg, e esse aumento será proporcional à polaridade dos grupos.

c) Simetria

Não existe aumento considerável da Tg quando se tem grupos laterais distribuídos de forma simetricamente na cadeia molecular principal.

d) Massa molecular

É diretamente proporcional, o aumento da massa molecular e a temperatura de transição vítreia, visto que a Tg aumenta quando existe um menor volume livre.

e) Efeitos estéricos

Com relação ao efeito do volume, quando existe um grupo lateral volumoso aumenta a Tg, pois existe uma tendência a ancorar a cadeia polimérica, forçando o aumento dos níveis de energia para que a cadeia possua mobilidade. (Canevarolo, 2006)

Outro fator externo que pode modificar a Tg é a presença de líquidos plastificantes, que são adicionados ou absorvidos pelos polímeros. Geralmente são moléculas pequenas que se alojam entre as cadeias poliméricas, afastando-se uma das outras. (XCIÊNCIA, 2021)

### 3.3 CRISTALINIDADE

A cristalinidade é um dos fatores que pode influenciar no comportamento mecânico de um polímero, alguns dos seus pontos de determinação são a simetria das suas moléculas, sua rigidez e as ramificações. Por ser formado por cadeias de longa composição, geralmente o grau de cristalinidade não fica acima de 90%. (Tavares, et. al. 2000)

O grau de cristalinidade de um polímero vai depender de alguns fatores como, a taxa de resfriamento durante o processo de solidificação e também da configuração da sua cadeia, onde essas precisam assumir uma configuração ordenada. (Callister, 2002)

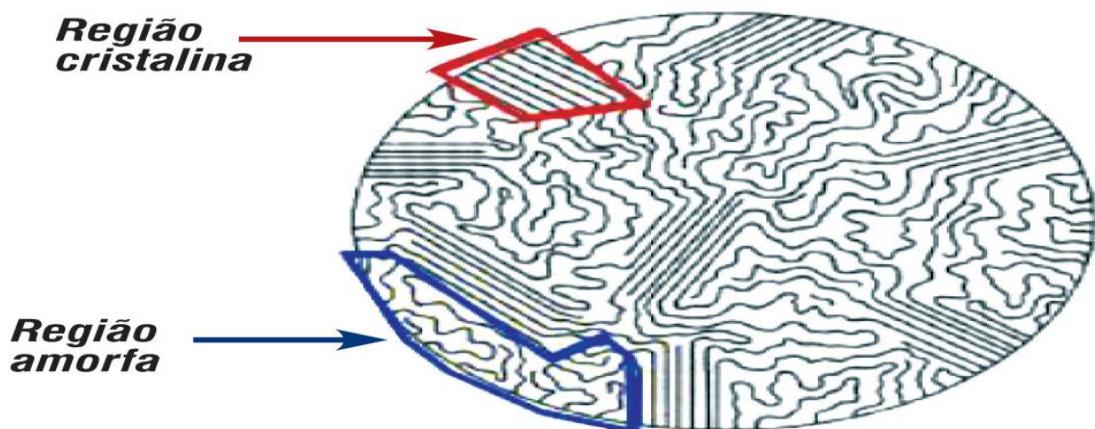
Quanto maior for o grau de cristalinidade, maior será sua resistência térmica, maior a sua rigidez e menor a transparência e resistência ao impacto. (Wiebeck e Harada, 2005)

Ainda de acordo com Callister (2002), como em polímeros lineares não existem condicionantes que impeçam o alinhamento das cadeias, a cristalização é realizada com mais facilidade, já em polímeros compostos que possuem estruturas complexas a cristalização não é favorecida.

O autor ainda cita que, o grau de cristalinidade vai influenciar, de certo modo, as propriedades físicas do material polimérico, onde os polímeros cristalinos são geralmente mais fortes e possuem mais resistência à dissolução e ao amolecimento pelo calor.

O PET é considerado um polímero semicristalino, com uma cristalinidade chegando a uma variação de nível máximo de 50% e 60%. Essa condição se dá devido a uma fração desordenada entre os domínios ordenados, onde estes não são cristais perfeitos. A partir do material fundido, pode-se estudar a cristalização do PET, composta por duas etapas: a nucleação e o crescimento. (Sargentini, 2015) A figura 2 mostra a ilustração do estado de conformação, contendo regiões amorfas e cristalina.

Figura 2: Estado de conformação de um polímero



Fonte: PLASTICO MODERNO, 2016

### 3.3.1 FATORES QUE ALTERAM A CRISTALINIDADE

Três tipos de fatores podem influenciar a cristalinidade de um material polimérico e são eles: os estruturais, a presença de uma segunda molécula e as condições de processamento. Nesses casos, existe um favorecimento para a formação de cristais, quando se tem uma influência no sentido de aumentar a ordem ou regularidade espacial da molécula, facilitando o empacotamento. (Canevarolo, 2006)

Os fatores estruturais falam sobre a estrutura química molecular, ou seja, quais, quantos e como os átomos estão ligados aos meros. (Crema, 2007)

De acordo com Canevarolo (2006), segue abaixo alguns dos fatores que tendem a apresentar cristalinidade:

- A linearidade da cadeia: Facilitam o empacotamento, favorecendo assim a cristalinidade. Ramificações tendem a dificultar o empacotamento pois geram volumes livres nas pontas da cadeia.
- A taticidade: Por apresentar uma ordenação na disposição do grupo lateral, os polímeros estereoregulares tendem a apresentar uma cristalinidade. Já os polímeros atáticos geralmente são amorfos.

- c) A polaridade: A polaridade vai facilitar a aproximação da cadeia, gerando a cristalinidade.
- d) A rigidez: Facilitam o empacotamento, pois tendem a manter suas cadeias de uma forma paralela entre si.

Ainda de acordo com Canevarolo (2006) segue abaixo alguns fatores que dificultam a cristalinidade:

- a) O grupo lateral: A presença do grupo lateral na cadeia principal vai dificultar o empacotamento, reduzindo a chance de cristalização.
- b) A flexibilidade da cadeia principal: Apresentam uma enorme dificuldade de empacotamento ordenado. Que é o exemplo do PET, que é um poliéster aromático saturado, um polímero semicristalino, devido à sua rigidez que é causada pelo grupamento para-fenileno na sua cadeia principal.
- c) A Copolimerização: Por possuir dois meros diferentes na cadeia principal existe uma dificuldade no empacotamento, apresentando baixa ou nenhuma cristalinidade.

E os fatores externos, podem ser moléculas diferentes, aditivos, impurezas e outras cadeias poliméricas. (Crema, 2007)

E de acordo com Canevarolo (2006), podem ser classificadas como:

- a) Impurezas ou aditivos: Substâncias estranhas que interagem com as cadeias, dificultando o empacotamento.
- b) Segunda fase: Presença de outras cadeias de segunda fase só vão alterar a cristalinidade do polímero que compõe a matriz quando a estrutura química é semelhante.

### 3.4 VISCOSIDADE INTRÍNSECA

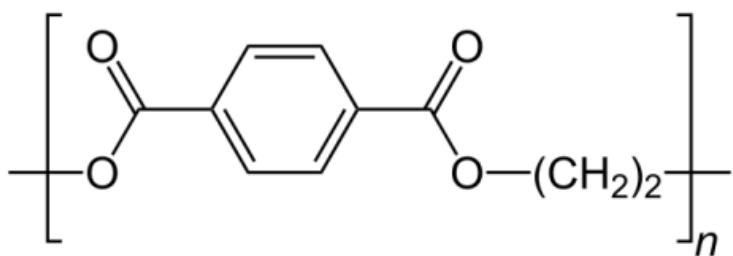
A viscosidade intrínseca é a metodologia mais utilizada para medir a massa molecular na indústria de PET, onde a massa molecular tem relação direta com as propriedades dos polímeros (Castro, 2015). Onde irá definir a qualidade e a resistência dos mesmos (Santos, 2008).

A viscosidade intrínseca na fabricação de PET por meio de moldagem por injeção, estiramento e sopro, fica em torno de 0,80 - 0,85 g/dL. Sendo uma medida do massa molar das macromoléculas presentes na PET, porém ela não consegue descrever toda a estrutura da cadeia (Miranda, 2011).

### 3.5 POLI (TEREFTALATO DE ETILENO) - PET

O Polietileno Tereftalato (figura 3), comumente conhecido como PET, é um dos plásticos mais utilizados na indústria de embalagens e em outros setores. Consiste em um polímero termoplástico, que se origina a partir do etileno glicol e do ácido tereftálico, e possui moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio. (Macedo, et. al. 2020)

Figura 3: Representação estrutural do PET



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Devido sua vasta aplicação industrial, é considerado um dos plásticos mais importantes, além de ter alta resistência a tração e impacto, resistência química e baixa permeabilidade a gases (Silva, 2019).

O PET é frequentemente associado a aplicações de embalagens, como garrafas de bebidas, frascos de produtos de cuidados pessoais e embalagens de alimentos. Além disso, o PET é amplamente reciclado, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas de embalagem. (Olam, 2021)

Por possuir uma alta temperatura de fusão (275°C) e uma transição vítreia (70°C), o PET consegue manter suas propriedades mesmo em altas temperaturas, pois essas condições fazem com que o PET possua uma alta rigidez e uma baixa mobilidade das cadeias. (Wiebeck e Harada, 2005). Abaixo, no quadro 2, constam as principais propriedades do PET.

Quadro 2: Propriedades do PET

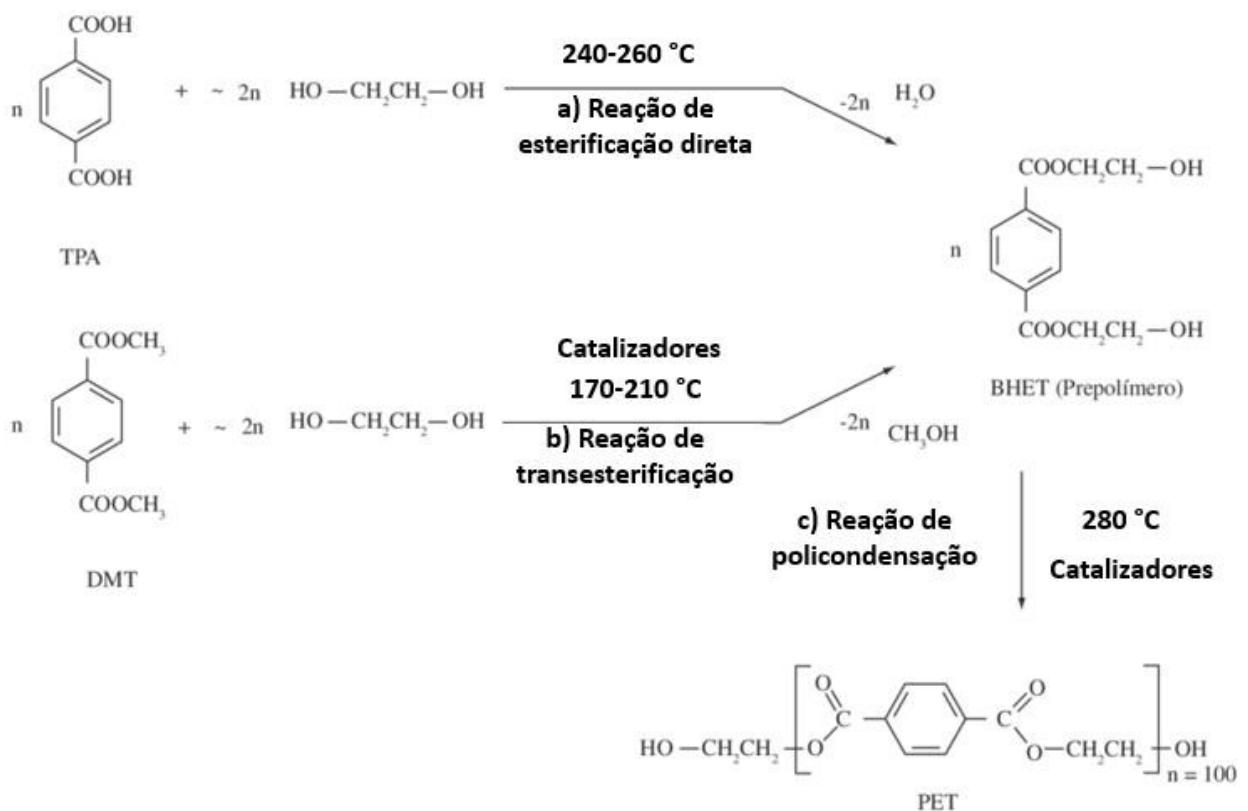
PROPRIEDADES DO PET	
<b>Nome:</b>	Poli (Tereftalato de etileno)
<b>Sigla:</b>	PET
<b>Origem:</b>	Sintético (policondensação do ácido tereftálico + etileno glicol)
<b>Comportamento mecânico:</b>	Termoplástico
<b>Organização molecular:</b>	Semicristalino
<b>Densidade (sólido):</b>	1,36 g/cm <sup>3</sup>
<b>Temperatura de transição vítreia (Tg):</b>	70° C
<b>Temperatura de fusão (Tm):</b>	260°C
<b>Temperatura de processamento:</b>	extrusão (260 a 280 °C), injeção (260 a 290 °C)
<b>Secagem:</b>	recomenda-se de 160 a 180 °C, durante 3 a 5 horas
<b>Temperatura de uso contínuo:</b>	até 140°C

Adaptado: Soares, 2021

### 3.5.1 ESTRUTURA E SÍNTESE DO PET

O PET é obtido a partir da policondensação do ácido tereftálico (TPA) ou dimetil tereftalato (DMT) com o etileno glicol (EG) com eliminação de água, como mostrado na figura 4. A partir desse processo irá originar um polímero heterogêneo, aromático e que vai possuir um grupo funcional éster na composição do mero. Possui uma flexibilidade a temperatura ambiente devido a sua sequência alifática, aberta, não cíclica e a presença do oxigênio, e o grupo benzênico oferece uma alta rigidez. (Soares, 2021)

Figura 4: Síntese de formação do PET



Fonte: (Romão, et. al. 2009)

Dependendo da aplicação desejada, a produção do PET pode ser realizada em duas ou três etapas, sendo necessário chegar até a terceira etapa caso precise obter um polímero com elevada massa molecular.

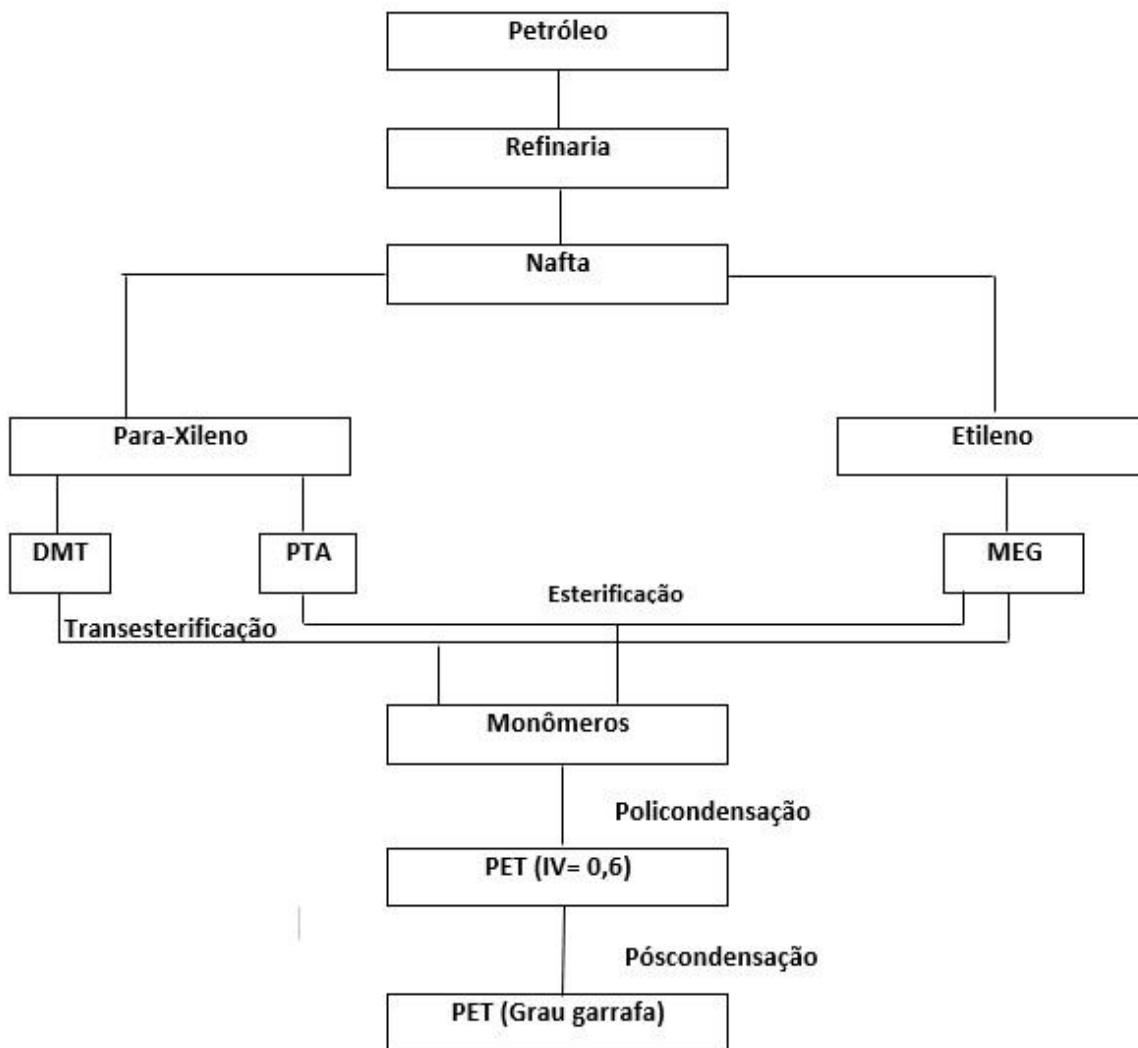
A primeira delas é a etapa de pré-polimerização, onde através de duas rotas distintas pode produzir o oligômero tereftalato de bis (2-hidroxietileno), BHET. (Romão, et. al. 2009)

- Esterificação direta: Obtida a partir da reação do ácido tereftálico (TPA) com o etileno glicol (EG).
- Transesterificação: Obtida a partir da reação do éster tereftalato de dimetileno (DMT) com o etileno glicol (EG).

A rota da esterificação direta vem sendo, nos dias atuais, a mais utilizada nas empresas fabricantes de garrafas PET.

A segunda etapa é a de policondensação, onde o BHET, após sua síntese na primeira etapa, será aquecido. Essas duas etapas de sínteses são suficientes para alguns produtos, para outros se faz necessário uma terceira etapa, que é a etapa de polimerização no estado sólido, onde é realizado a uma temperatura que fica entre a transição vítreia e a temperatura de fusão. (Romão, et. al. 2009) O fluxograma (figura 5) mostra da etapa inicial a etapa final do processo de formação do PET.

Figura 5: Fluxograma do processo de formação do PET



Adaptado: Plastico.com.br (2016)

Para utilização da resina PET sintetizada na indústria de bebidas, se faz necessário chegar até a terceira etapa do processo, que tem como objetivo o aumento da sua massa molecular, consequentemente da viscosidade intrínseca e a cristalinidade desse material. (Romão, et. al. 2009)

### 3.6 APLICAÇÃO INDUSTRIAL DO PET

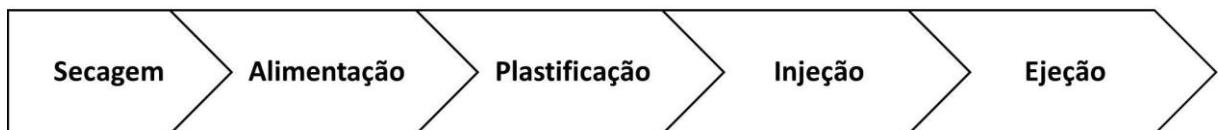
Segundo Mano e Mendes (1999), o Polietileno Tereftalato, pode ser apresentado no estado amorfo, parcialmente cristalino e altamente cristalino e tem sua maior aplicação em garrafas descartáveis de refrigerante. É utilizado nos dias de hoje no envasamento de vários produtos, inclusive de caráter alimentício.

Pode-se obter a embalagem de polietileno tereftalato através do processo de injeção e sopro.

#### 3.6.1 INJEÇÃO

Para a realização do processo de moldagem por injeção são necessárias 5 etapas, na figura 6, tem-se um resumo do processo de fabricação da pré-forma para embalagens plásticas por meio do processo de injeção:

Figura 6: Processo de fabricação da pré-forma



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

O processo é iniciado com a secagem da resina PET, sendo ela a etapa mais importante, pois os materiais podem sofrer hidrólise e eles precisam apresentar um baixo grau de umidade. A secagem pode ser feita por processo mecânico ou térmico. (Spinacé e de Paoli, 2005)

Em seguida, a etapa de alimentação, que funciona através de um funil, uma rosca faz o carregamento do polímero presente no funil até a parte frontal. A rosca homogeneiza o polímero e faz a injeção no molde. (Manrich, 2005)

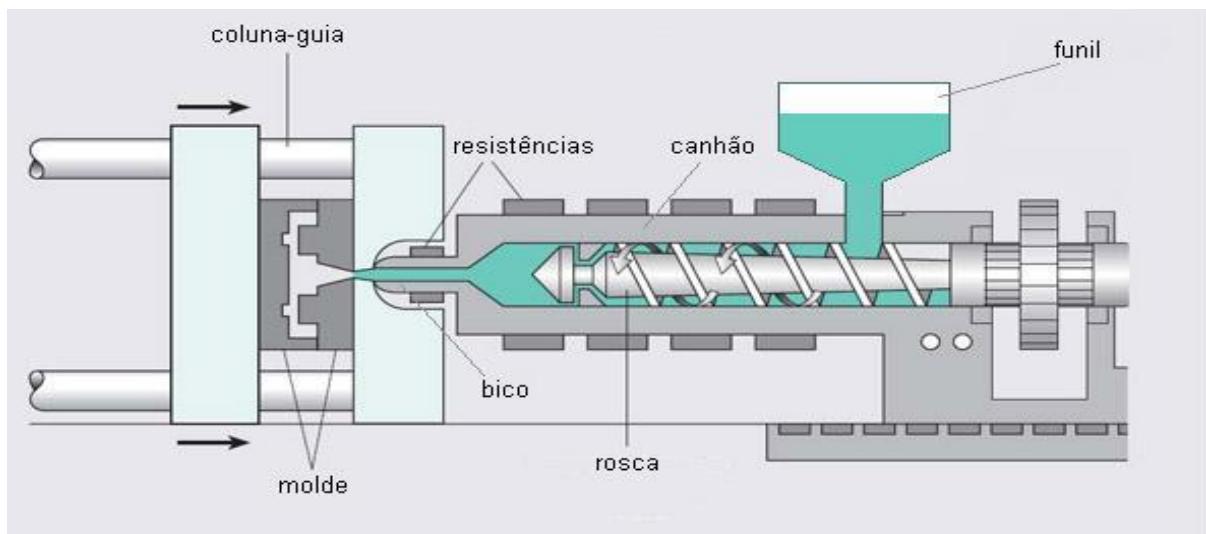
A terceira etapa é a mais delicada do processo, a de plastificação, que consiste na mudança do estado físico do material, onde normalmente a temperatura é controlada por resistência, e são ajustadas em 265 °C a 295 °C, visando evitar a degradação do material. (M&G, 2009)

A quarta etapa, é a etapa de injeção que é quando o PET é inserido no molde e criado sua forma. Essa etapa é composta pelo aquecimento da matéria-prima,

onde a injeção irá entrar de forma direta no molde e ocorrerá o seu resfriamento. (M&G, 2009)

Na última etapa do processo o material é ejetado da máquina para ser estocado e comercializado. (GO4MOULD, 2022) A figura 7 mostra o funcionamento da máquina injetora.

Figura 7: Esquema da máquina injetora de polímeros.

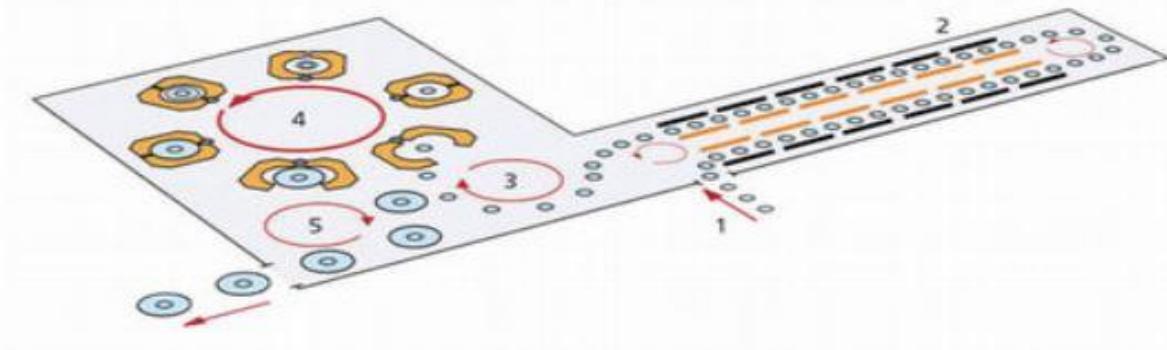


Fonte: RODA, 2011

### 3.6.2 SOPRO

O processo de Sopro, figura 8, passa pelas etapas de abastecimento da pré-forma (1), aquecimento da pré-forma em um forno (2), transferência da pré-forma aquecida para a roda de sopro (3), estiramento da pré-forma (4) e transferência da pré-forma para a saída do equipamento (5). (M&G, 2009)

Figura 8: Processo de Sopro



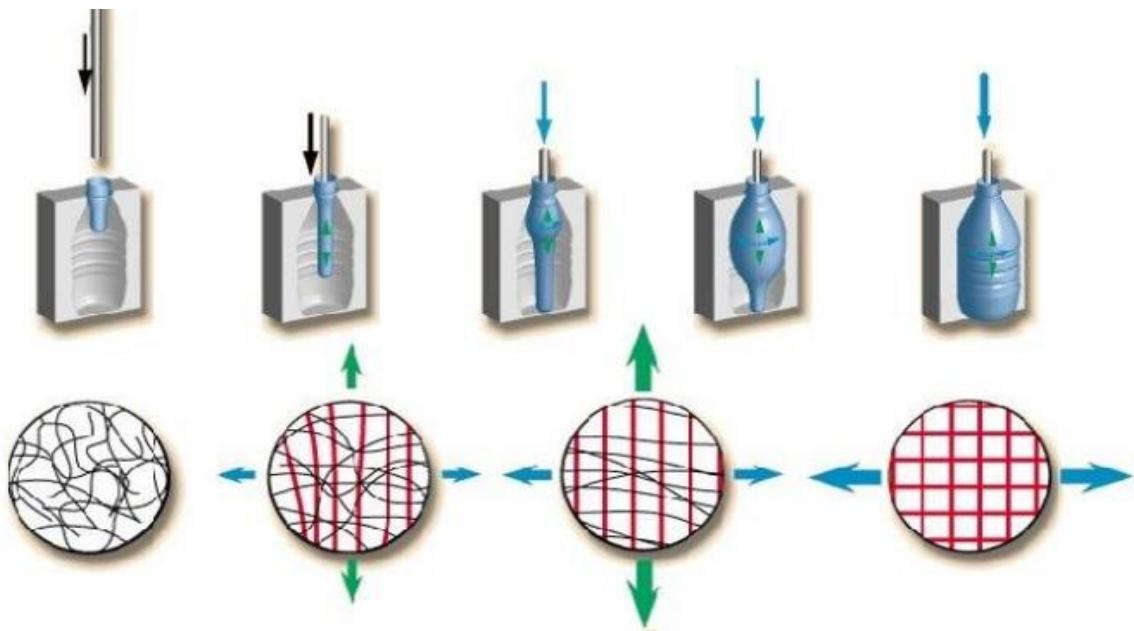
Fonte: Manual Técnico – Resina PET (M&G, 2009).

Inicialmente, a pré-forma é injetada na máquina injetora em forma de tubo, logo após, irá sofrer um aquecimento dentro de uma câmera, conhecida como forno, sendo então transportada para um molde de sopro, com o formato do material desejado. (Mundo plástico, 2023)

A pré-forma é estirada (figura 9), orientando as moléculas na direção bi orientada, até adquirir seu formato final, conforme figura 9. Essa orientação depende de alguns fatores como, a taxa de estiramento do material, a viscosidade intrínseca do PET e a temperatura do processo. (M&G, 2009)

A fim de se obter uma boa distribuição do material, deve-se seguir algumas condições, como manter a temperatura das pré-formas entre 100 °C e 110 °C, e uma pressão de 40 bar. (M&G, 2009)

Figura 9: Orientação das moléculas.



Fonte: Manual Técnico – Resina PET (M&G, 2009).

O aquecimento da pré-forma pode ser obtido de duas maneiras, a depender da sopradora, pode ser através de lâmpadas infravermelhas com comprimento de onda curto, que são controladas individualmente ou por uma potência de aquecimento que é auto regulada conforme as temperaturas registradas por uma câmera infravermelha que faz avaliação da temperatura das pré-formas na saída do forno. (M&G, 2009)

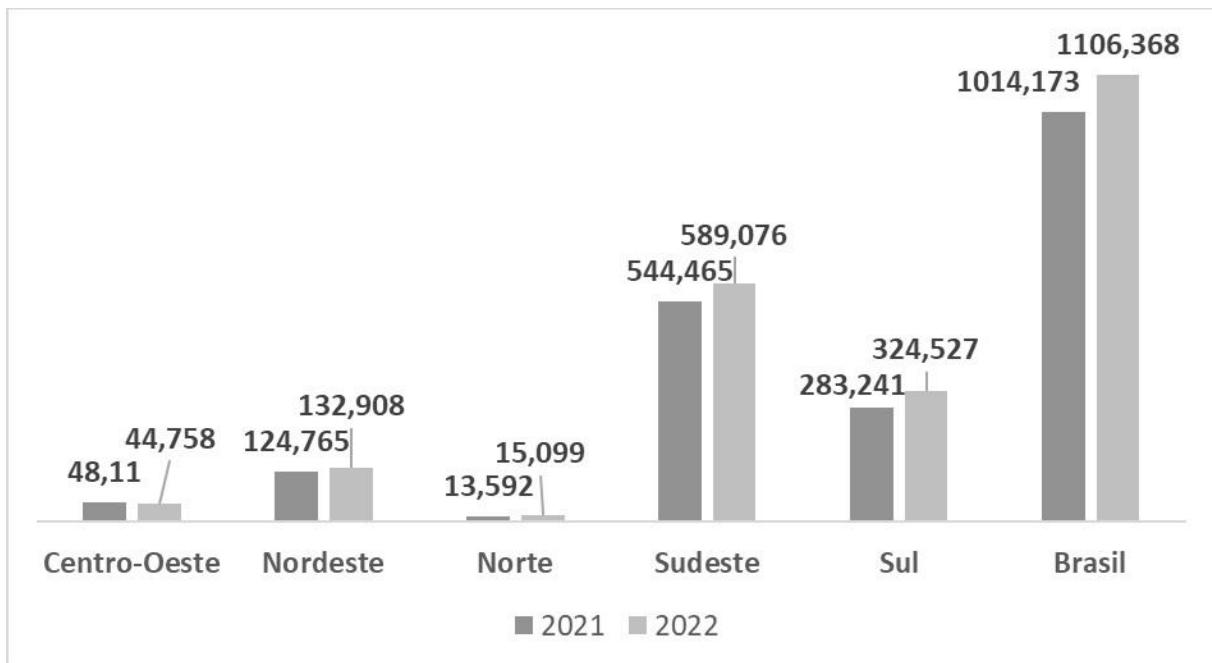
### 3.7 PET-PCR

Segundo a Resolução RDC n° 20 (BRASIL, 2008), PET-PCR é um material oriundo de um fornecedor de PET pós-consumo e/ou de descarte industrial, podendo ser utilizado em embalagens para fins alimentícios, pois o material passa por uma tecnologia de reciclagem física e/ou química com alta eficiência de descontaminação.

Após a liberação do uso de PET reciclado para embalagens de alimentos pela legislação brasileira, a produção de resina pós consumo (PCR), vem crescendo gradativamente. Segundo a ABIPLAST, no ano de 2022 foi registrado o maior crescimento, desde 2018, no índice de reciclagem mecânica dos plásticos pós-consumo, atingindo a marca de 25,6%. (ABIPLAST, 2023)

Exceto o centro-oeste, todas as regiões brasileiras apresentaram, em 2022, um crescimento na produção da resina reciclada pós-consumo em comparação com o ano anterior, como mostra o gráfico 1. (ABIPLAST, 2023)

Gráfico 1: Comparativo de produção de Resina Pós-Consumo (PCR) 2021 x 2022 - Por região e estado da federação.



Fonte: adaptado de Abiplast, 2023 e Abiplast, 2022

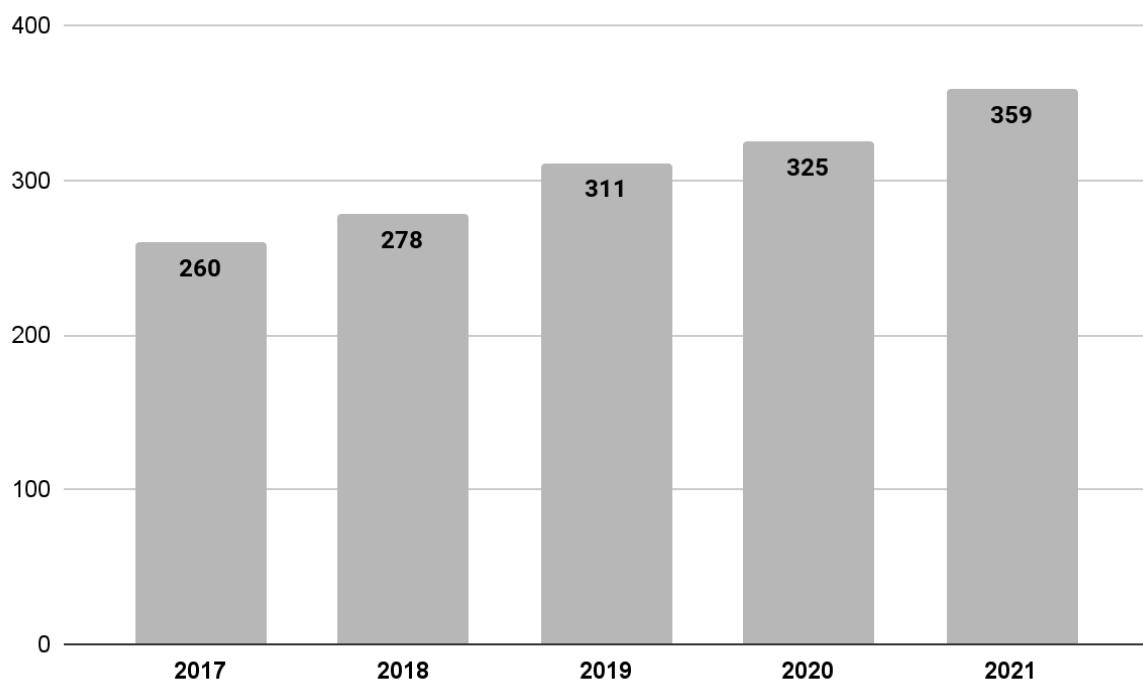
As garrafas PET-PCR podem conter possíveis contaminações devido a componentes químicos existentes nessas embalagens, um dos possíveis contaminantes é o acetaldeído, que com o tempo pode se difundir no produto acondicionado. A geração do acetaldeído se dá por meio da submissão a alta temperatura do PET que pode chegar a ser maior que seu ponto de fusão. (Soares, 2011)

O sistema *bottle-to-bottle*, é o nome dado para o processo de reciclagem de garrafas PET para fabricação de novas garrafas PET que armazenam bebidas e/ou produtos de grau alimentício. (Welle, 2011). Esse sistema corresponde a uma etapa de descontaminação, onde o PET vai ser submetido a algumas etapas assegurando a eliminação de possíveis contaminantes. (Cruz et al., 2011).

### 3.8 RECICLAGEM DO PET

Segundo a Associação Brasileira da Indústria do PET (Abipet), o PET é o plástico mais reciclado no mundo inteiro. Houve um aumento no número de 15,4% em 2021 com relação à última pesquisa realizada em 2019, como mostra o gráfico 2.

Gráfico 2: Estimativa de PET pós-consumo (em kton/ano)



Fonte: adaptado [ABIPET] 12º Censo

Uma pesquisa realizada pela Confederação Nacional das Indústrias em 2019 fala que mais de 76% das indústrias brasileiras já aplicam ações sustentáveis focando na economia circular. Atualmente, existem algumas certificações, como a certificação lixo zero, que tem por finalidade atestar a correta gestão de resíduos sólidos aplicada de acordo com metodologia Lixo Zero.

O acúmulo de plástico vem sofrendo um crescimento de forma constante, devido ao aumento de sua produção mundial, e seu descarte de forma indevida e desregrada geram grandes problemas nos aterros sanitários e nos oceanos, podendo gerar prejuízo financeiro e impactar negativamente na pesca e no turismo. (Notaro, 2022)

Como forma de combate aos impactos ambientais causados pelo descarte de forma incorreta dos PET, se faz necessário que a coleta seletiva esteja presente em todo o país. A coleta seletiva serve para separar os materiais que possuem tipos de resíduos e características diferentes e de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos ele deve ser adotado em todos os municípios brasileiros. (Freitas, 2021)

O custo, a oportunidade de negócio, a mudança de comportamento e o interesse público são, a curto prazo, os quatro principais fatores para a utilização da reciclagem. Isso porque os resíduos gerados e seu descarte incorreto gera um custo incontrolável para toda uma cadeia, do governo ao consumidor final e a reciclagem serve como uma oportunidade de redução desses custos, gerando também vários benefícios ao meio ambiente. (Notaro, 2022)

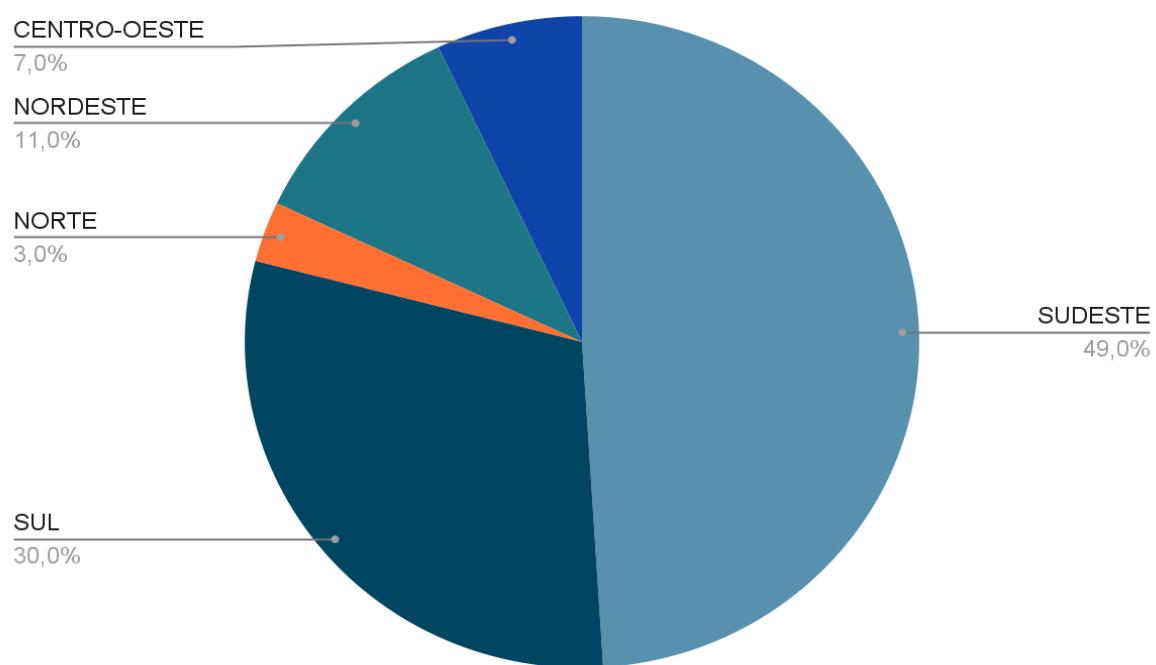
Segundo Rolim (2001), existem três tipos de processos de reciclagem do plástico que são os processos químico, mecânico e energético. Onde a reciclagem química faz a transformação do material plástico em substância química ou matéria prima, a reciclagem mecânica é o método mais comum, é realizado através de moagem, lavagem, separação, secagem e extrusão do material, e a reciclagem energética, o plástico é transformado em combustível a partir da incineração do material. (Spinacé e De Paoli, 2005)

Para ocorrer a transformação do material reciclável em um produto reciclado existe um processo onde é preciso ocorrer a separação desse material corretamente, assim não comprometendo seus aspectos físicos e químicos. A variação e a presença de outros fatores, como a diversidade de materiais plásticos encontrados em resíduos sólidos urbanos, nesse processo de reciclagem refletem em um grande problema, pois as estruturas e composições químicas de forma diferente produzem uma incompatibilidade, podendo produzir um material não conforme.

### 3.8.1 FUNCIONAMENTO DA CADEIA PRODUTIVA DE RECICLAGEM DE MATERIAL PET

No ano de 2022, pesquisas mostram que a região Sudeste é a que tem a maior concentração de municípios com coleta seletiva em operação: 48,5%. Em segundo lugar vem a região Sul com 29,6%, seguida pela região Nordeste com 11,1%, em quarto lugar, vem a Centro-Oeste com 7,3% e a região Norte em quinto lugar com 3,3%, como mostra o gráfico 3. (PIVA, 2023)

Gráfico 3: Coleta seletiva por região



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Uma pesquisa realizada pela CEMPRE (Compromisso empresarial para reciclagem), no ano de 2023, foi levantado os principais agentes executores nas cidades de cada região brasileira, conforme apresenta o quadro 3:

Quadro 3: Percentual de agentes executores da coleta seletiva

	Prefeitura	Empresa Licitada	Organização de catadores
<b>CENTRO-OESTE</b>	<b>44,1%</b>	41,3%	14,6%
<b>NORDESTE</b>	4,6%	33,1%	<b>62,3%</b>
<b>NORTE</b>	-	28,4%	<b>71,6%</b>
<b>SUDESTE</b>	7,4%	39,6%	<b>53,0%</b>
<b>SUL</b>	16,6%	<b>52,4%</b>	31,0%
<b>BRASIL</b>	15,3%	<b>45,3%</b>	39,4%

Fonte: (CICLOSOFT, 2023)

### 3.9 CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

O controle estatístico do processo (CEP) é considerado como um conjunto de ferramentas que visa o monitoramento on-line da qualidade de um determinado processo. Sendo assim, pode-se dizer que ele consegue realizar uma descrição detalhada do comportamento desse processo. (Lima et al., 2006)

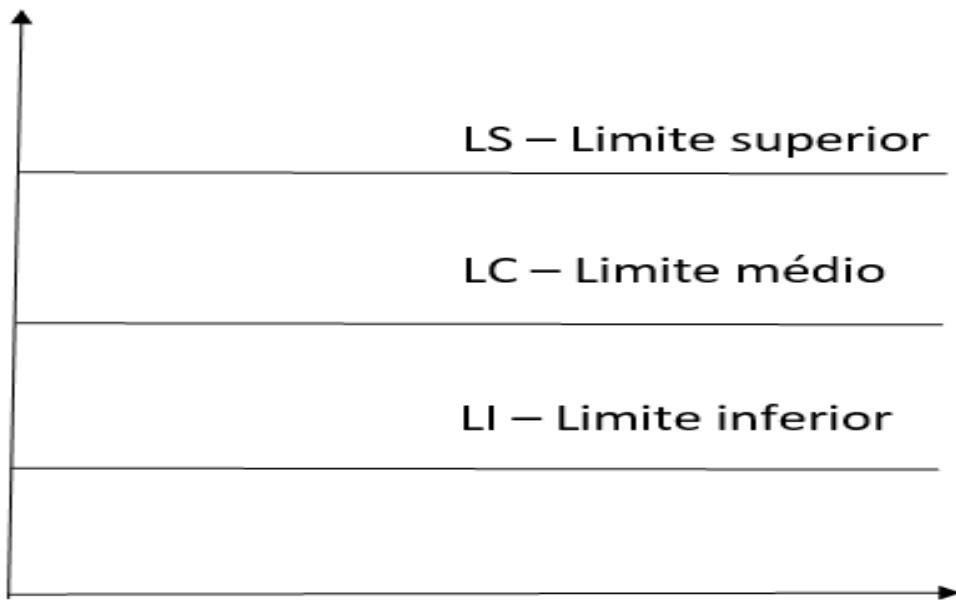
Para Silva et al. (2019), o Controle Estatístico do Processo é uma metodologia que atua preventivamente sobre o processo produtivo, que vai utilizar a estatística como instrumento básico para realizar a avaliação de suas alterações, buscando o aperfeiçoamento contínuo da qualidade, baseado em técnicas estatísticas amplamente utilizadas para descrever e interpretar a variabilidade.

O CEP tem como objetivo proporcionar um processo estável, analisando e interpretando dados com a finalidade de resolver um problema particular. Esses processos são controlados através de medições de variáveis e seus resultados são registrados em cartas de controle. (Lima et al., 2006)

Para Samohyl (2009) as cartas de controle são elementos visuais para o monitoramento de características dos produtos e processos. Onde se é possível verificar se o processo se encontra sob controle, ou seja, se não há nenhuma causa especial. A carta de controle possui um LSE que é o limite superior de especificação,

LIE é o limite inferior de especificação e o LC que é o limite médio, como mostra a figura 10.

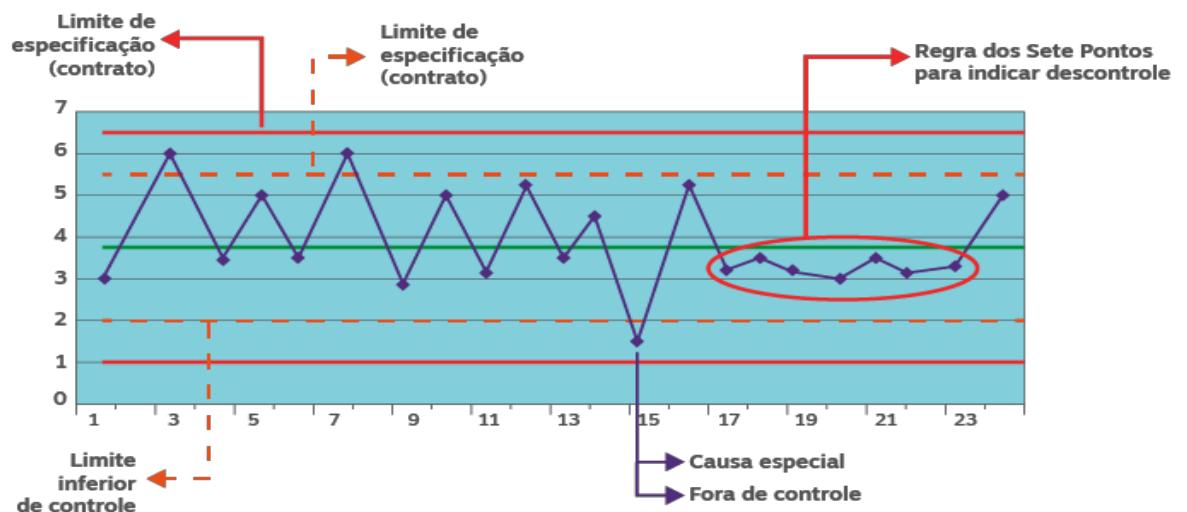
Figura 10: Estrutura de um gráfico da carta de controle



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Os produtos podem sofrer uma variação durante o processo produtivo, e essas causas de variação podem ser classificadas como comuns ou aleatórias e causas especiais (figura 11).

Figura 11: Representação gráfica da carta de controle



Fonte: (PEREIRA, 2023)

Para Ramos (2013), causas especiais é a faixa entre os limites de controle que definirá a variação aleatória no processo. São chamadas de causas especiais aquelas que possuem um ou mais pontos fora dos limites de controle, sete ou mais pontos consecutivos acima ou abaixo do limite médio, seis pontos consecutivos em linha ascendente ou descendente continuamente, quatorze pontos consecutivos alternados para cima e para baixo. (Pereira, 2023)

Para assegurar que não ocorra erros por alarmes falsos relacionados a causas especiais, se faz necessário a visualização conjunta de mais de uma dessas causas assegurando assim um melhor controle estatístico do processo. A quantidade de amostras analisadas influencia nesses alarmes falsos. (Fonseca et al., 2020)

Existem duas classificações de carta de controle: carta de controle por variáveis e carta de controle por atributos, que para sua escolha depende do tamanho da amostra a ser analisada, a primeira é mais complexa e apresenta um maior número de informações, possui como benefício a possibilidade da aplicação de ações preventivas, e a segunda, é indicada para verificação do processo, se está conforme ou não, se trata de uma opção mais simples podendo utilizar ações corretivas em casos de desvio padrão. (Saldinha et al., 2013)

Solvero, 2022 comenta que existem sete tipos de gráficos e eles são divididos em dois grupos:

1 - Variáveis:

1. Gráfico de controle X: Utilizado para controlar parâmetros mensuráveis, mas as amostras são de forma unitária.
2. Gráfico de controle X-R: O mais utilizado, as amostras podem ser de 2 a 9. Nos permite fazer uma avaliação dos dados, mostrando a evolução da média e da amplitude.
3. Gráfico de controle X-S: Pode ser utilizado com um número de amostra maior que 10. Para essa quantidade de amostra a amplitude não consegue estimar tão bem a dispersão.

2 - Atributos

4. Gráfico de p: Utilizado para avaliação de atributos como, passa/não passa, ok/nok. Avaliando assim a proporção de itens defeituosos dentro daquela amostra.
5. Gráficos np: Utilizado para controlar o percentual de itens defeituosos.
6. Gráfico de c: Utilizado para medir um defeito específico, possui tamanho de amostra fixo.
7. Gráfico de u: semelhantes ao gráfico de c, porém possui tamanho variável para a amostra;

São utilizadas as seguintes equações (Tabela 1):

Tabela 1: Limites de controle das cartas  $\bar{X}$  e R

Limites de controle		
Carta para Atributos	Carta da Média ( $\bar{X}$ )	Carta da Amplitude (R)
$LSC = np + 3\sqrt{np(1 - p)}$	$LSC = \bar{\bar{X}} + A2\bar{R}$	$LSC = D4\bar{R}$
$LC = np$	$LC = \bar{\bar{X}}$	$LC = \bar{R}$
$LIC = np - 3\sqrt{np(1 - p)}$	$LIC = \bar{\bar{X}} - A2\bar{R}$	$LIC = D3\bar{R}$

Fonte: Montgomery, 2013

Diante do que foi exposto, essa pesquisa foi realizada com o intuito de salientar a da utilização do controle estatístico do processo. Este controle é importante para que ocorra um bom processo produtivo utilizando a resina reciclada. O estudo realizado no processo de sopro corroborou a importância de se avaliar as variáveis envolvidas, como a transição vítreo e a cristalinidade, para que ocorra uma boa estabilidade durante a produção.

Destaca-se ainda a importância de ter o conhecimento sobre o funcionamento da coleta seletiva, os tipos de reciclagem e os fatores que podem afetar esse processo produtivo, como a alteração nas propriedades do PET, contaminação da resina, entre outros.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 TIPO DE ESTUDO

O desenvolvimento do estudo do presente trabalho se trata de uma revisão bibliográfica em diferentes tipos de publicações, livros e artigos, visando sempre o foco principal do estudo.

O estudo teve como objetivo, analisar os processos de transformação do PET reciclado utilizado, principalmente, na indústria de alimentos e seus desafios, verificando meios de otimização do processo através de ferramentas como o controle estatístico do processo (CEP).

### 4.2 METODOLOGIA

As etapas utilizadas para esse levantamento de informações foram realizadas por meio do processo de pesquisa em bibliotecas e bases de dados: plataforma SciELO (Scientific Electronic Library Online), Google Acadêmico, periódicos (Portal da CAPES), plataforma Science.gov e portal ScienceResearch.com, publicações, livros e sites.

Para realizar o levantamento do quantitativo de artigos existentes utilizando as palavras-chaves empregadas na pesquisa foram realizadas buscas em língua inglesa, e sem determinação de ano e localização, com a pretensão de obter uma visão geral sobre a pesquisa nessa área. As buscas dos artigos foram realizadas nas bases: ScienceDirect e Scopus, no período de janeiro de 2023 a fevereiro de 2024.

Após a realização do levantamento de dados foram selecionados materiais que pudessem agregar à pesquisa e realizado a análise e interpretação desses materiais. E baseado no referencial teórico e na coleta de dados realizados durante a pesquisa, elaborou-se uma análise, fazendo uma comparação da estabilidade e capacidade dos processos antes e depois da implementação do CEP.

O presente trabalho buscou avaliar se a aplicação do Controle estatístico do processo é uma ferramenta válida, que visa prevenir a formação de defeitos e não conformidades dos insumos em indústrias alimentícias, como forma de prevenção de controle de qualidade.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Avaliação da situação mundial das pesquisas com as palavras-chave

Buscando analisar a situação mundial das pesquisas envolvendo a utilização do controle estatístico do processo para verificação do comportamento da resina PET reciclada em embalagens, foi realizada uma busca em duas bases de artigos, abrangendo todos os artigos publicados até o ano de 2023 (tabela 2). Os termos de buscas (palavras-chaves) empregados foram: Quality tools (I), Statistical process control (II), Control Chart (III), Polymers (IV), Polyethylene Terephthalate (V), Recycling (VI), Recycled PET Resin (VII), Challenges of Recycled PET Resin in the Industry (VIII).

Tabela 2 - Quantitativo de artigos e de patentes por grupo de palavras-chave empregado na pesquisa

<b>PALAVRAS-CHAVE</b>	<b>SCIENCE DIRECT</b>	<b>SCOPUS</b>
I	598018	340
II	902468	2105
III	202798	3301
IV	517189	278250
V	24869	9952
VI	247837	65112
VII	4336	715
VIII	2109	55

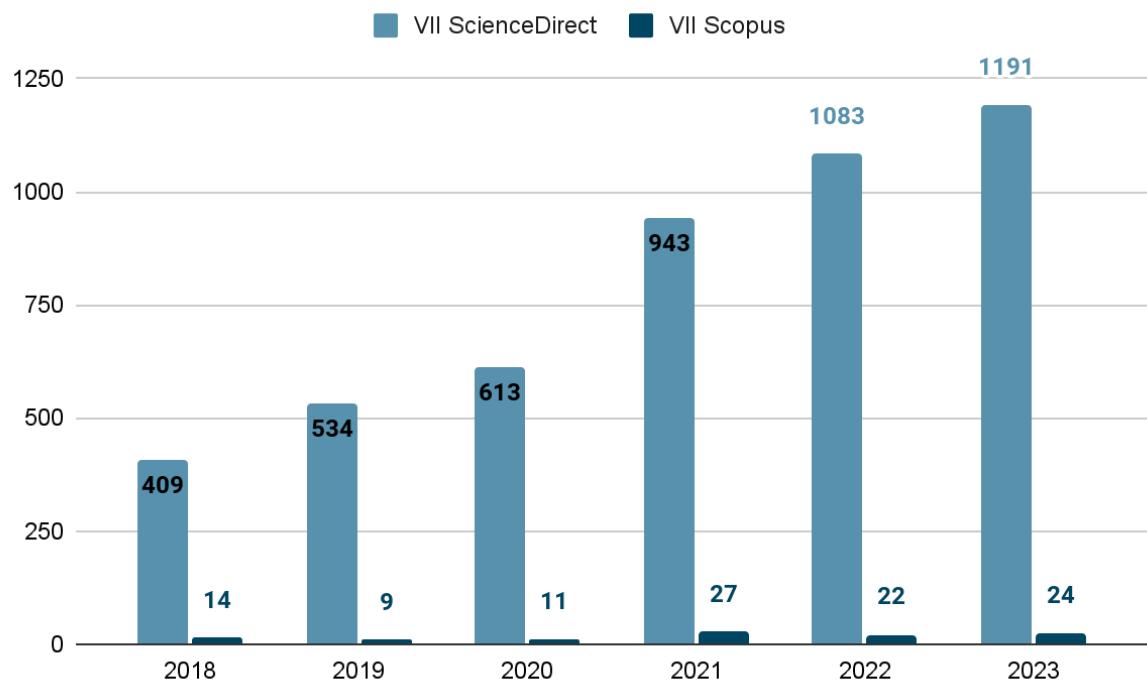
Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Nos últimos anos, a crescente busca pela embalagem reciclada vem aumentando gradativamente devido aos profundos danos que a longa decomposição do plástico pode causar ao meio ambiente. Em paralelo a isso, o controle estatístico do processo foi integrado com outros programas da qualidade, como o Seis Sigma, tornando-se uma ferramenta fundamental dentro das corporações.

Realizando um levantamento sobre os artigos publicados com as palavras chaves VII e VIII durante os anos de 2018 a 2023, podemos verificar nos gráficos 4

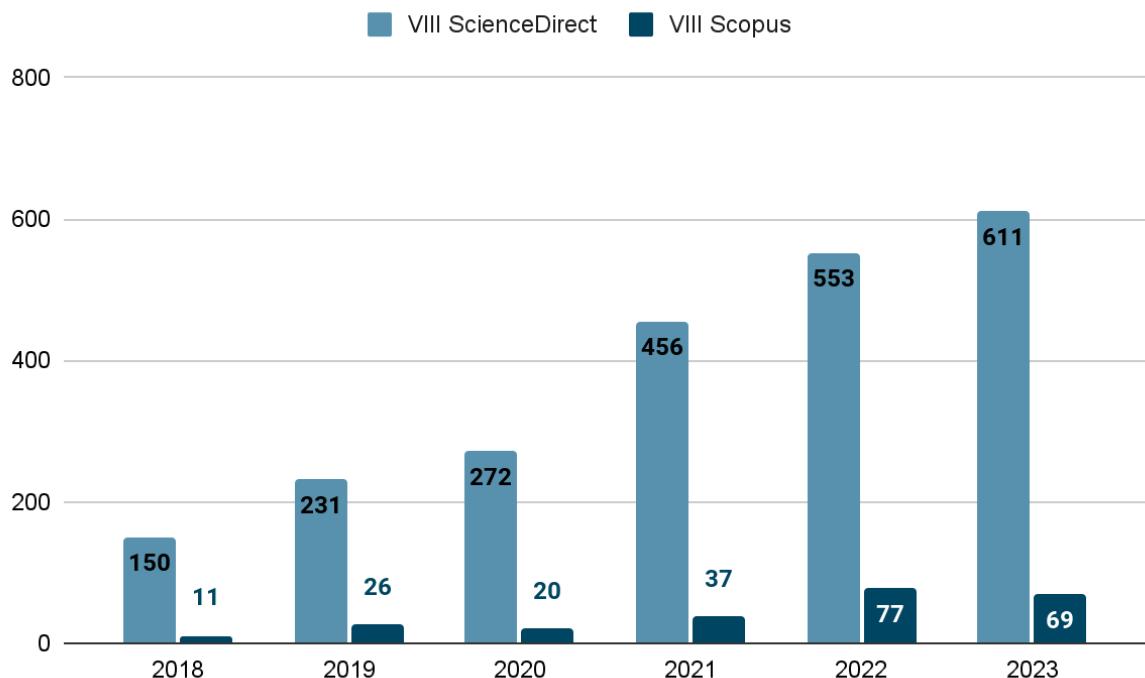
e 5 que houve uma crescente significativa no quantitativo de trabalhos ao longo desses anos.

Gráfico 4: Trabalhos publicados nas bases ScienceDirect e Scopus durante os anos de 2018 até 2023, com a palavra-chave VII.



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Gráfico 5: Trabalhos publicados nas bases ScienceDirect e Scopus durante os anos de 2018 até 2023, com a palavra chave VIII



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

No entanto, o número de artigos relacionados à utilização do controle estatístico do processo como ferramenta para verificação do comportamento da resina PET reciclada na indústria alimentícia é relativamente baixo.

Neste tópico serão discutidos sobre os impactos encontrados na utilização da resina 100 % reciclada bem como sua aplicação na indústria alimentícia e a utilização do CEP para amenizar esses impactos.

## 5.2 Estudos de casos

Um grande desafio no processo da utilização de resina 100% reciclada na indústria alimentícia é a processabilidade, pois alguns fatores como, índice de viscosidade alto, alta temperatura do forno no sopro, podem gerar um material não conforme durante o processo e impactar de forma negativa o resultado.

Durante o processamento de PET no sopro se faz necessário ter o entendimento do fluxo do processo fazendo a utilização correta da receita para o tipo de material que vai ser soprado e assim realizar os devidos ajustes.

Chacon et al. (2019), avaliaram o efeito do conteúdo reciclado de poli(tereftalato etílico) realizando uma comparação entre PET resina virgem e PET resina reciclada nas porcentagens 25%, 50%, 75% e 100%. Durante o estudo foram analisados três tipos de pellets rPET e um tipo de resina PET virgem, onde foram selecionados quanto à cor e substâncias voláteis, após separação e de acordo com o resultado nomearam os materiais em A, B e C, e verificaram que um deles possuía uma alta concentração de acetaldeído, não podendo ser utilizada em indústria de bebidas. Os materiais do tipo A, foram feitos a partir de garrafas PET mono coletadas, já os dos tipos B e C foram feitos principalmente a partir de garrafas PET coletadas. Também foi observado um menor tamanho das partículas encontradas em resinas PET virgem quando comparado a resina do tipo rPET, e que a contaminação por partículas aumenta com o conteúdo reciclado e que quanto mais partículas mais turvas são as garrafas. Nesse estudo, as garrafas foram produzidas em uma instalação de pequena escala, onde as pré-formas passaram mais tempo a exposição de elevadas temperaturas, afetando assim as propriedades das garrafas PET, causando amarelecimento e viscosidade intrínseca mais baixas.

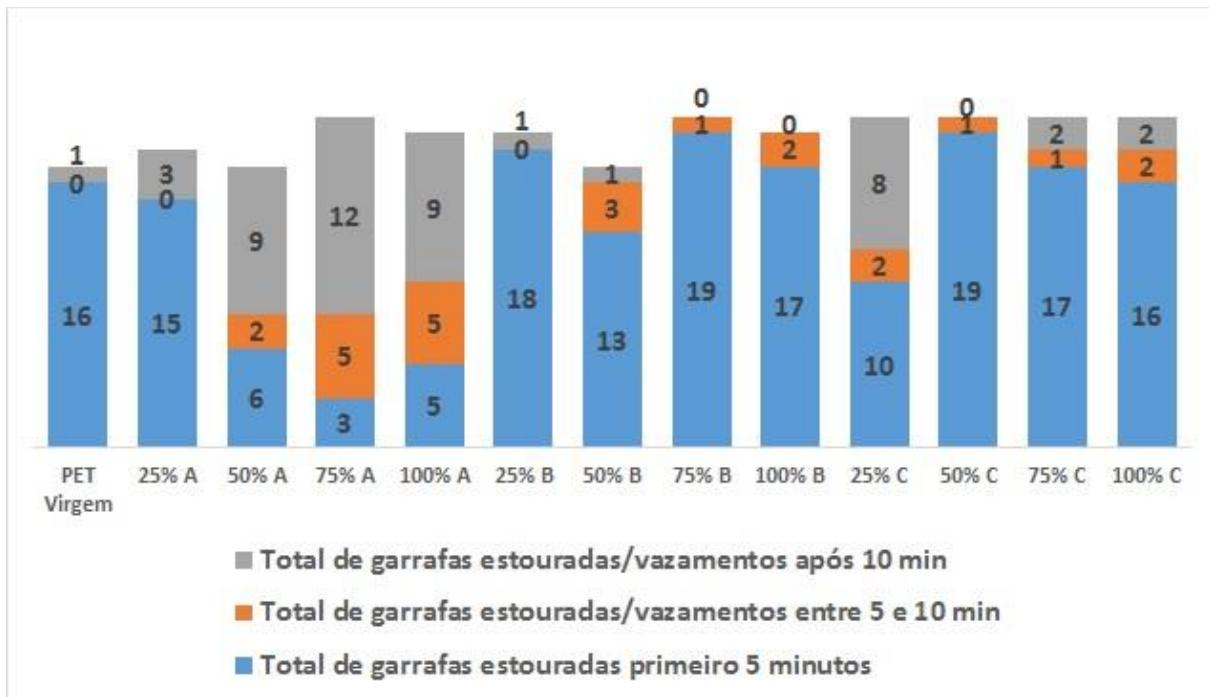
Para garrafas com a viscosidade intrínseca mais alta (tabela 3), foi observado que existe uma maior resistência ao teste de craqueamento por estresse ambiental (ESC) (gráfico 6), porém os dados não são suficientes para determinar essa correlação.

Tabela 3: Viscosidade intrínseca em g/dL medida de acordo com ASTM D4603-03 para pellets, frascos contendo 100 % do pellet e frascos contendo 25% dos pellets rPET correspondentes

Material	Pelletes	Bottles containing 100% pelletes	Bottles containing 25% de rPET
PET virgem	0,78 ± 0,01	0,71 ± 0,06	N / D
PET A	0,81 ± 0,02	<b>0,73 ± 0,01</b>	0,72 ± 0,01
PET B	0,73 ± 0,01	0,63 ± 0,01	0,66 ± 0,04
PET C	0,77 ± 0,02	0,66 ± 0,02	0,76 ± 0,01

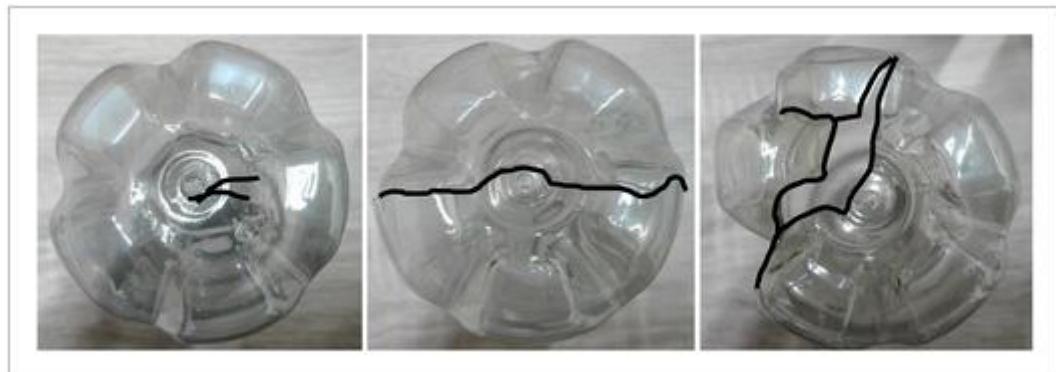
Fonte: Chacon et al. (2019)

Gráfico 6: Quantidade de garrafas testadas nos testes ESC, quantidade de garrafas estouradas nos primeiros 5 min, entre 5 e 10 min, e após 10 min.



Fonte: adaptado de Chacon et al. (2019)

Figura 12: Tipos de danos identificados após o teste de ESC. Da esquerda para a direita: vazamento (furo ou pequena ruptura), estouro quando o fundo se parte ao meio e estouro completo. Linhas pretas foram desenhadas para acentuar os defeitos



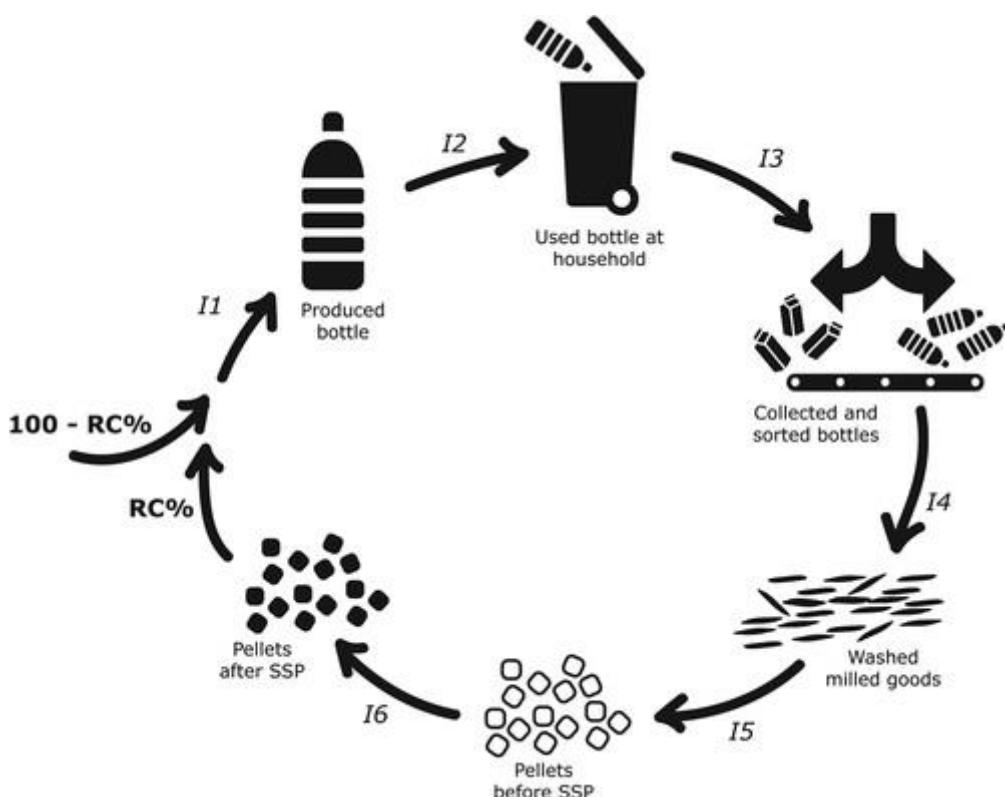
Fonte: Chacon et al. (2019)

Os autores concluíram que, de modo geral, foi verificado que as garrafas, com o aumento dos níveis de conteúdo reciclado, tornam-se mais cinzentas e amarelas, e que alguns fatores como a contaminação por partículas, adição de corantes azuis e o tipo de contaminantes de partículas desempenham um papel importante para

determinar o parâmetro de cor e que quanto maior o conteúdo reciclado mais será a diferença de cor observada em relação aos materiais virgens.

Brouwer et al. (2020), deu continuidade ao estudo de Chacon et al. (2019), fazendo a avaliação do efeito do conteúdo reciclado (RC) e da qualidade do rPET nas propriedades das garrafas PET avaliando a modelagem da reciclagem repetitiva. Durante a pesquisa foi estudado a presença de contaminantes em garrafas PET e materiais derivados das etapas do ciclo de reciclagem. Para a metodologia do trabalho, o ciclo de reciclagem foi analisado em seis etapas diferentes do processo (figura 13), etapas essas em que podem ser adicionados contaminantes. As etapas foram: a produção da garrafa (I1), a utilização das garrafas (I2), coleta e triagem (I3), reciclagem mecânica (I4), processamento (I5) e tratamento (I6).

Figura 13: Aumento na contaminação durante um ciclo de reciclagem de garrafas de tereftalato de polietileno (PET)



Fonte: Brouwer et al. (2020)

Durante o estudo foram analisadas quatro tipos de garrafas PET comuns para bebidas em três etapas da cadeia de produção e reciclagem (I1 a I3). Foram avaliados pellets, garrafas recém-produzidas e garrafas pós-consumo nas residências. As garrafas foram tratadas de forma anônima, mas foram reconhecidas pela marca e tipo de produto. A partir da etapa 4 (I4) os materiais são fresados não sendo possível rastrear os tipos de garrafas de forma individual, e para as etapas (I4 a I6) do ciclo de reciclagem, três empresas de reciclagem de PET realizaram o fornecimento de amostras de produtos moídos lavados, pellets antes e após o tratamento de polimerização. Existe, frequentemente uma mistura de pequenas quantidades de garrafas co-coletadas com garrafas mono-coletadas, mas o aumento de partículas no sistema de mono-coletada será inferior ao sistema de co-coleta no qual as garrafas foram coletadas juntamente com outros materiais, como coleta seletiva e recuperação de RSU. O autor cita que foram realizados dois tipos de medições nas amostras dos pellets e nos fragmentos de garrafas PET: medição de partículas em solução para contaminação por partículas e microcoulometria para teor de cloro.

Os autores citaram que os frascos são cuidadosamente limpos de toda sujeira aderida, são fragmentados e limpos novamente, logo, a contaminação por partículas pode ser que já esteja incorporado na própria matriz de PET. As garrafas do sistema de co-coleta, por serem prensadas em fardos com outros materiais, apresentaram mais arranhões que as garrafas domésticas e do sistema de mono-coleta. Mas salientaram que mais pesquisas são necessárias para compreender melhor esse fenômeno.

Os autores concluíram que, após medição em vários locais do ciclo de reciclagem da contaminação do rPET com particular e cloro, os sistemas de mono-coletas, por serem apenas garrafas PET coletadas, acumulam menos contaminantes comparados ao sistema de co-coleta, onde são coletadas garrafas PET juntamente com outros tipos de embalagens plásticas e também não plásticas sendo classificadas posteriormente e que em um sistema de reciclagem fechado com os mesmos tipos de PET virgem e rPET como matéria-prima, dependendo do RC a contaminação irá atingir valores assintóticos. Os autores também citaram que, os níveis máximos aceitáveis de RC podem ser calculados com base na quantidade de

contaminantes acumulados no material rPET nos ciclos de reciclagem e nos limites de aceitação de migração, amarelecimento e nebulosidade.

Flor (2013), avaliou a utilização do controle estatístico do processo para realizar o monitoramento da espessura em garrafa PET, o estudo foi realizado com embalagens de PET 500mL para envase de água mineral. No estudo é comentado que durante o recebimento da embalagem é realizado um *check list* com informações de condições da carga, laudo de qualidade emitido pelo fornecedor, informações do laudo e etiqueta, nível da caixa (visual) e após essa verificação a matéria prima é liberada para consumo produtivo. A autora cita que durante o processo de sopro alguns fatores, como controle de temperatura e pressão podem influenciar o processo e que as pré-formas são submetidas a uma temperatura variada de 98 a 115 °C, onde os potenciômetros existentes em cada zona do forno interferem diretamente na espessura final da parede da garrafa. Caso ocorra variações, as garrafas podem apresentar deformações no seu formato padrão, quando a temperatura da pré-forma estiver mais elevada ou mais baixa do que a especificada, as garrafas podem ficar perolizadas e pode ocorrer o estouro do gargalo, se a temperatura estiver muito alta; ou rachaduras nas curvaturas do pé, devido a problemas na distribuição uniforme de material quando destinadas ao envase; rugosidades; marcas de condensação, deformações no *finish*, estrangulamento.

Para a realização das análises do sopro, foi utilizado um equipamento chamado Magna Mike, onde o mesmo funciona através dos princípios do magnetismo, o aparelho é digital e fornece os valores de espessura de cada parte da garrafa. Neste estudo foram avaliadas as seguintes partes da Garrafa: ombro superior, ombro, painel de rotulagem, calcanhar, área de fundo, curvatura do pé e entrada do molde. A amostra que foi utilizada foi de 10 garrafas de 500mL, que foram analisadas 3 vezes por dia num período de 5 dias consecutivos e do mesmo lote de produção, demonstrando a tendência de variação do processo conforme o tempo. Das amostras obtidas foram calculadas as médias de cada um dos parâmetros desejados para análise do processo. O programa utilizado para análise dos dados foi o Software R, e o pacote “qcc” do mesmo software para realizar a construção de controle para média e amplitude. O método empregado no controle de variáveis foi o gráfico de controle tipo X – R. Flor (2013) observou, durante a análise

dos gráficos, que a maioria das medidas adotadas (ombro, ombro superior, painel de rotulagem, entrada do molde, curvatura do pé, área do fundo e calcanhar) na análise de espessura, apresenta-se com médias controladas e estáveis. Mas, que no gráfico de amplitude demonstra que o processo ainda não se encontra controlado, pois de forma geral os valores encontram-se altos. A autora defende que a utilização da ferramenta CEP é de suma importância e que contribui de forma significativa para realizar um melhor controle e estabilidade do processo, aumentando a produtividade, contribuindo na identificação de possíveis causas de variações, minimizando tempo devido diminuição de intervenções corretivas no processo. Flor (2013) também faz o levantamento de alguns pontos com relação a ferramenta CEP, que para a utilização de forma correta dependerá de alguns fatores como treinamento dos colaboradores, apoio da liderança, comprometimento das pessoas envolvidas no processo e principalmente da tomada de ações corretivas quando detectadas as causas das variações, para ser uma ferramenta eficaz de melhoria contínua para o processo de sopro de garrafas pet.

Após a realização dos três estudos de caso, fez-se uma comparação com uma indústria de água mineral conceituada no Nordeste que utiliza resina PET 100% reciclada. Chacon et al. (2019) e Brouwer et al. (2020) destacaram em suas pesquisas as dificuldades encontradas na utilização de resinas recicladas, pois a qualidade do material reciclado depende de alguns fatores como, sua forma de coleta e a reciclagem repetitiva. Os autores destacaram que quanto maior o grau de conteúdo reciclado na resina, mais contaminantes a mesma irá ter.

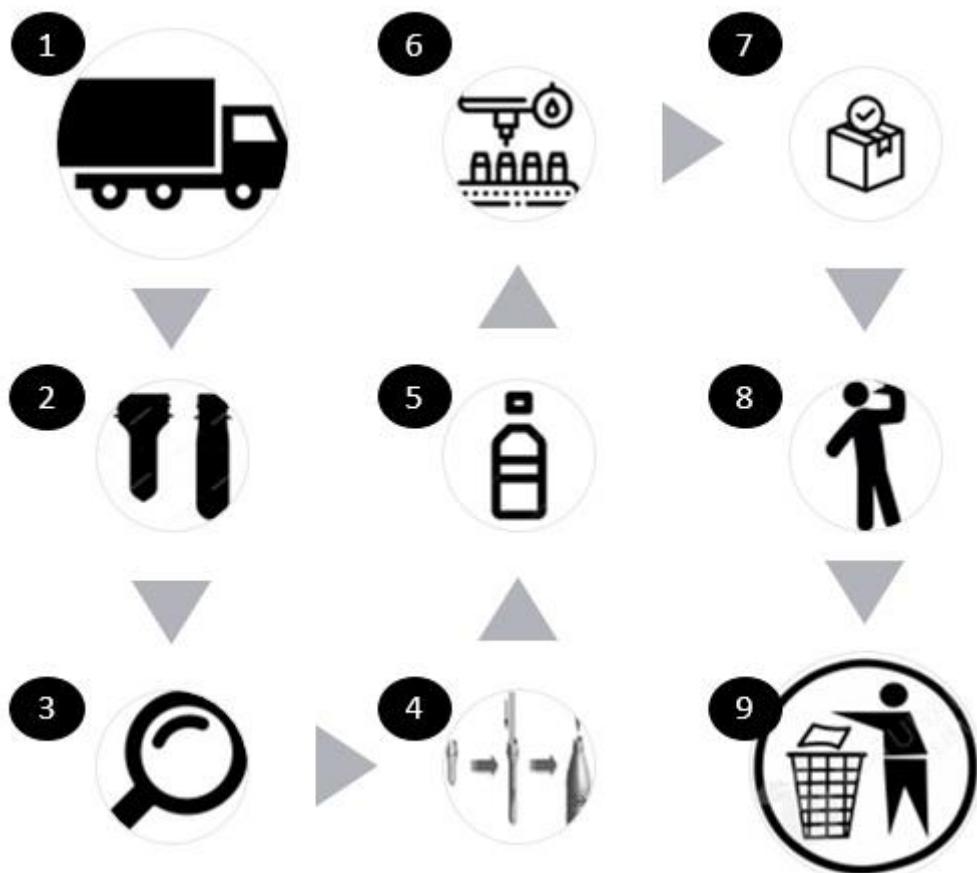
Na indústria observou-se que após aderir a utilização da resina 100% reciclada, aumentou-se o grau de dificuldade no processamento do sopro, tendo como resultado a produção de garrafas defeituosas durante todo o processo, gerando perdas de insumos, de produtividade e aumentando a insatisfação do consumidor através de reclamações nos canais de atendimento.

O processo na indústria inicia-se com o carregamento das pré-formas no fornecedor (1), seguido do recebimento da mesma na indústria (2), logo após realiza-se a análise dessas pré-formas (3) em uma certa amostragem e se forem aprovadas libera-se para o processo de sopro (4), que é seguido pela rotulagem (5), enchimento (6), empacotamento (7) e após análise do produto acabado é liberado

para o consumidor final (8) que ao consumir o produto e fazer o descarte da maneira correta faz com que esse produto volte para o ciclo de reciclagem (9).

Segue abaixo na figura 14, o princípio de funcionamento da indústria de água mineral.

Figura 14: Princípio de funcionamento na engarrafadora de água mineral



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

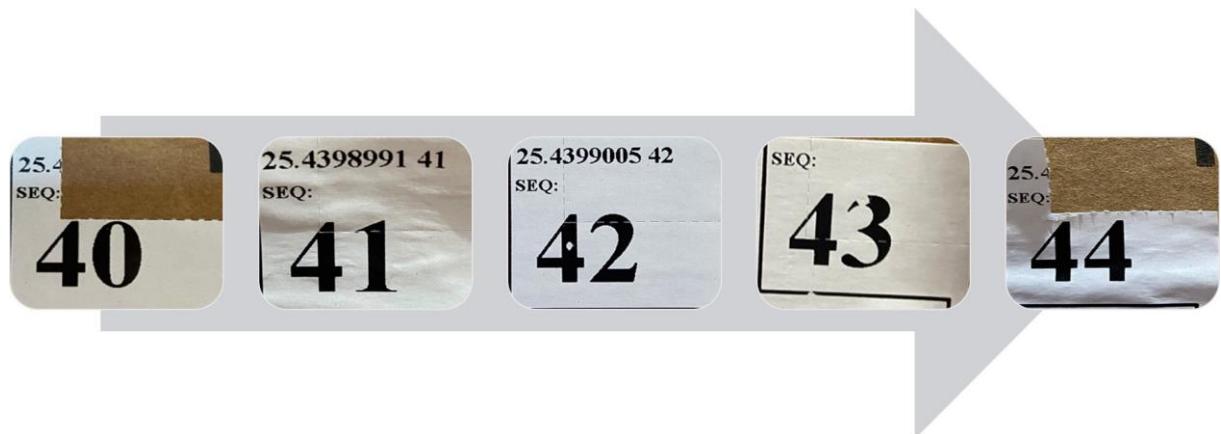
Durante a etapa de recebimento das pré-formas, avalia-se o laudo enviado pelo fornecedor onde contém informações relevantes como viscosidade intrínseca e o teor de acetaldeído presente no lote, logo após faz-se as análises visuais em uma amostragem utilizando os parâmetros de aceita/rejeita, caso atenda o procedimento libera-se o lote para a produção.

Na etapa de sopro, recebe-se o lote que vai ser utilizado e se faz necessário, segundo o fornecedor das pré-formas, seguir com a utilização das mesmas em uma sequência de caixas, (como mostra a figura 15), pois essa sequência indica a

proximidade das propriedades (viscosidade intrínseca, teor de acetaldeído) dos lotes, fazendo-se com que reduza-se a quantidade de ajustes no processo.

Na indústria não é realizada a conferência dos resultados das análises que vem nos laudos do fornecedor, sendo assim, quando existe alguma variação no processo impossibilita realizar-se a comparação dos laudos dos lotes, visto que sempre estão dentro do limite de aceitação.

Figura 15: Sequencial de caixas a ser utilizado para melhoria do processo



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Durante o processo de sopro, os principais impactos encontrados são relacionados a redução da gramatura da resina PET recicladas, onde as garrafas sopradas podem apresentar furos, por causa da má distribuição da resina e o escape de gás, devido espessura da “parede” da garrafa ser mais fina, na produção de produtos carbonatados.

Durante a pesquisa observou-se que esses impactos ocasionaram um aumento de mais de 100% nas reclamações dos consumidores, nos produtos carbonatados alegando-se baixa ou nenhuma carbonatação e reclamações por garrafas moles nos produtos não carbonatados.

Outros fatores corroboram com as paradas por ajuste de processo, seguem abaixo algumas imagens de tipos de pré-formas/garrafas defeituosas encontradas na indústria durante o processo produtivo.

Figura 16: Garrafas com variação na coloração



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

A figura 16 mostra garrafas com variação na coloração que foram observadas na indústria durante o processo produtivo, no estudo de Chacon et al. (2019) os autores citam que isso acontece devido ao aumento do nível de conteúdo reciclado.

Figura 17: Pontos pretos presente nas pré-formas/garrafas



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

A figura 17 mostra-se garrafas com presença de ponto preto, isso acontece devido a contaminação ou acúmulo da resina fazendo com que ao passar pelo processo de sopro cause rupturas/fissuras na parede da garrafa.

Figura 18: Furos nas pré-formas/garrafas



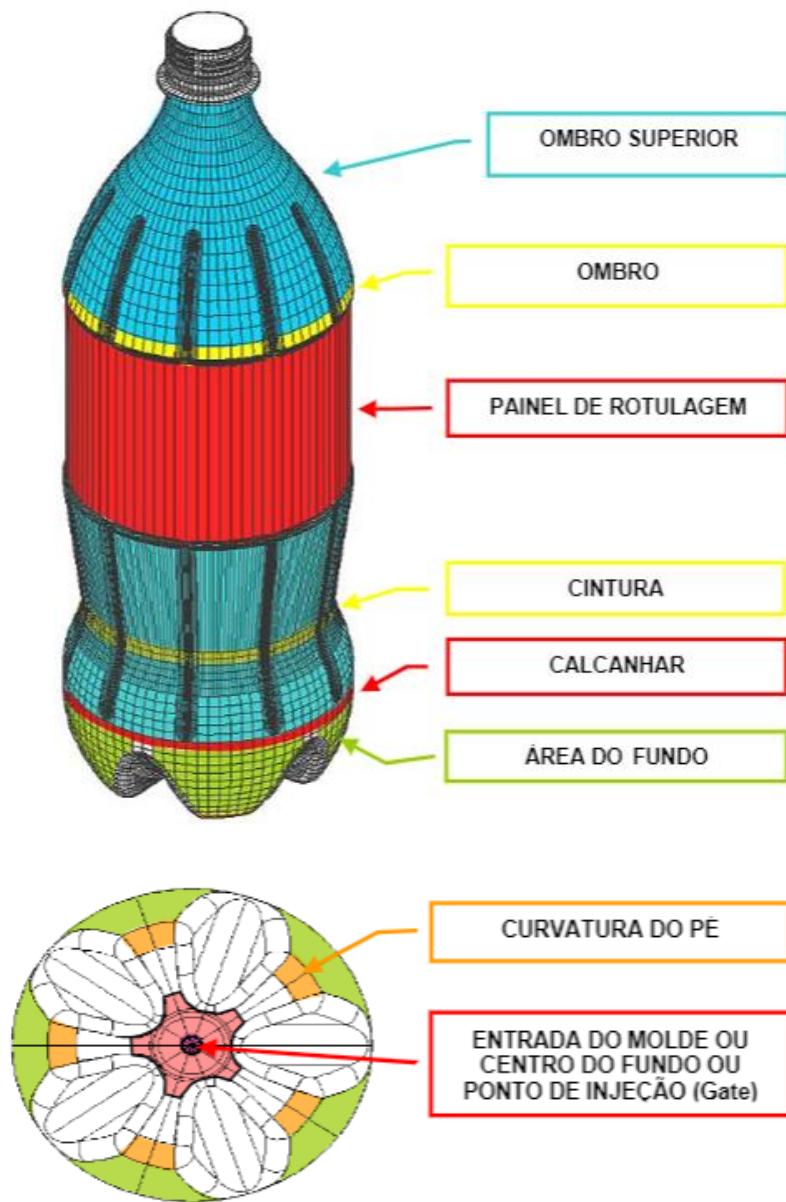
Na figura 18 observam-se garrafas que, por presença de furos e/ou má distribuição da resina durante o processo do sopro, acabam gerando paradas no processo de rotulagem quando identificados os furos ou estouros no processo de enchimento.

Ao realizar a utilização do controle estatístico do processo nas análises de sopro, Flor (2023) cita em seu estudo que consegue avaliar se o processo encontra-se estável. A autora destacou em sua pesquisa que, durante a análise dos gráficos, as médias estavam controladas e estáveis, mas a amplitude não, demonstrando que o processo ainda não encontra-se estável.

Na indústria estudada, a cada duas horas realizam-se as análises dimensionais da garrafa no sopro onde é realizado o input dos resultados em um software chamado *DataMyte*, mas não é realizada a verificação pela operação dos gráficos de média e de amplitude, impossibilitando a verificação da estabilidade do processo, e de uma possível correção sem precisar parar o processo produtivo.

A análise realizada no sopro é para verificar a espessura em 8 áreas da garrafa, são elas: ponto de injeção, área de fundo, curvatura do pé, calcânhar, cintura, painel de rotulagem, ombro e ombro superior, como mostra a figura 19.

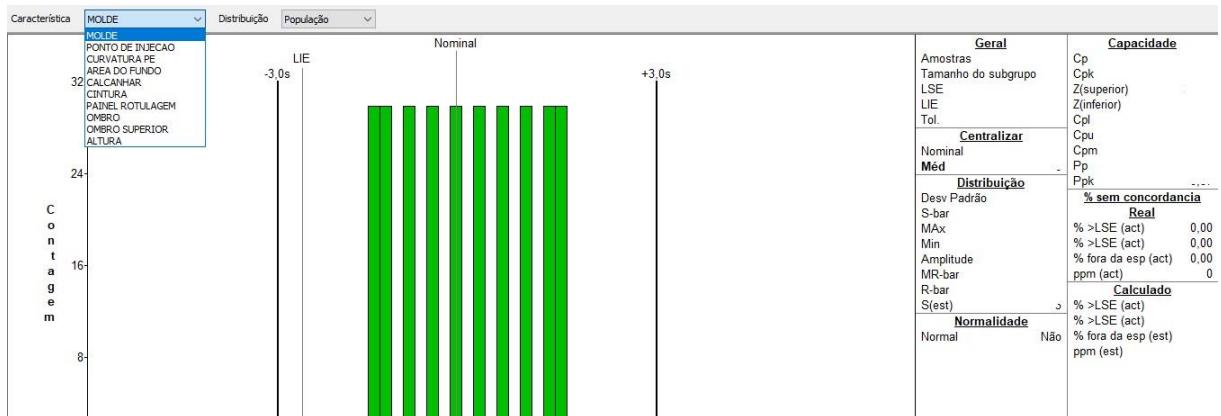
Figura 19: Áreas da garrafa que são realizadas as análises dimensionais no sopro



Fonte: adaptado do Procedimento Operacional da Indústria, 2024

O software *DataMyte* disponibiliza recursos como, histograma (figura 20) e cartas de controle (figura 21), que ajudam a verificar de maneira ágil e fácil essa estabilidade. Durante o estudo observou-se que nenhum dos operadores que utilizam o *DataMyte* para fazer o input das análises realizadas no sopro são treinados para utilizar esses recursos presentes no software.

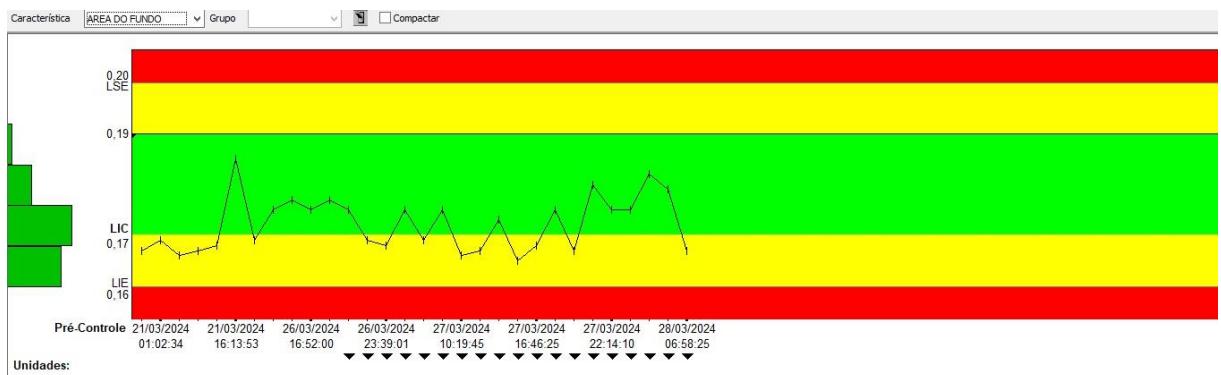
Figura 20: Histograma disponibilizado no software *DataMyte*



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

O histograma em questão foi extraído de um input de 30 análises, que é o valor mínimo para se obter um bom resultado de Cp e Cpk.

Figura 21: Carta de controle disponibilizada no software *DataMyte*



Fonte: Elaborado pela autora, 2024

Observa-se na figura 21 que existe uma variação no input dos resultados que impacta diretamente na análise da carta de controle, ao realizar a verificação dessa variação foi visto que existem oportunidades na submissão da homologação da garrafa, na criação do programa e também operacional.

Acredita-se que com a implementação da ferramenta CEP da forma correta os desafios encontrados durante o processo do sopro serão reduzidos e até mesmo sanados. Mas, assim como Flor (2023) citou em seu estudo e foi observado na indústria estudada, os desafios na utilização da ferramenta encontram-se majoritariamente no baixo nível de conhecimento da ferramenta, o que gera receios

na utilização da mesma e na compreensão dos resultados devido à sua complexidade.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho teve por finalidade realizar uma análise dos desafios encontrados na utilização da garrafa PET reciclada na indústria alimentícia, verificando a eficácia do controle estatístico do processo nas análises do sopro como forma de amenizar esses desafios.

Observou-se, com essa pesquisa e por meio dos trabalhos analisados, que as técnicas de aplicação do controle estatístico do processo são de suma importância nas fábricas de alimentos, principalmente se tratando de produção com resinas recicladas por terem riscos maiores de contaminação, pois elas desempenham um papel importante no controle de qualidade.

Com relação aos problemas ocasionados na utilização da resina reciclada percebeu-se que ao aumentar a quantidade de conteúdo reciclado tem-se um maior impacto, devido ao processo depender de alguns fatores, como o processo de coleta seletiva e da reciclagem em si, que feito de forma incorreta podem vir a alterar as propriedades do PET.

Sabe-se que a indústria de água mineral estudada trabalha com resina PET 100% reciclada, porém não utilizam a ferramenta de controle estatístico do processo, podendo ocasionar perdas de insumos e de indicadores de produtividade. Assim, através deste estudo, verificou-se que o controle estatístico tem papel fundamental no processo, evitando que ocorram essas perdas durante a produção.

Por fim, espera-se que a utilização do controle estatístico do processo nas fábricas de alimentos seja mais evidenciada, fazendo-se com que haja uma melhora no processo da utilização da resina reciclada, que além da dificuldade por seus níveis de contaminantes devido aos tipos de coletas, também sofre com relação a processabilidade na indústria e a insatisfação do consumidor final.

## 7. PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho buscou não somente tentar entender questões relacionadas à utilização do controle estatístico do processo na indústria alimentícia, mas também levantar questões adicionais a serem estudadas posteriormente. Por ser um tema como poucos estudos, acreditou-se que este trabalho deveria também levantar algumas possíveis questões.

Acredita-se que os seguintes pontos são importantes de serem explorados:

- Levantar de maneira mais profunda sobre a coleta seletiva e suas dificuldades, fazendo a análise sobre as possíveis implicações na utilização desse material.
- Fazer aprofundamento dos estudos relacionados a utilização da resina PET reciclada nas indústrias alimentícias.
- Pesquisar sobre a contaminação presente nos materiais reciclados de acordo com seu percentual e buscar entender sua relação com as dificuldades encontradas no processamento na indústria.
- Determinar a importância da utilização do controle estatístico do processo bem como realizar treinamentos com todos presentes nesse processo.

## REFERÊNCIAS

- ABIPET. Associação Brasileira da Indústria do PET. **Reciclagem**. 2022. Disponível em: <<https://abipet.org.br/reciclagem/>> Acessado em: 01/03/2024
- ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Índice de reciclagem mecânica de plásticos atinge o maior patamar desde 2018**. 2023. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-reciclagem-mecanica-de-plasticos-atinge-maior-patamar-desde-2018/>> Acessado em: 01/03/2024
- ABIPLAST. Associação Brasileira da Indústria do Plástico. **Índice de reciclagem mecânica de plásticos no Brasil atinge 25,6% em 2022, revela estudo do Picplast**. 2023. Disponível em: <<https://www.abiplast.org.br/noticias/indice-de-reciclagem-mecanica-de-plastico-no-brasil-atinge-256-em-2022-revela-estudo-do-picplast/>> Acessado em: 01/03/2024
- BANNACH, G., PERPETUO, G. L., CAVALHEIRO, E. T. G., CAVALHEIRO, C. C. S., ROCHA, R. R. **Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero PET: Um experimento para ensino de análise térmica**. Quim. Nova, Vol. 34, No. 10, 1825-1829, 2011.
- BRASIL. **Resolução de diretoria colegiada RDC nº 20 DE 26 de março de 2008**. Disponível em: <[https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2008/rdc0020\\_26\\_03\\_2008.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2008/rdc0020_26_03_2008.html)> Acessado em: 01/03/2024
- BRAZEL, C., ROSEN, S. L. **Fundamental principles of polymeric materials**. 3rd. ed. 1993.
- BROUWER, M. T., CHACON, F. A., VELZEN, E. U. T. **Effect of recycled content and rPET quality on the properties of PET bottles, part III: Modelling of repetitive recycling**. Willey Online Library. 2020
- CALLISTER, W. D., **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- CANEVAROLO JR, Sebastião Vicente. **Ciência dos Polímeros**. 2ed. São Paulo. Artliber Editora, 2006.

- CASTRO, P. J. **Estudo do impacto da viscosidade intrínseca do pet reciclado pós consumo em embalagens cosméticas.** 26. 2015.
- CEMPRE. **Ciclosoft 2023 - Panorama da coleta seletiva no Brasil.** 2023.
- CHACON, F. A., BROUWER, M. T., VELZEN, E. U. T. **Effect of recycled content and rPET quality on the properties of PET bottles, part I: Optical and mechanical properties.** Willey Online Library. 2019
- CONDE, L. M. S. **Polímeros naturais para aplicações biomédicas.** Universidade do Minho, Escola de Ciências, janeiro - 2011
- CREMA, F. L. **Análise Viscoelástica Não-Linear de Componentes Poliméricos com Elementos Finitos.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- CRISPIM, S. F., BORGHI, A. R. **Mudanças Estruturais na Indústria Brasileira de Refrigerantes como Reflexo do Processo de Substituição das Embalagens de Vidro pelo PET na Década de 90.** XXXII Encontro da ANPAD. Rio de Janeiro, setembro, 2008.
- CRUZ, S. A.; OLIVEIRA, E. C.; OLIVEIRA, F. C. S. de; GARCIA, P. S.; KANEKO, M. L. Q. A. **Polímeros reciclados para contato com alimentos.** Revista Scielo, v.21, p. 340-345, 2011.
- FLOR, Aline Silva. **Utilização Do Controle Estatístico Do Processo Para O Monitoramento de Espessura Em Garrafa PET: Um Estudo de Caso.** Julho de 2023.
- FONSECA, L. P., SANTOS, A. C. S. G., FERREIRA, L. A. F., REIS, A. C., PIZETTA, L. M. Aplicação integrada do controle estatístico de processo e engenharia de métodos em uma indústria alimentícia. *Exacta*, 18 (1), p. 459-483, jan./mar. 2020.
- FORLIN, F. J., FARIA, J. A. F. **Considerações Sobre a Reciclagem de Embalagens Plásticas.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 12, nº 1, p. 1-10, 2002.
- FREITAS, G. A. **Reciclagem de PET no Brasil: Cenário atual e projeção da reciclagem para 2030.** Universidade Federal de São Paulo, 2021.

GO4MOULD. **Processo de moldagem por injeção - um guia completo.** 2022. Disponível em: <Processo de moldagem por injeção – Um guia completo (go4mould.com)> Acessado em 20/07/2023.

HAGE Jr, E. **Aspectos históricos sobre o desenvolvimento da ciência e da tecnologia de polímeros.** Polímeros: Ciência e Tecnologia - Abr/Jun - 1998.

Lima, A.A.N., Lima, J.R., Silva, J.L., Alencar, J.R.B., Soares-Sobrinho, J.L., Lima, L.G., Rolim-Neto, P.J. **Aplicação do controle estatístico de processo na indústria farmacêutica.** Rev. Ciênc. Farm. Básica Apl., v. 27, n.3, p.177-187, 200.

MACEDO, I. M. E., SOUZA, M. D. L. C., SHINOHARA, N. K. S., SANTOS, C. S., SILVA, M. K. G. **Reciclagem do Polietileno Tereftalato (PET) no Fomento da Economia Circular.** Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 8, p. 57704-57723, aug. 2020.

MAIA, R. G. **Léo Hendrik Baekeland - Baquelite, o primeiro plástico sintético.** QUÍMICA vol. 42, n.º 150, jul-set 2018.

MANO, E. B., MENDES, L. C. **Introdução a polímeros.** – 2. ed. rev. e ampl. – São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

MANO, E. B., MENDES, L. C. **A natureza e os polímeros: Meio ambiente, geopolímeros, fitopolímeros e zoopolímeros.** – São Paulo: Blücher, 2013.

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

MIRANDA, C. A. S. **Simulação Do Processo de Sopro de Garrafas Poli(Tereftalato de Etileno) a Partir de Pré-Formas Disponíveis Através Do Método de Elementos Finitos.** p. 18. 2011.

MUNDO DO PLÁSTICO. **Máquina sopradora: o que é e quais seus diferenciais?.** 2023. Disponível em: <<https://mundodoplastico.plasticobrasil.com.br/gestao/maquina-sopradora-o-que-e-e-quais-seus-diferenciais>> Acessado em: 02/03/2024.

NOTARO, T. G. **Fatores determinantes da adoção de resina reciclada de polietileno pelas empresas no Brasil.** Fundação Getulio Vargas, Escola de Administração de Empresas de São Paulo. 2022

OLAM, M. **PET: Production, Properties and Applications.** Advances in Materials Science Research ISBN: 978-1-68507-371-8 Editor: Maryann C. Wythers, Nova Science Publishers, 2021.

OLIVEIRA, A. C. S., BORGES, S. V. **Poli (Ácido Lático) Aplicado para Embalagens de Alimentos: Uma Revisão.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 15, n. 1 (2020) 1-10.

PLASTICO MODERNO. **Conhecer as resinas plásticas é fundamental – Transformação de Plásticos.** 2016. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/resinas-plasticas-conhecer>>. Acessado em: 15/02/2024

PLASTICO MODERNO. **PET Polietileno Tereftalato: Síntese e Aplicações - Trasformação de Plástico (Resina PET).** 2016. Disponível em: <<https://www.plastico.com.br/pet-sintese-e-aplicacoes-transformacao/>> Acessado em: 15/02/2024

QUEIROGA, A. P. G. **O controle estatístico do processo como ferramenta para a minimização do impacto ambiental: estudo de caso em uma empresa de bebidas.** 2021, p. 17.

ROLIM, S. P. **Prós e contras de reciclar plásticos.** Revista Plástico Moderno. São Paulo, v. 8, p. 40-43, ago. 2001.

RILLING, M. C., LEHMANN, A., & LEHMANN, J. **Soil biodiversity effects of microplastic are correlated to primary particle size.** Environmental Pollution, 220(Pt A), 150-155, 2017.

RECICLOTECA. Centro de informações sobre reciclagem e meio ambiente. **Plástico: história, composição, tipos, produção e reciclagem.** 2020. Disponível em: <Plástico: história, composição, tipos, produção e reciclagem (recicloteca.org.br)> Acessado em: 25/04/2023.

RODA, D. T. **A injetora de plásticos.** 2011. Disponível em: <<https://www.tudosobreplasticos.com/processo/injecao.asp>> Acessado em: 21/02/2024

ROMÃO, W., SPINACÉ, M. A. S., PAOLI, M. A. **Poli(Tereftalato de Etileno), PET: Uma Revisão Sobre os Processos de Síntese, Mecanismos de Degradação e sua Reciclagem.** Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 2, p. 121-132, 2009.

SAMOHYL, R. **Controle Estatístico da Qualidade.** Rio de Janeiro: Campus, 2009. 288p.

SANTOS, A. C. **Estudo Da Reciclagem Do Poli(Tereftalato de Etileno) - PET Pós Consumo E de Suas Propriedades, Quando Submetido À Radiação Ionizante.** p. 42. 2008.

SARGENTINI, H. **Estudo Da Diminuição Da Gramatura de Embalagens de Polietileno Tereftalato (PET) E a Influência No Grau de Cristalinidade.** p. 23, 2015.

SILVA, A. L. F., NOQUEIRA, E. L., CAMPOS, W. S., JUNIOR, J. B. O., ALBUQUERQUE, M. M. **Uso dos gráficos de controle para variáveis (x e R): estudo sobre o diâmetro dos parafusos utilizando o software minitab®.** Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications. Edition. 18.Vol: 05. 2019.

SILVA, E. A. **Utilização de garrafas PET pós-consumo como revestimento anticorrosivo em aços.** Universidade Federal de Minas Gerais. 2019.

SOARES, E. A. **Poli(tereftalato de etileno) (PET).** Plástico industrial, 2021. Disponível em: <[https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/1681-Poli\(tereftalato-de-etileno\)-\(PET\).html](https://www.arandanet.com.br/revista/pi/noticia/1681-Poli(tereftalato-de-etileno)-(PET).html)> Acessado em: 15/02/2024

SOARES, L. L. S. **Determinação de Contaminantes em Bebidas Não-Alcoólicas Acondicionadas em Garrafas PET Pós-Consumo Recicladas (PET - PCR).** Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, P. P., SILVA, G. G., AMARAL, L. O. F. **Transição vítreo - Uma abordagem para o Ensino Médio.** Química Nova Escola, 2004. Disponível em: <<https://www.yumpu.com/pt/document/read/14359397/transicao-vitreo-uma-abordagem-para-o-ensino-medio>>. Acessado em: 01/11/2023.

SPINACÉ, M. A. S., DE PAOLI, M. A. **A tecnologia da reciclagem de polímeros.** Química Nova 28 (1), fev - 2005.

TAVARES, A. C., LEPIENSKI, C. M., UNGARI, M. B., MATTOSO, N., CANTÃO, M. P., **Análise da influência do grau de cristalinidade nas propriedades nanomecânicas e viscoelásticas do PET**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 14., 2000, São Pedro - SP.

UNIVASF. Universidade Federal do Vale do São Francisco. **O que é reciclagem química?** 2019. Disponível em: <<https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/o-que-e-reciclagem-quimica>> Acessado em: 15/05/2023.

UNIVASF. Universidade Federal do Vale do São Francisco. **A cor da garrafa PET importa?** 2019. Disponível em: <<https://portais.univasf.edu.br/sustentabilidade/noticias-sustentaveis/a-cor-da-garrafa-pet-importa>> Acessado em: 15/01/2023.

WELLE, Frank. **Twenty years of PET bottle to bottlerecycling—An overview.** Journal Elsevier, Freising, v.55, p. 865-875, 2011.

WIEBECK, Hélio e HARADA, Júlio. **Plásticos de engenharia.** . São Paulo: Artliber. . Acesso em: 24 mar. 2024. , 2005.

World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company. **The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics** (2016).

XCiência. **Plásticos não esquecem - experimento com PET. 2021.** Disponível em:<<http://www.xciencia.org/2021/07/26/plasticos-nao-esquecem/#:~:text=Nesse%20processo%20ele%20muda%20do%20estado%20s%C3%B3lido%20para>> Acessado em: 10/11/2023.